

Kniha byla zakoupena na serveru Palmknihy.cz.

Kupující: fikus123@centrum.cz

ID 2126114585

Upozorňujeme, že kniha je určena pouze pro potřeby kupujícího. Kniha jako celek ani žádná její část nesmí být volně šířena na internetu, ani jinak dále zveřejňována. V případě dalšího šíření neoprávněně zasáhnete do autorského práva s důsledky dle platného autorského zákona a trestního zákoníku. Neoprávněným šířením knihy poškodíte rozvoj elektronických knih v ČR. Tak nám, prosím, pomozte v rozvoji e-knih a chovejte se ke knize, k nakladatelům, k autorům a také k nám fér.

Věda podle abecedy

Petr Koubský

Edice N

Úvodem

Ve škole jsme se učili abecedu. Od té doby se svět změnil. To platí, ať je vám osmdesát, či osmnáct. Kdo chce světu rozumět, musí zacházet s pojmy, jež ho popisují, stejně snadno a samozřejmě jako s písmeny.

Napadlo mě udělat knížku o vědě formou slovníku. Co kapitola, to slovo, které je dobré znát, které se nějak týká každodenního života, přestože to nemusí být zřejmé na první pohled. Nečekejte encyklopedii, slovníková hesla často používám jako záminku, jako vstupní bránu do vyprávění o širších souvislostech. Na druhou stranu slibuji, že se nikde nevyhýbám poctivému a srozumitelnému vysvětlení, nejde o žádnou hru se čtenářem. (S výjimkou jediného hesla, kde jsem dal přednost lehkosti nad rigorózností. Rozpoznáte ho snadno.)

Jedním z důsledků použité slovníkové formy je to, že se nelze vyhnout duplicitám. Některé záležitosti je prostě potřeba vyložit víckrát, pokaždé na jiném místě – na slovník si jen hraje, šlo mi o to, abyste kterékoli heslo mohli číst jako souvislý text bez listování sem a tam. Rozhodl jsem se, že se duplicitám vyhýbat nebudu, že je naopak přijmu jako příležitost vysvětlit důležité věci víckrát, pokaždé trochu jinými slovy, z jiného zorného úhlu.

Rozhodnutím pokrýt všechna písmena české abecedy, jimiž může gramaticky správné slovo začínat, tedy také Ď, Ť a Ň, jsem si trochu zkomplikoval život. Mám ale za to, že omezující podmínky jsou pro zdar díla zpravidla přínosem. Můj nezapomenutelný učitel z pražské VŠCHT, profesor Oskar Schmidt, člověk, který mě přiměl uvažovat o vědě jako o životní náplni (není jeho vinou, že se tak nestalo), rád říkával: v ideálních podmínkách dovede pracovat každý blbec.

Knihla částečně vychází z mých textů v Deníku N. Kde se mi některý z pojmů již podařilo vyložit dříve, tam jsem po hotové práci sáhl a jen ji trochu upravil. Větší část obsahu je však zcela nová.

Nikdo neví, jaká úroveň popularizace vědy je správná, jaká osloví a potěší nejvíc čtenářů. Kdykoli píšete o vědě pro široké publikum, honíte dva zajíce najednou. Snažte se, aby laický čtenář netápal, nepřestal číst a něco si odnesl; a zároveň dáváte pozor, aby použitá zjednodušení nedráždila odborníky. Každý z těch zajíců běží jinam. Zkušenost mě však naučila, že často utíkají podobnými směry a že se občas dohonit dají. V téhle knížce jsem si na to velkoryse dal asi padesát pokusů. Při takovém množství by se to snad občas povedlo i šimpanzovi!

To jako pobídka k nákupu samozřejmě nestačí. Raději vám nabídnu jiný argument, byť také ne zrovna obchodnický: Věda podle abecedy je o věcech, o nichž přemýšlím dlouhodobě – o některých z nich půl života. Nejsem vědec, nesnažím se ty pojmy změnit či prohloubit. Přemýšlím, jak je co nejlépe vysvětlit. Doufám, že by vám tahle nová abeceda mohla být užitečná.

Knihy bývají výsledkem činnosti mnoha lidí, mezi nimiž autor často ani není tou nejdůležitější osobou. O vznik téhle knihy se víc než já zasloužil Ján Simkanič, ředitel vydavatelství N media. Bez jeho výzev, opakovaných a ke konci již důrazných, by mě vůbec nenapadlo se do psaní pustit – jednak z lenosti, jednak kvůli názoru, kterého se s léty zbavuji stále obtížněji, že totiž napsaného textu je na světě už příliš mnoho. Děkuji Honzovi, že ze mě tento pocit provinění sňal na dobu nutnou k napsání knihy. Děkuji šéfredaktorovi Deníku N Pavlu Tomáškoví, že mi na psaní poskytl velkomyslné množství času. A velmi děkuji svým redakčním kolegům, na které dočasně připadla část mých běžných povinností. Rád jim to oplatím, až budou přibývat další svazky této ediční řady.

Můj dík patří všem, kdo se podíleli na cestě od rukopisu (ano, pořád se tomu tak říká) po tu věc, kterou teď držíte v ruce. Grafickou úpravu vymyslela kolegyně Eva Škrovinová z Deníku N, která spolu s Marcelou Schreiberkovou knihu vysázela a opatřila ilustracemi. Důkladnou jazykovou korekturu provedl Ondřej Horník, na poslední chvíli ještě sazbu přečetla Diana Štelová.

Naprosto zásadní roli sehrál Ondřej Vrtiška, biolog a vědecký novinář v jedné osobě, který prošel text knihy – nutno podotknout, že ve značné časové tísní, která nijak neovlivnila jeho pečlivost – a přispěl mnoha cennými připomínkami, některé z nichž mě uchránily před blamáží. Chyby, které zbyly, samozřejmě padají výhradně na mou hlavu.

Hodně věcí jsem si ujasnil doma v diskusích se Sigim a Karolínou, dvěma dětmi věku donedávna středoškolského. Obecně vzato, nejlepší metoda, jak se něco naučit, je pokusit se to vysvětlit někomu jinému. Až když to dokážete, můžete si dopřát pocit, že problematice jakžtakž rozumíte. V tomto smyslu pro mě bylo psaní Abecedy velmi přínosné. Zkuste někdy totéž – vysvětlovat těm, kdo o to stojí. Šířit znalosti je jedna z nejužitečnějších věcí, jaké se dají dělat. A zároveň jedna z těch, kde čím víc rozdáváte, tím víc sami máte. V tom se podobá lásce.

Petr Koubský



Astat

Chemický prvek číslo 85, nestabilní, radioaktivní.
Pokud známo, zcela neužitečný. Velmi zajímavý.

30,97 15 P Fosfor	32,06 16 S Sira	35,45 17 Cl Chlor	39,95 18 Ar Argon
74,92 33 As Arsen	78,96 34 Se Selen	79,90 35 Br Brom	83,80 36 Kr Krypton
121,75 51 Sb Antimon	127,60 52 Te Tellur	126,90 53 I Jod	131,29 54 Xe Xenon
208,98 83 Bi Bismut	~209 84 Po Polonium	~210 85 At Astat	~222 86 Rn Radon

Pravděpodobně to je černá hmota kovového vzhledu. Nikdo ji ale ještě neviděl a nejspíš nikdy neuvidí, aby to mohl potvrdit. Přesněji řečeno, kdybyste větší kus astatu někdy spatřili, buďte si jisti dvojím: za první, je to jedna z posledních věcí, které v životě vidíte, za druhé, nastaly tak zvláštní okolnosti, že ten astat je zřejmě jednou z nejméně podivných věcí kolem vás.

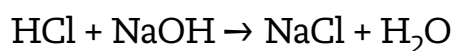
Astat je nejvzácnější přirozeně se vyskytující prvek. Na celé zeměkouli by se ho našel nanejvýš gram. A kdybychom si ho přece jen opatřili ve větším množství, odparil by se nám před očima, přestože taje až při třech stech stupních Celsia. Této teploty by však větší kus astatu dosáhl snadno a rychle sám od sebe. Zahřál by ho jeho vlastní radioaktivní rozpad. Skvěle to vystihl biochemik Derek Lowe, kterého ve své knize [Co kdyby?](#) cituje Randall Munroe: „Astatu se prostě nechce existovat.“

Nechce existovat, jenže musí; je mu vyhrazeno místo v periodické tabulce. Ta zobrazuje zásadní fyzikální zákon, princip výstavby atomů. Odhalili ho začátkem dvacátého století Rutherford a Moseley, do hloubky ho propracoval Niels Bohr, ale začít musíme od Mendělejeva.

Všechno je z atomů, jenže co to je atom?

V roce 1869 se o struktuře hmoty vědělo toto: všechno kolem nás je tvořeno atomy. Na světě existuje mnoho chemických prvků; co prvek, to odlišný typ atomu, zatímco všechny atomy téhož prvku jsou stejné. Kolik prvků je, to nebylo jasné, těch známých bylo něco přes šedesát a objevovaly se další. Jako věrohodná vypadala i domněnka, že jejich počet není ničím omezen. (Což se ostatně pokládá za možné i dnes.)

Většina [jednoduchých látek kolem nás](#) – voda, sůl, cukr, alkohol – nejsou prvky, ale sloučeniny. Skládají se z molekul, což jsou konstrukce tvořené atomy prvků. Některé jsou jednoduché, molekulu vody tvoří dva atomy vodíku a jeden atom kyslíku. Jiné jsou složité, molekulu typické bílkoviny tvoří tisíce atomů vodíku, uhlíku, kyslíku, dusíku a dalších prvků. Sloučeniny lze rozložit na prvky a pak ty prvky případně uspořádat jinak, jako když například z kyseliny chlorovodíkové a hydroxidu sodného vznikne kuchyňská sůl a voda:



Prvky na nic jiného přeměnit nelze, jsou nejjednodušší formou hmoty. (Většina těchto poznatků víceméně platí dodnes, skoro všechny však byly doplněny a upraveny – nezapomeňte, pořád je řeč o roce 1869.)

Některé prvky, hlavně kovy, byly známy odedávna: zlato, stříbro, měď, železo, ale také síra či rtuť. Jiné, především plyny, [objevili chemici](#) v osmnáctém století: do této skupiny patří kyslík, vodík, dusík, chlor. Počátkem devatenáctého století se začala rozvíjet elektrochemie. Zavedením elektrického proudu do roztoku se některé sloučeniny rozloží. Tak se podařilo najít další prvky.

Velký pokrok přišel se spektroskopií. Sluneční světlo se dá rozložit lomem a rozpadne se do duhy – do barevného spektra. Jsou i jiná světla než sluneční. Když třeba spalujete čistý vodík (nedělejte to doma!) a jeho světlo rozložíte hranolem, nedostanete celou duhu, ale jen několik úzkých barevných proužků – spektrálních čar – oddělených tmou (konkrétně u vodíku tři proužky: červený, modrozelený a fialový). Postupem času změřili experimentátoři barevná spektra většiny tehdy známých prvků (zapálit se dá s trochou úsilí všechno) a zjistili, že každé z jich je jiné, že každý prvek má svůj jednoznačný spektrální podpis.

Třeba podle abecedy

Ted' se seznámíme s Dmitrijem Ivanovičem Mendělejevem. Zmíněného roku 1869 mu bylo pětatřicet, měl za sebou studia v Německu, byl profesorem na petěrburské polytechnice a psal učebnici anorganické chemie. To byl sám o sobě dobrý důvod k hledání nějaké logiky v seznamu prvků.

Její náznak už tou dobou existoval. Chemici znali pojem „atomová váha“ a uměli podle ní prvky seřadit od nejlehčího – vodíku – k nejtěžšímu, kterým tehdy bylo olovo.

Mohlo by vás napadnout, že atomová váha je něco podobného jako hustota, ale tak to není. Jde skutečně o váhu (v dnešní terminologii: hmotnost) atomu. V devatenáctém století sice neuměl nikdo atom zvážit, ale dalo se stanovit, kolikrát je těžší než atom vodíku, jehož atomová váha byla pro tento účel definována jako 1. Chemici se pečlivými experimenty dopracovali k názoru (správnému), že se prvky spojují do sloučenin ve stálých poměrech a tyto poměry jsou vždy malá celá čísla. Za tohoto předpokladu lze – dalšími pečlivými experimenty – zvážit a dopočítat, kolikrát je kyslík těžší než vodík, provést stejný výpočet třeba pro dusík (pomocí molekuly čpavku, NH_3) a tak dále. Ne všechny atomové váhy vyšly jako celá čísla, což překvapilo – dnes víme, že je to způsobeno existencí izotopů a že žádná relativní atomová hmotnost, což je moderní termín pro „atomovou váhu“, [není celé číslo](#) (viz [IZOTOPY](#)).

Když seřadíme prvky známé v roce 1860 podle atomových vah, vznikne schéma, ve kterém se některé vlastnosti prvků opakují. Například třetí prvek takového pořadí – lithium – vypadá a chová se velmi podobně jako jedenáctý sodík a devatenáctý draslík. Podobně osmý kyslík se v leccm podobá šestnácté síře. Zřetelně zde funguje nějaké pravidlo s periodou osm. Toho si všimli mnozí, ale hledání hlubší zákonitosti nevedlo nikam. Když tento „zákon oktáv“ prezentoval mladý chemik John Newlands roku 1865 londýnské Chemické společnosti (a nešťastně do toho pletl hudební oktávy), [dostalo se mu ironické otázky](#), jestli už zkusil seřadit prvky pro změnu podle abecedy.

Kromě atomových vah a chemických vlastností byla k dispozici ještě jedna škála třídění prvků. O její zavedení se zasloužil švédský chemik

Johan Berzelius. Když experimentoval s elektrolýzou, povšiml si, že prvky se liší podle toho, zda je přitahuje kladná, či záporná elektroda. A když jich dáte do roztoku víc, budou přitahovány různou silou. Tak sestavil řadu od nekladnějšího sodíku po nejzápornější kyslík (dnes by začínala cesiem a končila fluorem, o jejichž existenci Berzelius ještě nevěděl) a vyslovil domněnku, že každá sloučenina má kladnou a zápornou část. Neplatilo to pro organické látky jako cukr či alkohol, což Berzelius vyřešil prohlášením, že ty neudrží pohromadě elektrický náboj, ale speciální životní síla, vis vitalis. V tom se naprosto mýlil a v podstatě mu to vyvrátil Wöhler syntézou organické látky, močoviny, již v roce 1828, díky Berzeliově autoritě však teorie žila ještě dlouho. Sestavit prvky do řady podle elektrochemických vlastností však dobrý nápad byl. Něco to určitě znamenalo, jenže co?

Pasiáns s atomy

Mendělejev sám tvrdil, že na princip, kterému dnes říkáme periodická tabulka, přišel ve snu, když se mu prvky samy před očima uspořádaly do správného schématu. Legendu rozšířil on sám, a zda se jí dá věřit, je sporné. (Říkával o sobě taky, že je potomkem sibiřských domorodých kmenů a že do sedmnácti let nemluvil rusky, ač byl synem ředitele gymnázia.)

Ovšemže na tom nezáleží. Mendělejevovi pomohly především jeho zevrubné znalosti vlastností všech prvků. Znal je důvěrně a nazpaměť, mohl si s nimi pohrávat v hlavě, přeskupovat je podle potřeby. Kromě toho si rád vykládal pasiáns.

A díky tomu všemu nakonec uviděl dvourozměrné schéma – tabulku, v níž se některé vlastnosti mění v řádcích, jiné se opakují ve sloupcích. (On sám ji psal otočenou a zrcadlově převrácenou oproti dnešní konvenci.) Tím do sebe zapadlo všechno: atomové váhy, Berzeliova řada (hodnotám v ní se dnes říká elektronegativity) a především obdobné vlastnosti některých prvků. Zpravidla těch, které jsou od sebe vzdáleny o osm míst.

Mendělejev měl nejen odvalu vynechat v tabulce prázdná místa pro prvky, které dosud nebyly nalezeny, ale dokonce předpověděl jejich vlastnosti – většinou správně. Vynechal místo i pro astat.

Ten patří do stejného sloupce tabulky jako celkem dobře známé prvky fluor, chlor, brom a jód. Říká se jim halogeny. Jsou hodně reaktivní a dovedou vytvářet velice stabilní sloučeniny, což je vlastně jinými slovy totéž: ve sloučeninách je jim „líp“ než o samotě. Všechny jsou v čistém stavu jedovaté a žíravé. Fluor a chlor jsou za normálních podmínek plyny. Brom je kapalina, která budí dojem, že kapalinou být nechce; valí se z ní zlověstně vyhlížející rudohnědá pára (její bod varu je 59 °C). Jód je pevná látka, která budí dojem, že... uhodli jste: má sice bod tání poměrně solidních 114 °C, ale už za pokojové teploty vydatně sublimuje – mění se z pevné látky přímo v páru. Co se teď dá čekat od astatu? Také vsoká

reaktivita, ještě temnější barva (fluor je nažloutlý, jód už temně fialový). Měla by to být pevná látka, možná kovového charakteru. A nejspíš bude provádět nějaké kulišárny stejně jako ostatní halogeny.

Třináct nestabilních prvků

Do třicátých let dvacátého století se podařilo Mendělejevovu tabulku téměř zaplnit. Pozici nejtěžšího prvku zaujal uran s pořadovým číslem 92. Nevyplněna zůstala políčka 43, 85 a 87. Tyto prvky se nedařilo nikde na světě najít. Proč tomu tak je, to vyjasnil důkladný výzkum radioaktivity a vlastností atomového jádra.

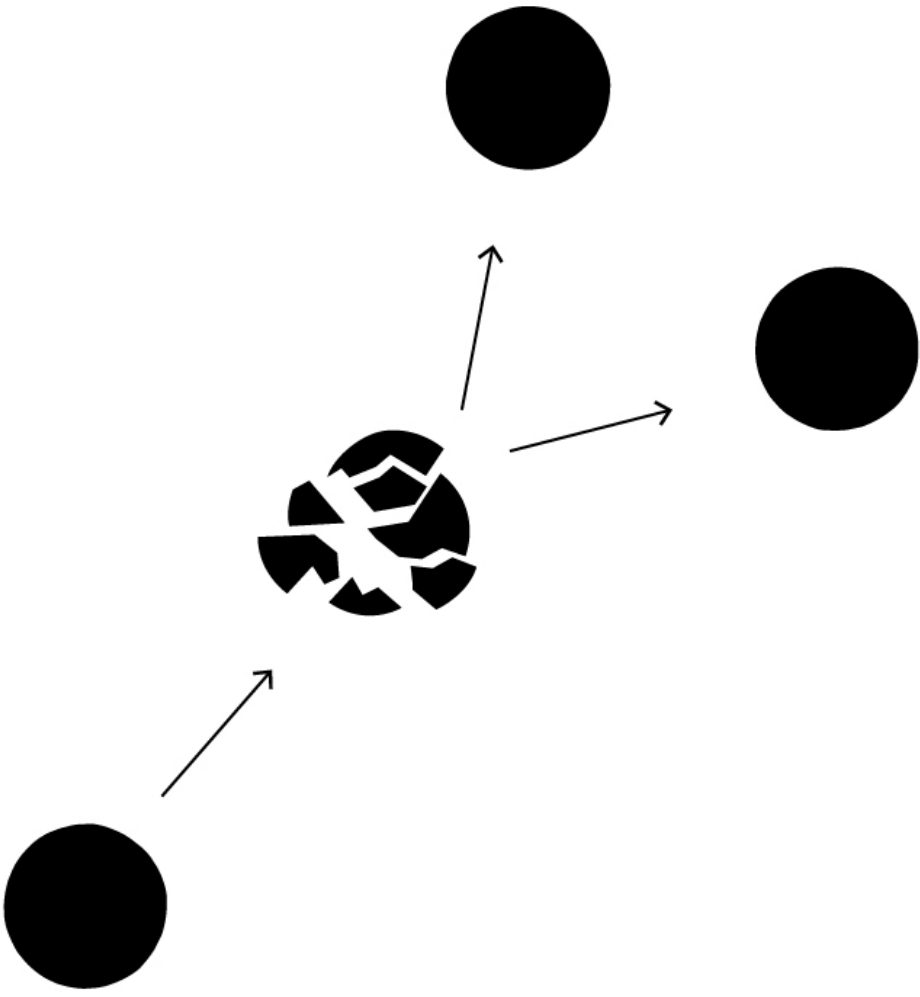
Atom se skládá (viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#)) z jádra a obalu. Jádro je tvořeno protony a neutrony, obal je tvořen elektrony. Chemie jako vědní disciplína se zabývá výhradně elektronovým obalem, a to ani ne celým: skoro všechno, co je z chemického hlediska důležité – vlastnosti prvků, jejich spojování do sloučenin – je určeno skupinou elektronů ve vnější části slupky. Co je pod nimi, blíže k jádru, to nemá na chemické děje vliv. [A jádro samo už vůbec ne.](#)

Takto chápaná chemie nemohla tři zbývající prvky najít, protože řešení záhady se nachází v jejich atomových jádrech. Neustále se totiž rozpadají, nejsou stabilní. Prvky 43 (dnes ho známe jako technecium), 85 (astat) a 87 (francium) musely být nejprve připraveny uměle. Zpočátku se soudilo, že se na zeměkouli vůbec nevyskytují. Dnes víme, že to není pravda. Technecia je v každé chvíli na Zemi 18 000 tun, francie asi 30 gramů a astatu – to nikdo tak docela neví, odhaduje se, že to bude gram nebo méně. Neobratná formulace „v každé chvíli“ je nezbytná. Tyto prvky totiž neustále vznikají a zanikají. Jsou meziprodukty jaderných přeměn.

Podle současného stavu poznání se na Zemi vyskytuje 94 prvků, od vodíku po plutonium. Třináct z nich je nestabilních; postupně se proměňují v jiné prvky. Činí tak rozmanitými rychlostmi, [s poločasem rozpadu](#) od minut po miliony let. A vydávají přitom energii v podobě radioaktivního záření. Kromě toho dovedeme uměle připravit další prvky, které se na Zemi přirozeně nevyskytují. Těch je prozatím 24. Všechny jsou nestabilní a radioaktivní. Není známo, jestli existuje nějaká horní mez, nebo zda můžeme těžší prvky připravovat umělými jadernými reakcemi dál a dál. Také se neví, jestli se od nějakého bodu jejich vlastnosti nezmění a nezačnou být zase stabilní namísto radioaktivních, což by samozřejmě bylo velice zajímavé.

Banach-tarského paradox

Z jedné koule se dají udělat dvě stejně velké jako ta původní.



Rakousko-uherský Lemberg, polský Lwów, sovětský Lvov, německý Lemberg, zas sovětský Lvov a nyní ukrajinský Lviv, to jsou v kostce osudy jednoho města za posledních sto let. Nacházejíc se v průsečíku kultur, prožilo slavné i hořké chvíle a po nějakou dobu, kterou z našeho vyprávění vynechat nemůžeme, bylo centrem pekla na zemi.

Lvovská univerzita se na začátku dvacátého století stala místem velkého soustředění matematických talentů. Aby takový ostrůvek vznikl, k tomu zpravidla stačí překvapivě málo: jedna či dvě silné osobnosti a minimální organizační zázemí. Talentovaní žáci přijdou sami.

Lvovská matematická škola nebyla formální instituce, ale název intelektuální skupiny, směru bádání a přemýšlení. Založil ji muž, o němž dnes neví skoro nikdo. Jeho plné jméno – v Polsku jsou plná jména náležitě důstojná a obřadná – znělo Władysław Hugo Dyonizy Steinhaus. Pocházel z Haliče, disertaci napsal v Göttingen u samotného Davida Hilberta, zřejmě největšího světového matematika tehdejší doby, a pak se vrátil domů. Zabýval se rozvojem teorie Lebesgueovy míry, ale jeho organizační přínos byl větší, takže jeho žáci ho v mnohém zastínili. Osud vynikajících učitelů!

„Největším Steinhausovým objevem“, jak to sám nazval, byl jeho doktorand Stefan Banach. I to byl venkovský kluk z Haliče, typické zázračné dítě téměř bez formálního matematického vzdělání. K objevu došlo za první světové války, kdy Steinhaus náhodou na ulici v Krakově zaslechl dva ošuntělé mladíky, jak se spolu baví o vyšší matematice; jedním z nich byl Banach. Týden poté dokončili první společný článek, hned po válce získal Banach asistentské místo ve Lvově a v roce 1924 se tam stal profesorem. Rád pracoval po kavárnách a hospodách; když všude zavřeli, nepohrdl nádražním bufetem, kde psal vzorce u püllitru piva. Vyhovovala mu společnost, hudba a kouř; podobal se básníkům a spisovatelům téže doby od Haška po Orwella, jenže zkoumal svět jiným způsobem a výsledky svého průzkumu sepisoval v jiném, výlučnějším jazyce.

Parta Skotů

Banach byl duší společnosti v podniku jménem Kawiarnia Szkocka (Skotská kavárna). Ten se stal neformálním centrem Lvovské matematické školy. Představte si je, jak tam popíjejí kávu, pivo a vodku, poslouchají klezmer a čmárají vzorce (jak praví legenda) přímo na mramorové desky stolků... Později si pořídili na skicování hypotéz tlustou knihu, kterou jim opatroval vrchní, takzvanou Skotskou knihu (Księga Szkocka). Do začátku druhé světové války, kdy tradice nevyhnutelně skončila, do ní zapsali 193 problémů, některé se jim podařilo vyřešit, jiné ne. Autor problému zpravidla uvedl i cenu pro řešitele: za snadné úlohy kávu, za těžší malé pivo, za ještě těžší porci kaviáru.

K nejslavnějším výsledkům zapsaným v této knize patří takzvaný Banach-Tarského paradox. Popravdě řečeno, zní tak, že jinde než v hospodě snad ani vzniknout nemohl; přesto jde o mimořádně důležitý výsledek posouvající matematické poznání o kus dál. Spočívá v tomhle: kouli lze rozřezat na konečný počet kusů a ty přeskupit tak, že vzniknou jiné dvě koule téže velikosti. (Později se ukázalo, že těch částí musí být minimálně pět. Dokázal to Abraham Robinson roku 1947. Jednou z částí je izolovaný bod.) Absurdní, že?

Steinhaus si o Banach-Tarského paradoxu nechal referovat ve své pracovně na univerzitě; Kawiarnia Szkocka nepatřila k jeho oblíbeným podnikům, v tom si se svými žáky nerozuměl. Raději chodil do cukrárny, která podle Stanisława Ulama (pozdější hlavní matematik vývoje vodíkové bomby) „byla víc nůbl ... a měli tam nejlepší zákusky v Polsku.“ Možná právě tam vymyslel svůj slavný problém dělení dortu. Jak od oka rozdělit dort tak, aby všichni byli spokojeni se svým dílem a nikdo nemohl druhému závidět? Dělení pro dvě osoby je snadné: jeden krájí, druhý si vybere, který díl chce. Pro tři a více jde o těžkou úlohu, která je dnes nicméně vyřešena (i pro obecné n).

Anatomie paradoxu

S nekonečnými množinami (viz [NEKONEČNO](#)) se dá dělat nekonečně mnoho nekonečně podivných triků. Banach-Tarského paradox (zkratme si to na BTP) není koneckonců žádným paradoxem ve smyslu neřešitelného rozporu. Je to jen matematická věta, která se zdá být v rozporu se zdravým rozumem – ale takových je! Je zcela solidní, její důkaz nikdo nezpochybňuje. Jen je dobré uvědomit si v souvislosti s ní několik věcí.

Snad je každému jasné, že se BTP týká matematických, nikoli reálných objektů. Jejím použitím nelze zdvojnásobit či jinak znásobit množství hmoty. Matematické objekty jsou idealizací předmětů z reálného světa. Přímkou nakreslenou na papíře nemá nulovou šířku (a nekonečnou délku), nakreslený bod není tím, „co nemá dílu“ (jak napsal Eukleidés, viz [ZÁKLADY](#)). Dosah této skutečnosti nám často uniká. BTP je mimo jiné dobrou příležitostí připomenout si ji.

S BTP je to ještě horší než s Eukleidovými body a přímkami. Nedá se nakreslit, nesouvisí s ním žádná názorná představa, je to ryze abstraktní záležitost. To je samozřejmě velmi frustrující, ale nedá se s tím nic dělat.

Co tedy BTP vlastně říká? S přesností dostatečnou pro náš účel můžeme použít formulaci, kterou uvádí český matematik [Luboš Pick](#): „Kouli libovolného poloměru je možno rozložit na sjednocení konečné mnoha částí a tyto části potom znovu složit tak, aby vznikly koule dvě, obě identické s koulí původní.“

Důležité na tom je, že používáme jen dvě tzv. izometrické operace: přesuny a rotace, musíme se obejít bez deformací částí, například

roztahování (představme si materiál, který je dokonale tuhý). Jinak by to totiž bylo snadné.

Existují analogie, které jsou pro pochopení BTP celkem užitečné, pokud nezapomeneme, že to jsou právě jen analogie. Nejjednodušší z nich je ukázat, že množina přirozených čísel (1, 2, 3...) se dá bez deformací (tedy izometricky) převést na množinu přirozených čísel, z níž vynecháme prvních libovolně mnoho členů – jako příklad nám poslouží množina přirozených čísel bez prvních tří členů, tj. 4, 5, 6... Druhou množinu prostě posuneme o tři místa doleva a je to. To udělat můžeme, protože obě jsou nekonečné, tudíž na konci nebude nic chybět, nekonečno plus tři je pořád (stejně!) nekonečno.

Zde je třeba zas jednou důrazně připomenout: nekonečno není totéž co „velmi hodně“, nekonečno není číslo. S nekonečnem se dá v matematice velmi užitečně pracovat, ale je třeba respektovat, že se chová jinak než čísla, často velmi kontraintuitivně.

Nutnou podmínkou pro platnost BTP je tzv. axiom výběru. Ten zasluhuje krátké vysvětlení.

Za jeden ze základů matematiky jako celku se dá pokládat teorie množin. Byla postupně vybudována na přelomu 19. a 20. století. Vychází z několika axiomů, mezi nimiž je jsou dva problematické: tzv. hypotéza kontinua a právě axiom výběru. Dlouho se o ně mezi matematiky vedl urputný spor. Dnes víme (dokázal to Paul Cohen roku 1965), že oba tyto axiomy jsou nezávislé na ostatních. To znamená, že můžeme mít teorii množin s jedním z nich, s oběma, anebo s žádným. Každá z těchto teorií bude vnitřně konzistentní a každá povede k trochu jiným výsledkům v oblasti vyšší, náročnější matematiky, Otázka, která z nich je „správná“, nemá smysl.

Axiom výběru se dá trochu nepřesně formulovat takto: když máme sadu neprázdných množin, můžeme vybrat z každé z nich po jednom prvku tak, že tento výběr vytvoří novou, tzv. výběrovou množinu. Ještě nepřesněji řečeno: máme hodně šuplíků, v každém z nich je nějaké množství kuliček, vždy alespoň jedna. Tvrdíme, že vždy lze vybrat z každého šuplíku právě jednu kuličku a nasypat je do pytlíku.

To přece dá zdravý rozum, ne?

Ano. A dokud je těch šuplíků konečný počet, není v tom žádný problém. Jakmile je jich nekonečné množství, začne zdravý rozum napovídat špatně.

Potíž je v tom, že nestačí říci „sáhnu tam pro některou kuličku“, protože to je metoda, která se u nekonečného počtu šuplíků nedá realizovat – nikdy neskončí! Metodu výběru musíme umět jednoznačně definovat. V některých případech to jde i s nekonečným počtem množin; příhodná je zejména situace, kdy se prvky těchto množin dají nějak jednoznačně seřadit („vezmu vždy kuličku, která je první v pořadí“). Když ale seřadit nejdou, pak jednoznačná výběrová metoda neexistuje.

Některým lidem je i tak intuitivně zřejmé, že axiom výběru platí, že tu jednu kuličku vytáhneme ze šuplíku vždy. Jsou to, zhruba řečeno, ti samí

lidé, kterým je zřejmé, že rovnoběžky se neprotnou ani v nekonečnu.

Jenže ani axiom výběru, ani věta o rovnoběžkách (neboli Eukleidův pátý postulát) se nedá dokázat. Z ničeho nevyplývá. Musí se zavést právě jako axiom – tvrzení, které se nedokazuje. Dobře známe geometrie bez pátého postulátu – neeukleidovské geometrie na jiných než rovinných plochách. Většina lidí vzdělaných v matematice a přírodních vědách s nimi nemá žádný problém, ostatně skvělým příkladem neeukleidovské geometrie je glóbus (součet vnitřních úhlů trojúhelníka je větší než 180 stupňů, nejkratší spojnicí dvou bodů je kruhový oblouk, nikoli úsečka, a tak dále – viz též [METRIKA](#)). Právě tak existují teorie množin bez axiomu výběru, a tím pádem také bez Banach-Tarského paradoxu.

Jsou matematici, kteří by se BTP velmi rádi zbavili, jenže obětovat axiom výběru by znamenalo zavrhnout některé další velmi užitečné partie matematiky. Tak to raději nechávají být.

Co se s nimi stalo potom

Alfred Tarski (1901–1983) odplul v srpnu 1939 z Polska do USA na lodi, která se ukázala být poslední. O pár dní později zaútočili na Polsko Němci, čímž začala druhá světová válka. Tarski do konce života přednášel v Berkeley, jeho rodina zahynula v koncentračních táborech.

Hugo Steinhaus (1887–1972) se za války skrýval v ilegalitě. Po válce se stal profesorem ve Wrocławu, kde se pokusil oživit tradici Skotské knihy. Kouzlo se samozřejmě nedostavilo.

Stefan Banach (1892–1945) zůstal ve Lvově. Podařilo se mu udržet si místo i po sovětské anexi východního Polska k Ukrajině, v roce 1941 však přišli Němci. Banach se během okupace živil kuriózním způsobem: svou krví krmil vši používané při lékařském výzkumu tyfu. Zemřel krátce po válce na rakovinu.

Skotská kniha přečkala válku zakopaná na fotbalovém hřišti. V roce 1981 vyšla v USA knižně s obsáhlým komentářem.

Někdejší Kawiarnia Szkocka na ulici Tarase Ševčenka v ukrajinském městě Lviv byla nedávno obnovena. Jmenuje se [Szkocka Restaurant & Bar](#) (píše se to skutečně polsky!), je součástí hotelu Atlas, prý velice nůbl: jeden z nejdražších podniků ve městě. Stefan Banach by ji cestou na pivo do nádražky obešel velkým obloukem.

Bayesovo pravidlo

Postup, jak spolehlivě spočítat pravděpodobnost jevů, o jejichž relativních četnostech nevíme skoro nic.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

Dalo by se to vysvětlovat i na něčem jiném, ale nejlíp si cokoli zapamatujete, když se zapojí emoce. Takže si představte, že jdete od lékaře, kde vám právě diagnostikovali ošklivou nemoc, nebudeme ji jmenovat. Tedy – nejspíš diagnostikovali. Zatím to byl jen první test. Má [spolehlivost](#) 88 %. To znamená, že je příliš citlivý. Ze stovky lidí, jimž vyjde test pozitivně, je nemocných jen 88. To můžete brát jako útěchu, ale ne moc velkou. Na 88 % tu nemoc máte a to je hodně velká pravděpodobnost.

V takovém rozpoložení si nejspíš nevzpomenete na Bayese. A to je chyba. Je to jediný člověk, který by vás mohl trochu uklidnit.

Nikoli osobně, dávno již není mezi námi. Thomas Bayes byl anglikánský duchovní, žil v osmnáctém století a jeho jméno se spojuje s klíčovým poznatkem z teorie pravděpodobnosti trochu neprávem. Skutečným autorem toho, čemu se říká Bayesův teorém, je francouzský matematik Pierre-Simon Laplace, který převedl Bayesovy úvahy do použitelné a přesné podoby. Po Laplaceovi se toho jmenuje i tak dost (inženýři dobře znají Laplaceovu transformaci), přesto je to citelná nespravedlnost, protože dopracování Bayesova teorému je dost možná tím nejvýznamnějším, co Laplace kdy udělal.

Oč jde a co to má společného s vaší smutnou cestou z ordinace? Pravděpodobností náhodného jevu se obvykle míní číslo vyjadřující, jak moc nebo málo lze takový jev očekávat. Když házíme mincí, je pravděpodobnost, že padne panna, rovna jedné polovině. Když házíme kostkou, je pravděpodobnost jedničky (nebo kteréhokoli jiného čísla) jedna šestina. Taková definice je zcela přirozená a srozumitelná. Potíž je v tom, že u mince nebo kostky se dá předem určit, jaká ta pravděpodobnost asi bude. U složitějších jevů, jakých je kolem nás většina, to tak snadné nebývá. A už vůbec to nejde v případě unikátních jevů, kde žádné relativní četnosti – počty orlů a panen při opakovaném házení mincí – neexistují.

Thomas Bayes uvažoval o pravděpodobnosti jinak. Neodvozoval její hodnotu od četnosti výsledku, ale od subjektivního pohledu, od stupně víry, že se stane to či ono. V Bayesově pojetí vycházíme z apriorní pravděpodobnosti (můj subjektivní odhad, jak pravděpodobný je nějaký jev), pak se dozvíme doplňkovou informaci a oba údaje zkombinujeme do finálního výsledku – aposteriorní pravděpodobnosti.

Například: než jdu spát, odhadnu (na základě počasí v několika uplynulých dnech) pravděpodobnost zítřejšího deště na 0,1. Ráno vyhlédnu z okna a vidím těžké mraky. Svůj odhad upravím na 0,4 – mraky jsou silný argument, ale pořád platí, že minulé dny nepršelo a že počasí bývá v této části roku spíš stálé. Téhle povšechné úvaze dal Laplace přesnou a použitelnou matematickou podobu.

V bayesovském uvažování jde vždy o to, jak dospět od apriorní pravděpodobnosti k aposteriorní. Cestou od lékaře byste se tedy měli napřed zamyslet, jaká je apriorní pravděpodobnost, že onou nemocí trpíte. To se dá často zjistit dost přesně: můžete si najít počet jejich výskytů v populaci, anebo přesněji ve vaší věkové skupině, u osob vašeho pohlaví atd.

Dejme tomu, že ve skupině, která se vás týká, mají tuto nemoc dva lidé ze sta, apriorní pravděpodobnost bez jakékoli další znalosti je tedy 0,02. Mezi deseti tisíci lidmi (takové číslo volíme pro pohodlnější počítání) je 200 nemocných.

Vy však dodatečnou znalost už máte – je jí výsledek vašeho testu. Představme si, že se mu podrobilo oněch deset tisíc lidí. Kolika z nich vyjde jako pozitivní? Především oněm dvěma stům nemocným. Zbývá 9800 zdravých. Test je spolehlivý na 88 %. To znamená, že z oněch 9800 označí $9800 \times 0,88 = 8624$ lidí jako zdravé, $9800 \times 0,12 = 1176$ jako nemocné.

Celkem tedy bude test pokládat za nemocné $200 + 1176 = 1376$ osob. Jednou z nich jste vy a očividně můžete patřit jak do skupiny zdravých, tak nemocných, to se zatím neví. Ví se jen to, že s pravděpodobností $200/1376 = 14,5$ % jste mezi těmi dvěma stovkami nemocných ze 1376 lidí otestovaných pozitivně.

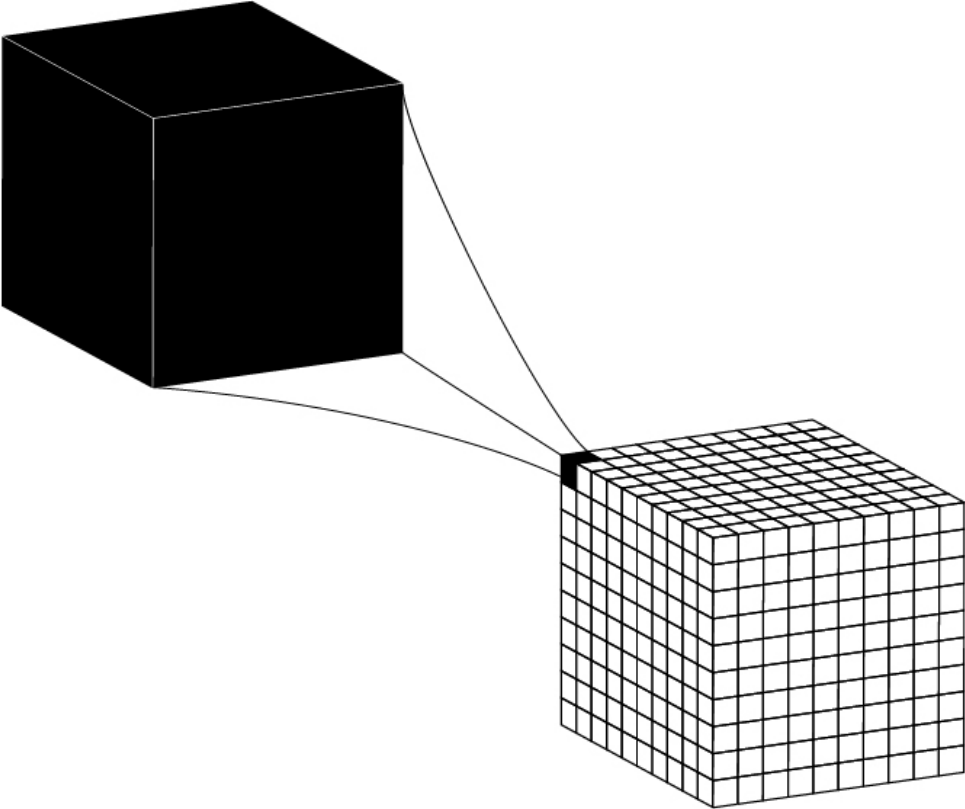
To je pořád dost vysoké číslo, ale rozhodně lepší než 88 %. Na další testy můžete jít trochu klidněji – pokud vás tedy tohle čarování s čísly uklidní.

Mělo by. O přijatelnost Bayesova přístupu k pravděpodobnosti se vedly mezi statistiky spory po desítky let, ale dnes je věc víceméně srovnaná a bayesovský přístup se pokládá za plně legitimní. Hodí se jak pro typ problémů, jaký jsme si právě popsali, tak pro mnoho jiných, nachází použití v úlohách strojového učení a umělé inteligence – právě proto, že umožňuje zapracovávat nové informace a zlepšovat na jejich základě původní nejistý odhad. Bayesova metoda se dá použít i tehdy, když nemáme vůbec žádnou apriorní informaci a prostě ji odhadneme.

A mimochodem: správně se Bayesovo jméno vyslovuje beiz. Ale když to tak budete říkat u nás, riskujete, že nikdo nepochopí, o kom to mluvíte, pro Čechy je to zřejmě navždy bajes.

Bilion

Velké číslo, které se plete při překladu.



Sto je desetkrát deset neboli deset na druhou. Tisíc je deset na třetí. Milion je tisíc tisíců, tedy deset na šestou. Miliarda je tisíc milionů: deset na devátou. Bilion je milion milionů, čili deset na dvanáctou. Tak a nikdy jinak.

Pokud tedy mluvíme česky. Anebo německy, rusky, francouzsky, maďarsky, turecky, finsky, indonésky, lotyšsky... prostě některým běžným jazykem.

Kromě angličtiny. Anglické slovo „billion“ značí naši miliardu neboli deset na devátou. A to, čemu my říkáme bilion, je pro Anglosasy „trillion“.

Zkrátka, anglický billion je naše miliarda. To zavdává příčinu zmatkům při překladech. Přestože je tenhle překladatelský oříšek dobře známý, vždy se najde někdo, kdo na to zapomene nebo se ve spěchu přehlédne. V novinách se pak dočteme, že na Zemi žije sedm bilionů lidí nebo něco podobného.

Ve skutečnosti je to ještě složitější, protože systémů pojmenování velkých čísel je víc než dva. Vědci se takovým názvům čísel raději úplně vyhýbají a používají místo nich mocninný zápis – namísto 2 310 000 píšou $2,31 \times 10^6$. Zato rádi a často používají předpony měrných jednotek.

Základními jednotkami pro přírodovědce jsou metr, kilogram a sekunda. Mnoho dalších se od nich dá odvodit. Rychlost měříme v metrech za sekundu (m/s neboli $m \cdot s^{-1}$), zrychlení v metrech za sekundu na druhou ($m \cdot s^{-2}$), sílu v newtonech ($1 N = 1 m \cdot kg \cdot s^{-2}$), energii v joulech ($1 J = 1 m \cdot N$), výkon ve wattech (viz WATT).

Tyhle jednotky jsou často příliš velké nebo příliš malé. Pro váš domácí účet za elektřinu je joule neprakticky malý, pro porovnávání velikosti živých buněk (viz ZIVOT) je metr příliš velký. Proto je dobré některé z předpon znát: kilo- je samozřejmě tisíc (kilometr má tisíc metrů), mega- je milion. Mili- je předpona pro jednu tisícinu, mikro- pro miliontinu, nano- pro miliardtinu a piko- není to, co vás napadlo, ale předpona pro jednu biliontinu základní jednotky.

Takhle to aspoň platí ve fyzice. Lidé od počítačů si násobky jednotek trochu ohnuli po svém, protože jsou zvyklí počítat s mocninami dvou. Kilobajt (KB) proto nemá 1000 bajtů, ale 1024 neboli dvě na desátou. (Kdo to je programátor? praví anekdota, kterou určitě vymyslel programátor. Odpověď totiž zní: člověk, který si myslí, že kilo salámu má 1024 gramů.) Megabajt podobně není milion bajtů, ale $10^{24} \times 10^{24} = 1\,048\,576$ bajtů.

Pro ty, kdo jsou ze školy už nějaký pátek, ještě stojí za připomenutí, jak to je s plošnými a dutými mírami. Obyčejný metr je totéž co deset decimetrů (vida, tuhle předponu, značící jednu desetinu, jsme vynechali), ale čtvereční metr má $10 \times 10 = 100$ čtverečních decimetrů – vezmete dvě metrové tyče, dáte je do pravého úhlu, na každé vyznačíte deset dílků a podle nich namalujete síť, která se bude skládat ze stovky čtverců 1×1 decimetr. Podobně metr krychlový (též kubický) má $10 \times 10 \times 10$ krychlových decimetrů. Jeden krychlový decimetr je učenější

název pro dobře známý litr, takže do kubického metru se vejde tisíc litrů. Na hektolitry, případně soudky piva si to už převedte sami.

Když už je řeč o velkých číslech, jaké je největší, které si ještě dokážeme představit, vizualizovat? Přijde na to.

Jediným pohledem bez počítání snadno zjistíme, zda jsou na stole dva kamínky, tři, či čtyři; od jakého počtu je ale budete muset spočítat? Pokud jste jako většina lidí, bude to nejspíš sedm.

Čísla do stovky jsou našemu vnitřnímu zraku dobře přístupná, takové počty týchž věcí vidáme docela často. Dál je to horší. Náměstí v mém rodném městě měří hektar, tedy 100×100 m. Když si k němu v duchu přiložím pravítko s milimetrovou stupnicí a představím si jemné linky napříč celou plochou, získám deset miliard čtverečků o velikosti milimetr krát milimetr. A tím největší číslo, o jehož vizualizaci jsem se kdy pokusil.

S podobně velkými čísly pracují astronomové a ekonomové. Veřejný dluh ČR činí asi 1750 miliard korun. (Richard Feynman jednou podotkl, že by se velkým číslům nemělo říkat astronomická, ale ekonomická.) K nejbližší hvězdě to máme 40 000 miliard kilometrů. Tedy co kilometr, to jeden milimetrový čtvereček na náměstí a těch náměstí musíte projít čtyři tisíce po sobě. (Což vlastně ani nevypadá tak zle.)

Odhaduje se, že lidské tělo tvoří asi 40 bilionů buněk. (V něm a na něm žije [přinejmenším stejné množství](#) jednobuněčných zvířátek, bakterií.) Vesmír, jak si ho dnes kosmologové představují, obsahuje asi 10^{80} atomů – plus minus [dva desítkové řády](#). To je největší číslo, které má nějaký rozumný fyzikální význam. Dál jsme v říši čiré abstrakce.

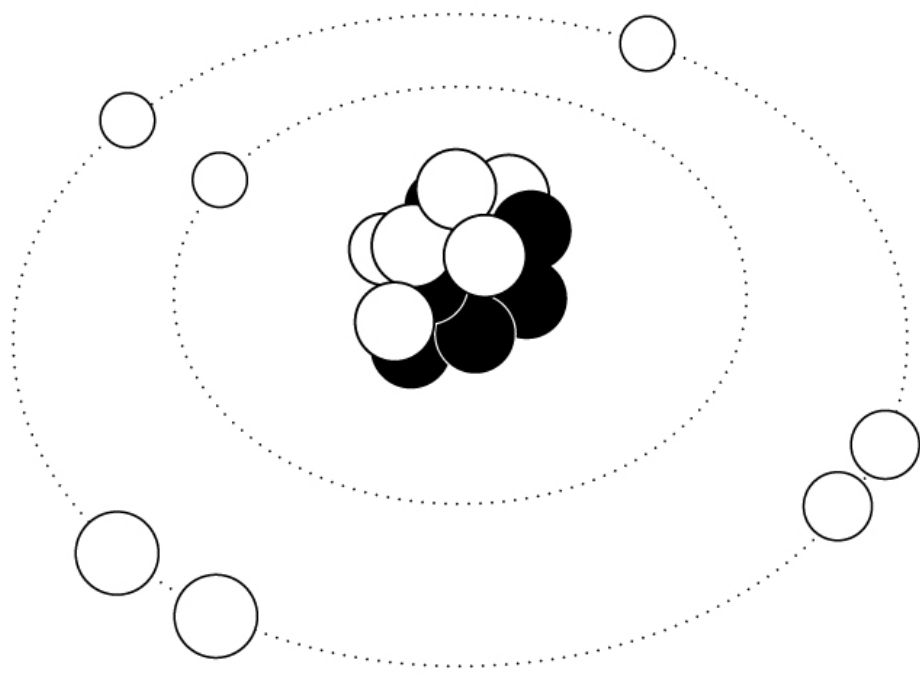
Číslu 10^{100} říkají matematici googol. Larry Page a Sergej Brin si spletli jeho pravopis a proto se Google jmenuje, jak se jmenuje. Googol je, jak vidíte, o hodně větší než počet atomů ve vesmíru, nemá tudíž hmotnou reprezentaci, nedá se nikdy nijak vypsat cifru po cifře.

Donald Knuth, pozoruhodná postava soudobé matematiky a počítačové vědy, vymyslel zápis kompaktnější než exponenciální notaci. Jedna šipka značí obyčejné umocňování: $3 \uparrow 3 = 27$. Dvě šipky: $3 \uparrow \uparrow 3 =$ tři na (tři na třetí) $= 3^{27}$, což je asi 7600 miliard. Tři šipky: musíme tři umocnit na oněch 7600 miliard! Čtyři šipky... Takzvané Grahamovo číslo je definováno rekurzivním vzorcem, který si můžete najít ve Wikipedii; jestli ho nepochopíte, buďte možná rádi, citlivějším jedincům může způsobit šok. V jeho prvním patře začínáme se čtyřmi šipkami, ve druhém je těch šipek zmíněných 7600 miliard a těch pater je 64. Neexistuje způsob, jak stanovit, kolik má Grahamovo číslo nul, prostě to nevíme. (Zajímavé ale je, že odzadu můžete vypsat jeho cifry, kolik chcete, a to zcela přesně. Končí na 387.)

Ale i takovéhle číslo je nepatrně, nepozorovatelně maličké vedle nekonečna.

Bohrův model atomu

Atom si zpravidla představujeme jako jádro z protonů a neutronů, kolem nějž obíhají elektrony jako planety kolem Slunce. Z větší části to je nesmysl, ale užitečný.



Terry Pratchett, nedávno zesnulý spisovatel fantasy, rád používal termín lies-to-children (psáno takto se spojovníky; Pratchettův nedávno zesnulý překladatel Jan Kantůrek to do češtiny zavedl jako lži-dětem). Mínil se tím zjednodušené vysvětlení složitého jevu, které je v podstatě nesprávné – buď proto, že zachází ve zjednodušení až příliš daleko, anebo proto, že je spíš obrazným přirovnáním než popisem – ale prokazatelně napomáhá pochopení problému. Výraz „lži-dětem“ vymysleli pro Pratchetta jeho vědečtí přátelé, matematik Ian Stewart a biolog Jack Cohen. Excelentním [příkladem lži-dětem](#) je a zůstává Bohrov model atomu, stěžejní vědecké dílo geniálního dánského fyzika.

Roku 1897 J. J. Thomson objevil elektron. Podpořil tím názor, který tou dobou byl menšinový, že totiž atom (viz ASTAT) má vnitřní strukturu. Vyšel z hypotézy, že katodové záření (viz [RADIOAKTIVITA](#)) je proudem částic, které se vytrhávají z materiálu katody. (Dnes víme, že to je pravda.) Z jejich doletu odhadl, že jsou asi tisíckrát lehčí než celý atom vodíku. (Dnes víme, že správná hodnota je 1/1836, Thomsonův odhad byl vzhledem k tehdejším možnostem neobyčejně dobrý.) Ukázal, že mají záporný elektrický náboj, což poznal podle toho, kterým směrem se jejich dráha ohnula v elektrickém poli. A konečně prokázal, že se tyto částice chovají stejně, ať pocházejí z kteréhokoli materiálu.

Z toho všeho vyvodil, že tyto částice, mezitím nazvané elektrony, jsou univerzálním stavebním kamenem všech atomů. Z toho nutně plynulo, že v atomu musí být také něco nabitého kladně, aby výsledný elektrický náboj vyšel nulový. Thomson navrhl „model švestkového pudingu“: souvislou hmotou s kladným nábojem se volně pohybují záporné elektrony. Jako švestky v onom anglickém zákusku.

Jako Slunce s planetami

Thomsonův mladší spolupracovník Ernest Rutherford roku 1911 zjistil, že se jisté malé množství alfa částic (což jsou jádra atomu helia, ve světě subatomárních částic velice těžké střely – podrobnosti opět viz [RADIOAKTIVITA](#)) odrazí od velmi tenké kovové fólie, kterou by správně měly všechny hladce projít.

Z toho usoudil, že atom musí být tvořen malým kladným elektrickým nábojem uprostřed, okolo nějž ve velké vzdálenosti obíhají Thomsonovy elektrony jako planety kolem Slunce. Odražené alfa částice byly ty, které se náhodou trefily do jader atomů kovu. Z jejich počtu se dalo odhadnout, že jádro je asi stotisíckrát menší než celý atom – jinými slovy, že atomy jsou víceméně prázdné. Že hmota je vlastně prázdnotou, přestože se nám tak nejeví. To byla radikálně odlišná představa než švestkový puding.

Měla však zásadní háček. Když je něco na stabilní kruhové dráze, pohybuje se to se zrychlením. Říká se mu dostředivé, nemění sice velikost rychlosti pohybu, ale mění směr této rychlosti. (Představte si závaží na provázku.) Když se ale se zrychlením pohybuje elektrický náboj, pak vždy

vyzařuje energii ve formě elektromagnetických vln. Díky tomu funguje například rádio, které bylo roku 1911 už v komerčním provozu – o platnosti tohoto principu se tedy nedalo pochybovat, ostatně plyne z tzv. Maxwellových rovnic, které jsou pevnou součástí klasické fyziky. A když náboj energii vyzařuje a odnikud nedoplňuje, nutně ji časem ztratí (z výpočtů vycházelo, že „časem“ znamená téměř okamžitě). Elektron tedy nezůstane na kruhové dráze, ale po spirále vlétne do jádra. Atom „přestane fungovat“. Nic takového ovšem nikdo nepozoroval. Bylo jasné, že je tu něco zásadního špatně. Rutherfordova představa atomu byla neudržitelná. První, kdo to dobře věděl, byl sám Rutherford. Trval však na tom, že stopa je správná a že se po ní má jít dál.

Spektrální čáry

Odpověď nabídl roku 1913 Niels Bohr. Dnes víme, že byla víceméně správná (až na spoustu důležitých detailů), jenže ve své době byla tak nepřesvědčivá, že i sám Bohr připouštěl, že jí vlastně nerozumí. Vlastně to ani pořádná odpověď nebyla. Bohr totiž řekl v podstatě toto: elektrony se kolem jádra atomu nepohybují po libovolných drahách, ale jen po přesně vymezených. A vlastností těchto vymezených drah je to, že se na nich žádná energie nevyzařuje. Jsou prostě už takové.

Proč by měla existovat dráha s takovou nevysvětlitelnou vlastností? Bohr otevřeně připouštěl, že jde jen o divoký odhad postavený na analogii s jinou fyzikální hypotézou: Planckovým vysvětlením záření černého tělesa (viz [KVANTUM](#)). Existoval ovšem důvod, proč brát jeho nápad vážně: dala se jím vysvětlit jiná experimentální záhada, problém atomových spekter.

Když rozložíte hranolem světlo, dostanete jeho barevné složení neboli spektrum (viz [ASTAT](#)). Každému chemickému prvku odpovídá jiná specifická sestava barev neboli spektrálních čar (tak třeba hořící vodík ukáže tři proužky: červený, modrozelený a fialový). Dalo se to použít pro chemickou analýzu, a dokonce se dalo zjistit chemické složení hvězd z jejich světla. Nikdo však nevěděl, proč má každý prvek jiné spektrum, nikdo nevěděl, čím se rozložení čar řídí.

Bohra napadlo, že by čáry ve spektru mohly odpovídat elektronovým drahám. Přesněji řečeno, ne jim samotným, ale vzdálenostem mezi nimi. Elektron na každé z Bohrových drah má jinou energii. Může spadnout z vyšší dráhy na nižší a vydat přitom energii úměrnou velikosti přeskočků: tu pak uvidíme jako jednu z čar spektra. Kolik možností přeskočků, tolik spektrálních čar.

Takhle Bohr předpověděl, kde hledat další, dosud nepozorované spektrální čáry – nepozorované byly proto, že nespádaly do viditelného světla, ale do ultrafialové či infračervené oblasti. Měření ukázala, že ty čáry jsou přesně tam, kde podle Bohra být mají.

To znamenalo, že na Bohrově modelu atomu musí něco být. Přesto nedával smysl, protože neřešil hlavní otázku: co je na těch drahách tak speciálního, že se jich elektron drží? Proč na nich neztrácí energii (jen při přeskoku!), když by ji podle všeho, co je známo o elektríně, ztrácet měl? Kromě toho dovedl Bohr takto popsat jen atom nejjednoduššího prvku, vodíku, protože ten má jen jeden elektron. Pro víc elektronů jeho výpočty nefungovaly. Shoda s naměřenými spektry však nemohla být dílem náhody.

Atomové orbitaly

Rozumět přírodním vědám velmi často znamená napřed si něco umět představit (kvůli pochopení principu) – a pak tu představu odhodit. „Musí takříkajíc odhodit žebřík poté, co po něm vystoupil nahoru,“ [napsal Ludwig Wittgenstein](#). Mystika? Ani ne. Někteří lidé shledávají toto jeho konstatování sice přesným, leč banálním – popisuje jejich každodenní práci.

Během dalších let byl Bohrov model dopracován, úspěšně zobecněn na jiné prvky než na vodík – a pak opuštěn, přesně jako ten Wittgensteinův žebřík, po němž fyzikové vystoupali a pak jej odhodili. I když to není docela přesné: žebřík tentokrát zůstal k dispozici nespecialistům a dál se používá (bohužel včetně těžkopádné a nesystematické terminologie, vzniklé historicky).

V nejčastěji používané podobě teď Bohrov model atomu vypadá takto: jádro atomu se skládá z protonů a neutronů. Kolem něj se pohybují elektrony po drahách, které nejsou kruhové a přesně vzato to ani nejsou dráhy, spíš něco jako obláčky, kde je výskyt elektronů pravděpodobnější než jinde; tenhle aspekt věci se ale právě kvůli názornosti většinou pomijí. Správně se těm obláčkům říká orbitaly a jsou matematicky přesně definovány – jde o řešení tzv. Schrödingerovy rovnice.

Valenční elektrony

Schrödingerova rovnice (viz [SCHRÖDINGER A KOČKA](#)) s významným dodatkem, který doplnil Wolfgang Pauli – takzvaným vylučovacím principem –, umožnila vylepšit Bohrov model atomu a udělat z něj praktický nástroj. Během několika let se tak podařilo zpětně vysvětlit a zdůvodnit celou Mendělejevovu periodickou tabulku, poskytnout jasný výklad chemického chování látek, vytvořit teorii chemické vazby, vysvětlit, proč některé látky vedou elektrický proud a jiné ne – a mnoho dalšího.

Kolikátý je prvek v Mendělejevově tabulce, tolik má jeho atom elektronů (a stejné množství protonů v jádru). Elektrony zaplňují volná místa podle přesně daného výstavbového principu. (Dodnes se mu říká

Aufbauprinzip, neboť pochází z dob, kdy celá špičková fyzika mluvila hlavně německy.) Nejprve se zaplní orbital nejbliž jádru, pak další směrem ven a tak dále, jako kdybyste vytvářeli Sluneční soustavu a začali Merkurem. Každý orbital má navíc svá vlastní výstavbová pravidla.

Chemické vlastnosti prvku určují elektrony v orbitalu, který je úplně vnější, a tím pádem nebývá úplně zaplněný. Pokud si náhodou pamatujete ze školní chemie říkanky jako „1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p³“, tak to je právě ono; tohle konkrétní schéma popisuje atom fosforu, který má celkem 15 elektronů. Čte se to: v první slupce dva elektrony v orbitalu s. V druhé slupce dva elektrony v orbitalu s a šest v orbitalu p. Ve třetí slupce dva elektrony v orbitalu s a tři v orbitalu p.

Právě těch pět elektronů ve třetí slupce (říká se jim valenční) určuje chemické vlastnosti fosforu, zejména to, s kolika jinými atomy najednou může vytvořit vazbu. Názorná představa je jednoduchá: valenční elektrony jsou ty nejvíc venku, ty, které mohou nejsnáze přijít do kontaktu s jinými atomy. Tvoří něco jako sadu zástrček a zásuvek, pomocí nichž se atomy mohou propojovat.

Máte-li středoškolskou chemii úspěšně za sebou a nezabýváte-li se fyzikou či chemií profesionálně, můžete v klidu zapomenout na valenční elektrony, Aufbauprinzip a orbitály. Naproti tomu znát dvojznačnost Bohrova modelu není k zahzení. Na jednu stranu je úplně špatný, protože atom nevypadá tak, jak ho Bohr popisuje. Atom totiž nevypadá nijak, názorně se popsat nedá. Na druhou stranu je Bohrov model velmi dobrý jako konceptuální schéma – umožňuje vysvětlit a předvídat hodně důležitých vlastností atomu. U objektu, který se vymyká názorné představě, koneckonců nic lepšího než konceptuální schéma mít nemůžeme! Tenhle aspekt věci však ve školní výuce bohužel často zaniká. Už proto, že mluvit v souvislosti se školou o lžích-dětem si nikdo netroufne. Možná je to škoda.

Contraria sunt complementa

Niels Bohr (1885–1962) byl jednou z klíčových postav moderní fyziky, a to jednak jako tvůrce, teoretik; jednak jako organizátor a učitel. Jeho nejproslulejším žákem byl Werner Heisenberg, ale Bohrovým ústavem v Kodani prošla v podstatě celá jedna generace, tvůrci tzv. Knabenphysik (klukovská fyzika – původně výsměšný pojem narážející na to, že protagonistům převratu ve fyzice, jenž nastal po první světové válce, bylo jen málo přes dvacet).

Bohr měl pro „kluky“ pochopení a svou autoritou jim vytvářel zázemí, i když oni se k němu často chovali neuctivě. Dnes by na tom nebylo nic divného, v roce 1920 to bylo radikální pohrdání usedlou profesorskou tradicí.

Ze spolupráce Bohra s jeho žáky, hlavně s Heisenbergem, vzešla takzvaná kodaňská interpretace kvantové fyziky (viz [HEISENBERGŮV](#)

PRINCIP NEURČITOSTI).

Po německé okupaci Dánska, k níž došlo v dubnu 1940, Bohr, ač poloviční Žid, dál vědecky pracoval, protože místní úřady vyvíjely proti Němcům i v rámci okupačního režimu tichý odpor. Jeho postavení bylo ovšem nejisté a možnosti omezené. Nakonec se svou ženou Margrethe koncem září 1943 emigroval na malém člunu přes Øresund do Švédska, kde se hned dalšího dne setkal s králem, od nějž o jednadvacet let dříve přebíral Nobelovu cenu, a požádal ho, aby dal veřejně najevo, že je Švédsko ochotno přijmout nejen slavného Bohra, ale všechny dánské Židy. Gustav V. to skutečně o dva dny později učinil a krátce poté emigrovalo všech sedm tisíc dánských Židů.

Přes Británii se pak Bohr dostal do USA, kde se stal spolupracovníkem projektu Manhattan, tedy vývoje jaderných zbraní. V Los Alamos nepobýval trvale, ale jezdil tam na návštěvy a podle Roberta Oppenheimera, vědeckého šéfa projektu, pomohl rozluštit přinejmenším jednu hádanku, se kterou si ostatní nevěděli rady. Bohr sám řekl, že vědci v Los Alamos jeho pomoc nepotřebovali, čímž se nezříkal odpovědnosti. Jen byl skromný a zdvořilý jako vždy.

Po válce se ještě významně zasloužil o vznik ženevského CERN, hlavního evropského centra fyzikálního výzkumu. Od dánského krále Frederika IX. dostal v roce 1947 Řád slona, nejvyšší státní vyznamenání, normálně vyhrazené jen členům královské rodiny. Rovnálo se to povýšení do šlechtického stavu a Bohrovi nezbylo nic jiného než si navrhnout vlastní erb. Zvolil pro něj čínský symbol jin-jang a heslo *Contraria sunt complementa*, „opaky se doplňují“.

Crispr

Molekula DNA se dá stříhat a lepit. Tak lze upravit genom organismu.



Všechno, [co je na Zemi živé](#), je založeno na stejném principu: předpis, jak rostlina či zvíře vypadají a fungují, je zapsán v každé jejich buňce ve formě molekul DNA – kyseliny deoxyribonukleové. (V každé až na výjimky, jak už to tak bývá; hlavní výjimkou jsou červené krvinky. Nemají jádro, a proto nemají ani jadernou DNA. Je to však výjimka dost podstatná, čtyři z pěti buněk vašeho těla jsou právě červené krvinky. Přesto zůstávají výjimkou; jsou jen jedním z mnoha druhů buněk.)

Tomuto předpisu se říká genom. Genetický kód používá čtyři písmena (ve stejném smyslu, v jakém počítačový kód používá „písmena“ dvě, jedničku a nulu), jimž fyzicky odpovídají čtyři různé jednoduché sloučeniny, báze, které se jedna po druhé vážou na základní kostru molekuly DNA – kyseliny deoxyribonukleové. Bázím navázaným na kostru se říká nukleotidy, dva k sobě přiléhající řetězce nukleotidů se stáčí do tvaru známé dvojité šroubovice.

Strukturu DNA poprvé popsali Francis Crick a James Watson roku 1953. Získali za to nehybnou slávu a (spolu s Mauricem Wilkinsem) Nobelovu cenu, na rozdíl od několika jejich spolupracovníků, kteří by si jedno i druhé zasloužili rovněž. Nejčastěji se v této souvislosti objevuje jméno Rosalind Franklinové, která však zemřela v osmatřiceti letech na rakovinu, čtyři roky předtím, než si trojice uznaných objevitelů jela pro medaile do Stockholmu.

Roku 1957 formuloval Francis Crick tzv. centrální dogma molekulární biologie. V dnešní podobě zní takto: z molekuly DNA se v jádru buňky procesem zvaným transkripce vytváří podobná molekula zvaná RNA. Ta pak jádro opustí a jiným procesem zvaným translace se z ní syntetizuje zcela odlišná velká molekula – protein. (A dnes také víme, že toto dogma, jako ostatně mnohá jiná dogmata, má řadu výjimek.)

Proteiny (neboli bílkoviny) jsou jednou z hlavních stavebních látek živých organismů. Na biochemické úrovni uskutečňují skoro všechno, co ten který organismus dělá. Každý typ proteinu je specializovaný biochemický nástroj (některým z nich se říká enzymy – ty katalyzují různé biochemické reakce). Jejich souhra podmiňuje trávení, dýchání, pohyb, imunitu a tak dále. Bílkoviny jsou, stejně jako DNA, dlouhé řetězce poskládané do složitých trojrozměrných struktur, jejich stavebním dílkům se říká aminokyseliny.

Máme tedy před očima mechanismus, na jehož počátku je DNA, meziproduktem je RNA a konečným produktem nějaký konkrétní protein. Informace z DNA řídí fungování organismu tím, že se podle ní neustále syntetizují bílkoviny.

Písmeny genetického kódu jsou A, C, G a T, protože příslušné jednoduché molekuly (báze) se jmenují adenin, cytosin, guanin a thymin. Dvojitou šroubovici drží báze pohromadě tím, že se mezi sebou napříč propojují slabou vazbou zvanou vodíkový můstek: A proti T, C proti G. Obě vlákna tak nesou vzájemně provázanou informaci, pořadí nukleotidů v jednom z nich je pevně dáno pořadí v druhém. Toho buňka využívá při kopírování genetické informace – dvoušroubovice se rozplete

a ke každému z vláken se syntetizuje odpovídající protějšek. Obdobně se podle DNA tvoří RNA.

Jedna molekula DNA obsahuje předpisy na tvorbu mnoha různých proteinů. Řetězec RNA bývá mnohem kratší, je přepisem konkrétního úseku DNA odpovídajícího jednomu proteinu. RNA se dále od DNA liší tím, že je reaktivnější, „čilejší“; že je tvořena jedním vláknem, jedinou šroubovicí, namísto dvou; a že namísto thyminu obsahuje jinou bázi zvanou uracil, tedy kódové písmeno U. Dále je dobré dodat, že existuje více druhů RNA plnicích v buňce různé specializované funkce. Ta, kterou jsme si zatím popsali, se správně jmenuje mRNA (m jako messenger, poslíček).

Tajemství genetického kódu spočívá v tom, že trojice nukleotidů v RNA odpovídá jedné konkrétní aminokyselině v proteinu. Opačně to neplatí: jednu aminokyselinu může kódovat více trojic (neboli kodonů). Genetický kód je tedy, jak velmi pěkně říkají informatici, degenerovaný. Nechtějí tím říci nic horšího než to, že více různých kodonů má týž význam.

Ze čtyř písmen sestavíte – když záleží na pořadí a písmena se mohou opakovat – 64 různých trojic. Živé organismy na Zemi staví své proteiny z 23 aminokyselin (z nichž tři jsou výstřední, skoro pro všechny účely si život vystačí s dvaceti). Některým aminokyselinám odpovídá šest různých kodonů, v jednom případě dokonce sedm, jiným méně. Existují také dva speciální kodony pro začátek a konec transkripce.

Rozluštění kódu trvalo poměrně dlouho mimo jiné proto, že vědci hledali nějakou matematickou eleganci, uspořádanost. Žádná tam však není. Žádný inženýr by takovýhle kód nenavrhl. Tato nesystematická podoba kódu je v podstatě silným argumentem pro darwinovský přirozený výběr, který postupuje naslepo, neplánuje, jen nahodile pozměňuje – co přežije, to se osvědčilo. Úseku DNA kódujícímu některou bílkovinu se dřív říkávalo gen. Dnes se toto slovo používá v mírně odlišném významu.

Gen je pro současnou molekulární biologii takový úsek DNA nebo RNA, který má nějakou funkci. Rozdíl spočívá v tom, že touto funkcí nemusí být vždy jen syntéza bílkoviny; v tom, že mnohé kódující úseky se částečně překrývají; a v tom, že týž úsek může podle způsobu dalšího zpracování vést k různým výsledkům. Rovnítko jeden gen – jedna bílkovina tedy neplatí, ale pro velice hrubou představu může nadále sloužit.

Zdaleka ne celou molekulu DNA tvoří geny. Naopak, jsou v menšině. Lidská DNA obsahuje asi 3,2 miliardy bází a jen 3 % z toho slouží ke kódování proteinů. Co dělá ten zbytek? Něco z něj plní speciální úkoly, hlavně při syntéze RNA, při regulaci genové aktivity, nebo se podílí na prostorovém uspořádání DNA v chromozomech, pro velkou část však odpověď zní: „Nevíme, nejspíš nic, ale proboha, radši na to nesahejte.“ Opět je nutné připomenout, že přirozený výběr není inženýr (viz [EVOLUCE](#)). V DNA je obtisknuta historie vývoje života od jeho nejdávnějších a nejprimitivnějších forem. Během té doby podléhala nesčetným změnám a mutacím.

Kompletní genetické informace jednoho konkrétního organismu se říká genom. V sedmdesátých letech začali vědci se sekvenováním genomů, tedy rozluštěním pořadí zmíněných čtyř písmen pro jednotlivé organismy. Od devadesátých let jsou k dispozici přístroje – stále dokonalejší –, které udělaly ze sekvenování víceméně průmyslovou disciplínu, vysoce automatizovanou.

Počet písmen v genomu je v každém organismu jiný a neplatí žádné jednoduché pravidlo typu složitější organismus – větší genom. Včela má v genomu 236 milionů písmen, topol 480 milionů, viry zpravidla několik tisíc, bakterie několik milionů, člověk (jak jsme již řekli) 3,2 miliardy, pšenice 17 miliard a jedna podivná sladkovodní ryba z Afriky 133 miliard.

Přečtení genomu je pořád jen pořadí písmen, nic víc. Neznamená, že detailně chápeme, jak organismus funguje. A už vůbec ne, že ho hned umíme modifikovat a vylepšovat. Získáme sice čitelný zápis, ale ten je pořád v nesrozumitelném jazyce, z něž známe zatím jen některá slova a fráze. Kromě toho si nejsme jisti gramatikou a většinou nevíme, jak se význam slov mění podle kontextu. Přesný přepis je nicméně základním předpokladem k tomu, aby se tyto záhady mohly začít doopravdy luštit.

Tím se konečně dostáváme k významu zkratky CRISPR.

Při analýze genomu hodně jednoduchých organismů, zejména bakterií, se objevily speciální sekvence nazvané CRISPR, v podstatě součást imunitního systému. V kombinaci s enzymem (specializovanou bílkovinou) zvaným Cas9 se dají použít jako nůžky na DNA. Systém CRISPR-Cas9 se dá uměle naprogramovat, aby přerušil molekulu DNA libovolného organismu přesně v místě, které předepíše experimentátor. Rozstříhaná DNA se dá opět „slepit“. Tak lze do DNA cíleně zasahovat: vyřazovat geny z provozu (a tím zkoumat jejich funkci) nebo je kontrolovaně upravovat, a tím buď napodobovat přirozené mutace, nebo vytvářet genetické varianty, které se přirozeně nevyskytují. Hlavními objevitelkami tohoto principu jsou – zpočátku nezávisle na sobě, později ve vzájemné spolupráci – [Američanka Jennifer Doudnaová a Francouzka Emmanuelle Charpentierová](#).

I z metody CRISPR se dnes stalo průmyslové odvětví, a to bleskurychle – během několika let. Oprava genetické informace v buňkách živých organismů dává velkou naději hlavně při léčbě dědičných chorob, kde je genom poškozen od narození. Stejnou techniku použil také Che Tien-kchuej při „výrobě“ neblaze proslulých čínských geneticky modifikovaných dětí, čímž [překročil dnešní hranice lékařské etiky](#).

Jak se taková oprava dá provést? Jednou z technik je odstranit z izolované buňky její DNA a nahradit ji modifikovanou molekulou. Buňka se pak začne množit a tím šířit pozměněnou genetickou informaci. To se dá zatím uskutečnit hlavně u velmi jednoduchých organismů s malou DNA, téměř výhradně bakterií. Druhá metoda spočívá v naprogramování jinak neškodného viru, který pak cílový organismus „nakazí“.

CRISPR není zdaleka první technikou genové manipulace. Je však účinnější a přesnější než cokoli, co mu předcházelo – hodinářský

šroubovák namísto zatloukání šroubů kilovým kladivem.

Černá díra

Když se gravitace utrhne ze řetězu, vytvoří objekt, kterému pořád ještě příliš nerozumíme.

Nejvíce černých děr najdeme ve sci-fi, kde jsou vítanou rekvizitou umožňující dramatické scény a velmi často také cesty do paralelních vesmírů či do vzdálených oblastí vesmíru našeho. Nic z toho fyzika nepotvrzuje; podle toho, co zatím víme, je černá díra konečná stanice, nikoli přestupní. Cesta z ní nevede nikam. Skutečná věda však může být přinejmenším stejně tajemná a romantická jako sci-fi, jen poněkud obtížnější.

„Černé díry jsou místa, kde Bůh dělil nulou,“ zní otřepaný bonmot připisovaný kdekomu. Jeho skutečným autorem pravděpodobně je americký komik Steven Wright. Je to mnohem výstižnější charakteristika než snění o průchodech do jiných vesmírů, ale aby ji člověk ocenil, musí mít aspoň nepatrnou představu o Einsteinově modelu vesmíru (viz [RELATIVITA](#)).

Životopis hvězdy

Hvězdy jsou hodně velké, tím je třeba začít. Naše Slunce patří k nejběžnějším, tedy menším hvězdám, ale pořád je to koule o průměru 109× větším než Země. Naše planeta je vedle Slunce jako špendlíková hlavička vedle kopacího míče. A pokud jde o hmotnost, jako pětikoruna vedle průměrného osobního auta.

A hodně velký objekt se chová jinak než malý. Díky své hmotnosti má Slunce velikou gravitaci. Ta ho drží pohromadě, protože vnitřní tlak plynu se ho naopak snaží roztrhnout. Existence hvězdy závisí na rovnováze dvou sil: gravitace působící směrem ke středu a opačně směřujícího tlaku vodíku, který se nukleární fúzí neustále mění na helium a uvolňuje přitom energii (viz [FÚZE](#)).

Jenže zásoba vodíku, ač velká, není nekonečná. Jak vodíku ubývá, intenzita fúze klesá a gravitace začne mít navrch. Hvězda se začne zmenšovat a její hustota roste.

Co se stane dál, to záleží na velikosti hvězdy. Je-li velká zhruba jako Slunce, pak její smršťování napřed [zapálí zbylý vodík](#) z povrchové vrstvy. Ten dosud nehořel, protože nebyl dost horký. Teplota však při smršťování objemu roste, takže se spustí nová fúze, tlak překoná gravitaci a hvězda se dočasně rozepne do velikosti tzv. rudého obra.

Rozpínání našeho Slunce začne asi za miliardu let. Na Zemi zanikne veškerý život a posléze i planeta sama, protože okraj hvězdy dosáhne k její oběžné dráze. Po nějaké době (která se počítá na další miliardy let) dojde Slunci vodík definitivně, poté spálí i helium a pak se začne smršťovat do podoby tzv. bílého trpaslíka. To je objekt zhruba o velikosti Země, ve kterém už žádná fúze neprobíhá, vyzařuje už jen díky nahromaděné tepelné energii. Po čase zhasne.

S hvězdou větší než Slunce je to podobné, jen bouřlivější. Její stadium červeného obra neskončí spálením helia – reakce je dost intenzivní na to,

aby postupně zapalovala i „popel“, tedy prvky zbylé po fúzi heliových jader. Hvězda se stane chemickým kotlem, v němž vznikají těžší a těžší chemické prvky až po železo. Jádro atomu železa je nejstabilnější v celé periodické tabulce a fúze se u něj zastaví, jádro hvězdy se prudce zhroutí a mohutně vybuchne. Na obloze se tak na krátkou dobu – opravdu jen několik měsíců či let – rozzáří supernova, až milionkrát jasnější než původní hvězda. Trvalým pozůstatkem výbuchu je tzv. neutronová hvězda, nezářící objekt zhruba o hmotnosti Slunce, ale o průměru nějakých dvacet kilometrů.

Malá těžká tělesa

Jenže hmota může mít ještě větší hustotu, i když už dávno nejde o hmotu v běžném slova smyslu – neutronová hvězda je zhruba něco jako jediné obří jádro atomu.

Podle Newtonova zákona je gravitační síla tělesa (viz [GRAVITACE](#)) přímo úměrná jeho hmotnosti a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti od jeho středu. To znamená, že kdyby naše Země zhoustla tak, že by měla poloviční průměr, byla by přitažlivá síla na povrchu čtyřnásobná. Malá těžká tělesa mají obrovskou přitažlivost proto, že se můžete dostat velmi blízko k jejich středu.

Dobře se to dá popsat pomocí únikové rychlosti. Té musíte dosáhnout, abyste opustili okolí nebeského tělesa – nepadli zpět ani nezůstali na oběžné dráze. Úniková rychlost Země činí 11,2 km/s neboli 40 000 km/h. Takové rychlosti bude muset dosáhnout kosmická loď směřující k Marsu. Úniková rychlost z povrchu Slunce je 617 km/s. Bílý trpaslík bude mít únikovou rychlost asi 6500 km/s neboli 2 % rychlosti světla a u neutronové hvězdy to bude 80 % rychlosti světla.

Když dohoří hvězda s hmotností větší než dvacet Sluncí, nezastaví se její kolaps ve stadiu neutronové hvězdy. Pokračuje dál za hranice názorné představy do podoby tzv. singularity. Ta kolem sebe vytvoří černou díru – oblast s únikovou rychlostí větší než rychlost světla. Tím pádem ji nemůže opustit ani světelný paprsek.

Už je můžeme pozorovat

Albert Einstein ve své snaze o postihnutí podstaty vesmíru dospěl v roce 1915 k obecné teorii relativity. Z té plyne, že gravitace je totéž co zakřivení prostoročasu (viz [RELATIVITA](#)), čtyřrozměrné soustavy souřadnic, jimiž se dá popsat svět, v němž žijeme. V blízkosti velké hmoty, například hvězdy, se deformuje jak prostor (a přitahuje objekty, jako by se kulička koulela do jámy), tak čas (který běží pomaleji). Takový obrázek

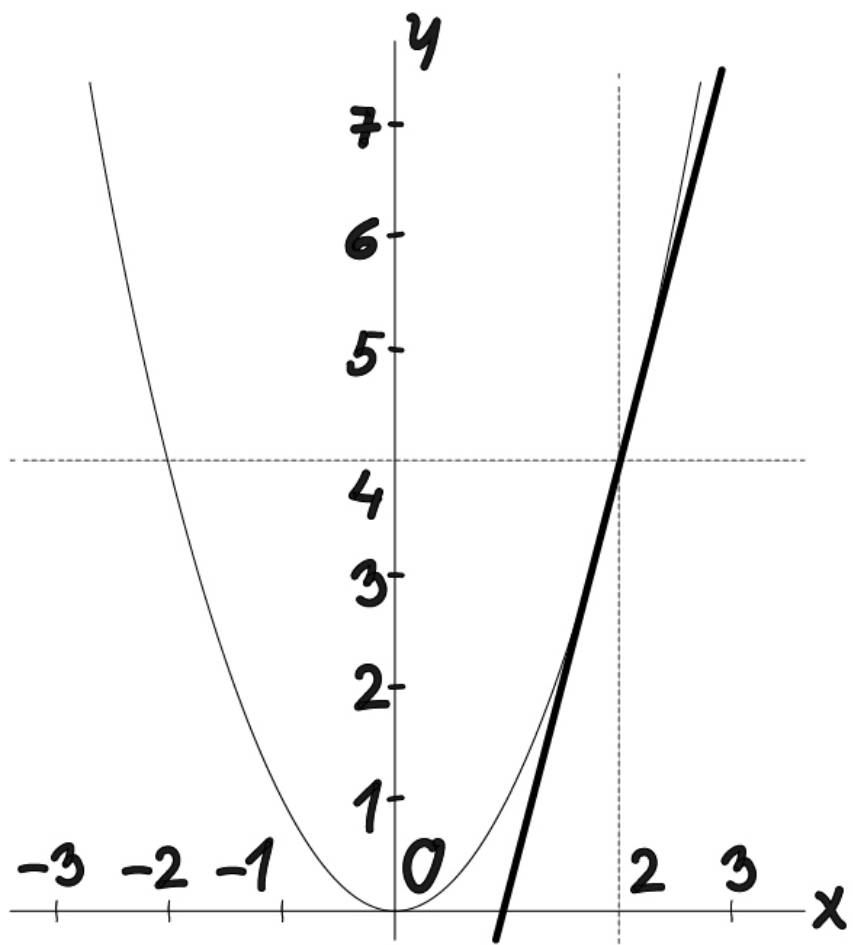
vesmíru se vymyká naší každodenní zkušenosti, ale je prokazatelně správný – teorie od svého vzniku prošla různými experimentálními testy.

Einsteinův současník [Karl Schwarzschild](#) spočítal podle Einsteinových rovnic vlastnosti a důsledky singularity – místa, kde zakřivení prostoru dosahuje nekonečné hodnoty. Odvodil z nich, že velikost černé díry závisí jen na její hmotnosti. Této velikosti se říká Schwarzschildův poloměr. Pro objekt o hmotnosti Slunce by činil asi 3 kilometry.

Schwarzschildova černá díra je matematicky nutným důsledkem obecné teorie relativity, Einstein však neměl tuto představu rád. Rozpačití byli i mnozí další. Myšlenky se ujal zejména [Stephen Hawking](#), který teorii černých děr značně rozpracoval. S jeho jménem je spojena predikce tepelného záření černé díry. Neboli: černá díra, která nezvětšuje svou hmotnost (tím, že občas pohltí nějaký objekt), se postupně vypaří. S touto teorií je spjata řada problémů týkajících se entropie (viz [samostatné heslo](#)) a termodynamických zákonů.

Derivace

Když se něco mění kolísající rychlostí, jak rychle se to mění právě teď?



Existuje několik matematicky korektních způsobů, jak vysvětlit derivaci funkce. Žádný z nich nespĺňuje najednou obě podmínky, jež bychom splnit potřebovali, aby totiž byl schůdný pro laiky a zároveň stručný. Použijeme proto metodu lži-dětem (viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#)), ovšem komentovanou tak, abyste věděli, kde přesně jde o nezbytnou lež.

Začít musíme tím, co se vůbec v matematice rozumí pojmem funkce. A opět budeme nepřesní. [Přibližná definice](#) zní: funkce je pravidlo, které číslu přiřadí jiné číslo.

Kreslíme parabolu

Vezměme si jako příklad funkci $y = x^2$. Pro $x = 1$ bude y také 1. Pro $x = 2$ bude $y = 4$. Pro $x = 3$ je $y = 9$. Pro $x = -7,34$ bude $y = 53,8756$ (ověřte si to na kalkulačce). Pro $x = 0$ je $y = 0$. Ať si vymyslím jakékoli x , umím k němu spočítat y . Funkce $y = x^2$ je pravidlo, které každému x přiřadí jeho příslušné y .

Mimochodem, tohle není vlastnost každé funkce. Hodnotu funkce $y = 1/x$ nelze spočítat pro $x = 0$. Hodnotu funkce $y = \sqrt{x}$ nemůžeme spočítat pro záporná x . Rozsahu hodnot x , pro které se dá vypočítat y , se ve škole, jak si možná vzpomenete, říká definiční obor funkce.

K běžným matematickým funkcím patří vedle mocnin (polynomů), jako je $y = x^2$, také sinus, kosinus, tangens, logaritmus či exponenciála.

Používání písmen x a y ve významu, který jsme zde zavedli, je běžná konvence, přesněji se však pro x používá název argument funkce (neboli nezávisle proměnná), pro y funkční hodnota (neboli závisle proměnná).

Když všechny funkční hodnoty nakreslíme, dostaneme graf funkce. V případě $y = x^2$ uvidíte plynulou křivku, jejíž tvar vám bude jistě povědomý. Říká se jí parabola.

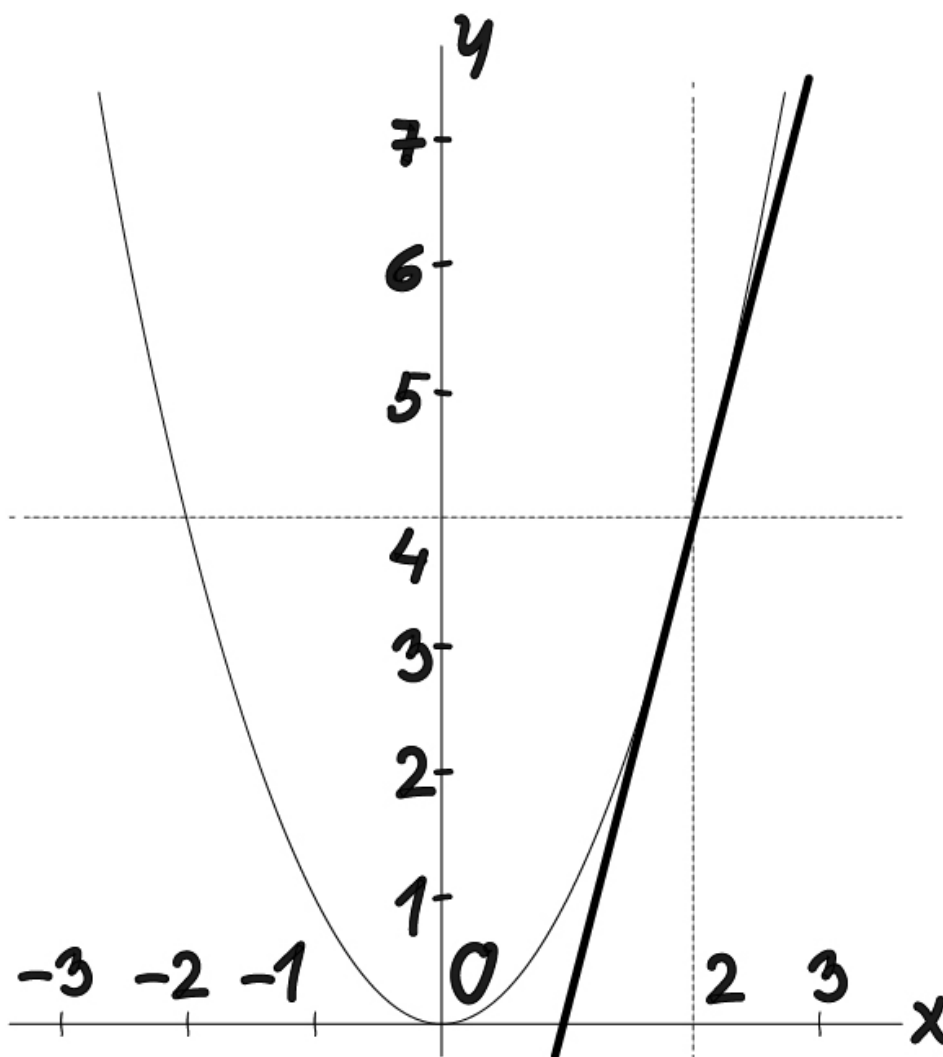
Kreslíme k ní tečnu

Představte si, že parabola je silnice zakreslená na mapě. Představte si, že řídíte auto, které má po parabole projet zleva doprava, od záporných hodnot x po kladné. Po celou dobu pojedete levotočivou zatáčkou. Její zakřivení se bude měnit: napřed bude mírná, pak začne být ostřejší, v blízkosti nuly se najednou skoro otočíte a pak se zas bude zatáčka narovnávat. (Úplně se nenarovná nikdy.)

Pořád tedy budete muset otáčet volantem. Pořád budete měnit směr. Kdybyste měli na palubní desce kompas, bude se taky pořád pootáčet.

Zajímavá otázka zní: dá se nějak určit, jakým směrem jedete v tom kterém okamžiku?

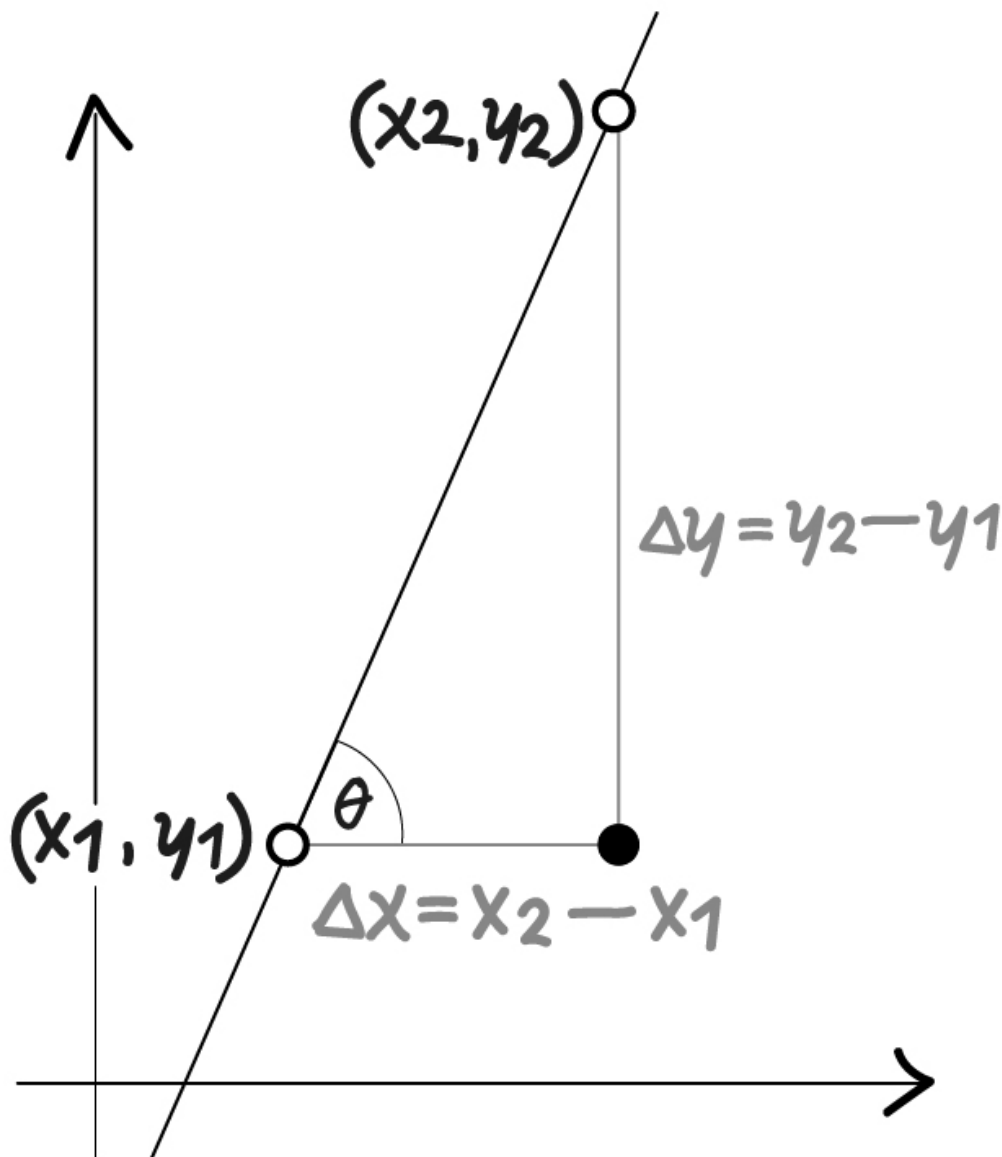
V geometrii se používá pojem tečna křivky. Tečna (anglicky se jí říká tangent, což vám nesdělují bezdůvodně) je přímka, která se dotýká křivky v jednom jediném bodě. Přestože to nemusí být patrné na první pohled, v každém bodě kterékoli křivky existuje jen jedna tečna.



Můžete ji namalovat jen pod jedním sklonem. Jakmile ji nepatrně pootočíte, buď se od křivky odlepí, anebo ji naopak protne ve dvou bodech (čímž se z tečny stane sečna). Opakuji, tohle se vám nemusí zdát věrohodné, protože při našem nepřesném kreslení klidně namalujete zdánlivých tečen jedním bodem několik, ale věřte mi, že pravá je jen ta jedna. A právě ta udává, kterým směrem jedete v tom kterém okamžiku.

Směrnice neboli tangens

Každá přímka zakreslená v souřadné soustavě má nějaký směr, svírá se souřadnicemi nějaký úhel. Úhel můžeme měřit všelijak. Jedna možnost je použít úhloměr. Matematici však dávají přednost jiným způsobům měření úhlu. Například pomocí poměru stran pravoúhlého trojúhelníku. Dělá se to tak, že pod přímkou takový trojúhelník namalujeme. Kde přesně a jak velký? To je jedno, stejně dobře nám poslouží jakýkoli, protože všechny jsou v jistém smyslu stejné. Podíváme se, jak dlouhé jsou ty jeho strany, které svírají pravý úhel. Můžeme je označit jako Δx (čti: delta x) a Δy , což je celkem přirozený nápad, protože jde o délku úseků na osách x a y. Znakem Δ se v matematice často označuje změna, přírůstek, rozdíl dvou hodnot.



Je jasné, že oba úseky souvisejí s úhlem θ . Když se úhel θ zvětšuje, zvětšuje se Δy a zmenšuje Δx . Protože jsme se nedohodli, jak velký pravoúhlý trojúhelník použijeme, nedá se k měření úhlu θ použít samotné Δx nebo Δy . Když ale dáme tahle dvě čísla do poměru, tedy napíšeme $\Delta y / \Delta x$, pak už je to jednoznačné. Dostaneme číslo, které se pro

nulový úhel rovná nule, pro devadesátistupňový úhel není definováno (lidově: „uteče do nekonečna“, ale tak to říkat nesmíme, protože $\Delta x = 0$ a dělit nulou je zakázáno!) a může dobře sloužit jako způsob měření úhlu θ .

Číslo $\Delta y/\Delta x$ je natolik významné, že má hned dva názvy. Říká se mu jednak směrnice přímky, jednak tangens úhlu θ . (Jak že se to anglicky a podobně též latinsky jmenuje tečna?) Ze základní školy si možná pamatujete: tangens je poměr protilehlé odvěsny ku přilehlé. To je přesně ono. Protilehlou odvěsnou úhlu θ je Δy , jeho přilehlou odvěsnou Δx .

Skok přes propast

Vraťme se tam, kde jsme přerušili vyprávění o tečně: každá křivka má v kterémkoli svém bodě jedinou tečnu. Tečna je přímka. Jako každá jiná přímka má svou směrnici.

Směrnici tečny budeme teď říkat „derivace křivky v bodě“. Prozatím to je jen slovo, další název pro stejnou věc.

Uměli bychom takovou směrnici, tedy derivaci, vypočítat pro nějakou běžnou křivku? Zkusíme opět parabolu, tedy funkci $y = x^2$.

Začneme tím, že si nakreslíme „tečnu od oka“: přímku, která parabolu protne ve dvou bodech. Tečně se podobá, ale tečna to není. Záměrně, protože potřebujeme ty dva body vzdálené od sebe o malý kousek. Změříme ten kousek na ose x a nazveme ho h .

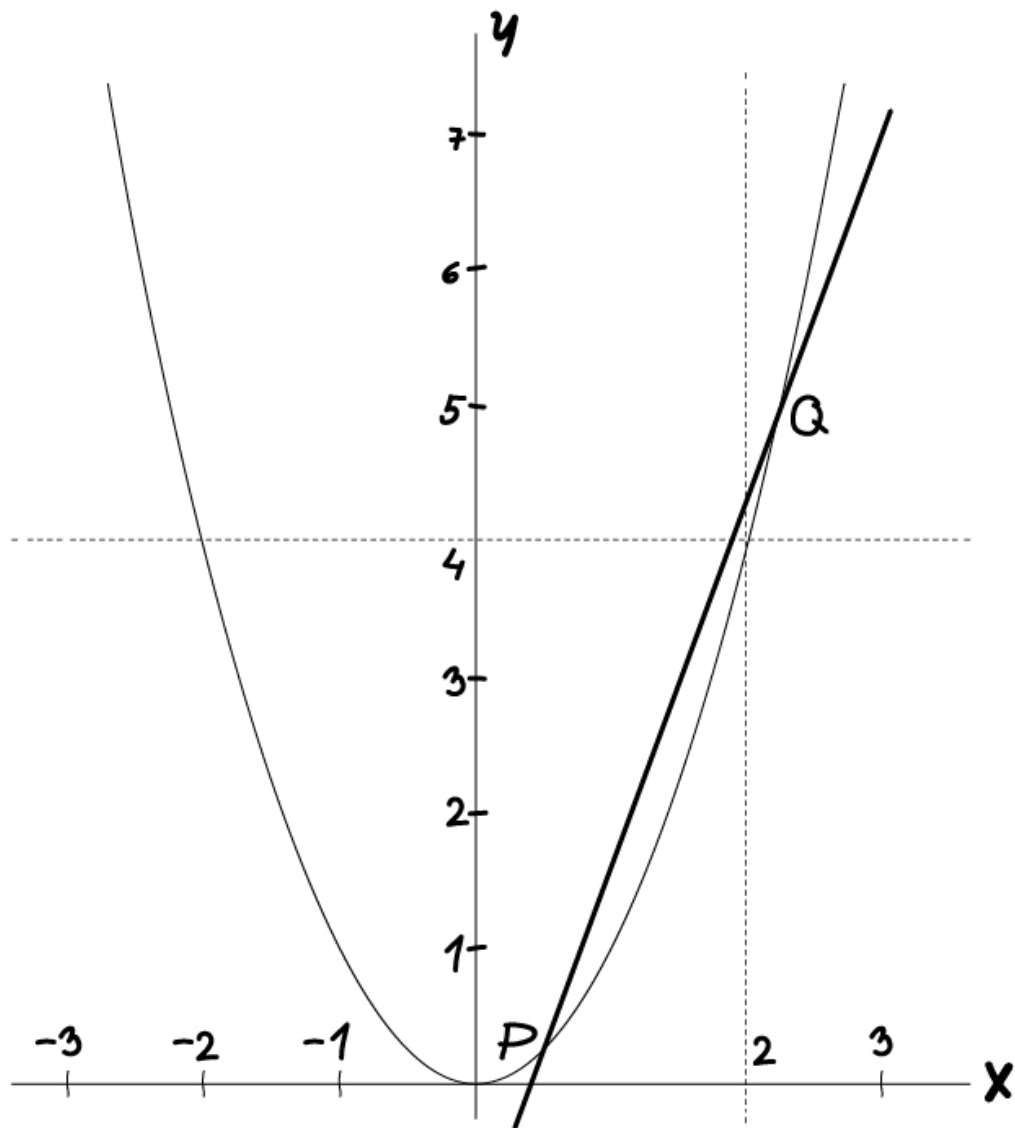
V prvním bodě – označíme ho P – bude mít vodorovná souřadnice hodnotu x a svislá tím pádem hodnotu x^2 . Vodorovná souřadnice druhého bodu, řekněme mu Q , je $x + h$, svislá $(x + h)^2$.

Z toho se dá spočítat směrnice přímky postupem, který jsme si ukázali před chvílí. Vydělíme přírůstek na ose x přírůstkem na ose y .

Tenhle zápis je pro dějiny matematiky náramně důležitý, hlavně kvůli dvěma posledním krokům. Předposlední obsahuje lákavou, ale nebezpečnou úvahu: když je h hodně malé, bude h^2 ještě o hodně menší, a proto ho zanedbáme. (Například $0,01^2 = 0,0001$.) Když je h hodně malé, platí taky, že body P a Q skoro splývají, a tím pádem se ze sečny skoro stane tečna.

$$\frac{(x+h)^2 - x^2}{x+h-x} = \frac{x^2 + 2hx + h^2 - x^2}{h} = \frac{2hx + h^2}{h} \approx \frac{2hx}{h} = 2x$$

Popsaným způsobem poprvé uvažovali Isaac Newton a Gottfried Leibniz v sedmdesátých letech sedmnáctého století. (Jejich spor o prioritu se dnes řeší postojem „oba současně a nezávisle na sobě“.) Podle jejich úvahy má tedy směrnice tečny paraboly v kterémkoli bodě x hodnotu skoro přesně $2x$.



Ve skutečnosti to neplatí *skoro*, ale úplně přesně. Krok od skoro k úplně byl ale pro matematiku hodně těžký a dokončili ho až Cauchy a především Weierstrass v devatenáctém století. Hlavní (zdaleka však ne jediný) problém spočíval v tom, že kdyby body P a Q opravdu splynuly, což ale definice tečny vyžaduje, pak by muselo být h nejen hodně malé, ale dokonce rovno nule. A my ho máme v čitateli i jmenovateli zlomku, z něž se vlastně stane výraz „nula lomeno nulou“. Ošidili jsme to tím, že jsme h včas vykrátili, ale to je korektní operace jen za předpokladu, že h nikdy nulové nebude. Což se nám nehodí. Proto ten myšlenkový skok přes nekonečně hlubokou propast.

Kromě toho se od Newtonových časů značně rozšířil repertoár používaných matematických funkcí. Ne všechny vnímají jako nějaké

hladké křivky. Matematici devatenáctého století rozšířili definici derivace tak, aby se dala použít i pro hodně divoké funkce. K tomu zavedli další pojmy, stejně důležité jako derivace: jsou jimi limita a spojitost. Díky nim lze přesně a nerozporně pracovat s výrazy jako „nula lomeno nulou“ (a také „nekonečno lomeno nekonečnem“, „nekonečno lomeno nulou“ a podobně).

S derivacemi se setkáme na každém kroku ve fyzice a technice, protože se tam často pracuje s pojmem rychlost změny. Když za hodinu ujedeme autem šedesát kilometrů, jeli jsme průměrnou rychlostí 60 km/h, to ale neříká nic o tom, jak se měnila okamžitá rychlost: občas jsme stáli na červenou, občas jsme jeli stovkou. Okamžitá rychlost, to, co průběžně ukazuje tachometr, je z matematického hlediska derivace vzdálenosti podle času (to „podle času“ se dodává, aby bylo hned jasné, co je nezávisle proměnná). Zrychlení auta, tedy změna rychlosti, je derivací rychlosti podle času neboli druhou derivací (derivací derivace) vzdálenosti. Kdo umí základy počítání s derivacemi, nemusí si pamatovat většinu vzorečků středoškolské fyziky, protože si je sám odvodí.

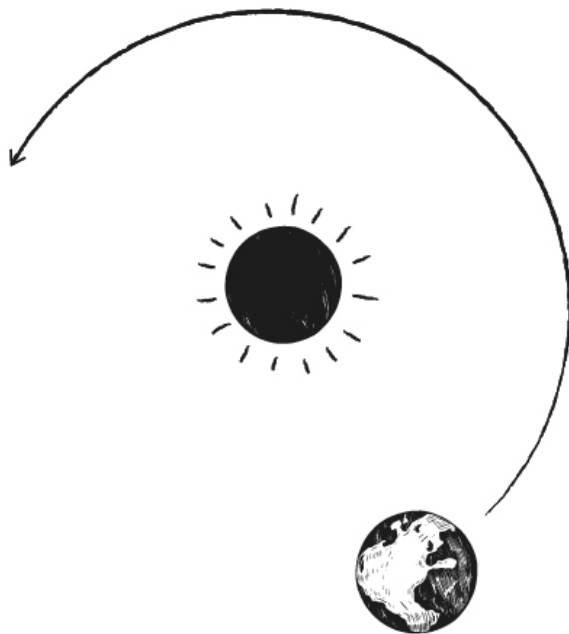
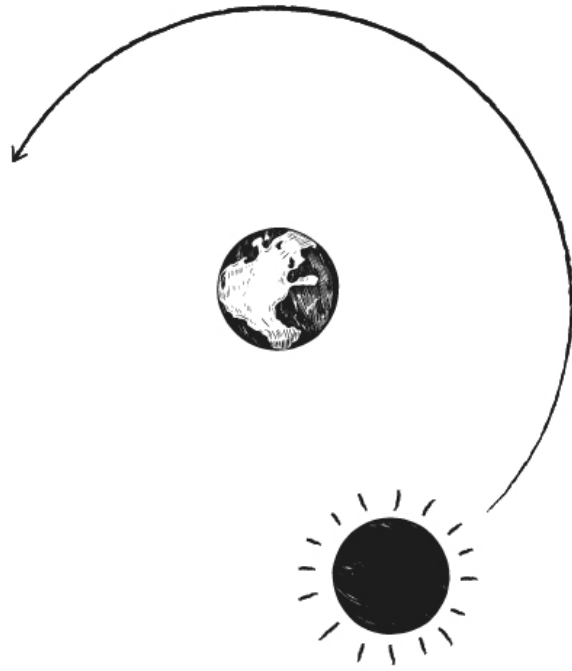
Derivace funkcí jsou užitečné při řešení tzv. diferenciálních rovnic. Matematické modely fyzikálních a technických systémů k takovým rovnicím velmi často vedou, takže je musíme umět vypočítat. Týká se to široké škály problémů od chování elektronických obvodů přes statické výpočty staveb až po dynamiku populací zvířat.

Inženýři a jiní uživatelé vyšší než středoškolské matematiky tedy s derivacemi (a integrály, což je opačná operace – viz [INTEGRÁL](#)) dost často pracují, nepotřebují se však zabývat teorií, na níž tento pojem stojí. Zato specialisté – matematici často nemají rádi detailní definice, jak je zavedli Cauchy a Weierstrass. Případají jim neohrabané; zeptejte se studenta matfyzu na „epsilon delta gymnastiku“! To byla motivace k vypracování odlišného přístupu vedoucího ke stejným výsledkům, tzv. nestandardní analýzy, v níž se dá s nekonečnými hodnotami zacházet jako s normálními čísly, ovšem za tu cenu, že se změnila sama definice pojmu číslo. Nestandardní analýzu založil v šedesátých letech Abraham Robinson, jejím průkopníkem byl významný český matematik Petr Vopěnka. Zatím se příliš neprosadila i přes zjevné výhody ve výuce.

Pro počítání s derivacemi a příbuznými pojmy – integrály, limitami a nekonečnými řadami – se v češtině používá pojem matematická analýza nebo (zastarale) infinitezimální počet, v cizích jazycích se na tuto oblast doptáte hlavně pod jménem calculus (či nějak podobně). Moderní matematická analýza se rozvíjí především v tzv. komplexním oboru, což znamená, že argumentem i funkční hodnotou jsou komplexní čísla (viz [samostatné heslo](#)). Analýza funkcí reálné proměnné je něco jako zahrádka před domem, analýza v komplexním oboru je amazonský prales.

Ďábel

V jakém vztahu je věda k náboženství? Vylučuje se s ním navzájem? Vyvrací ho? Nebo je naopak sama jedním z velkých náboženství dneška, dogmatem vyžadujícím víru a poslušnost?



Že je Země středem vesmíru, to je velmi přirozená představa – a naprosto logická, dokud není k dispozici dost pozorovacích údajů, které by jí zpochybnily. Geocentrická představa vesmíru dává dobré praktické předpovědi. Dá se na ní založit kalendář, což mělo zásadní význam pro liturgii a zemědělství. Přesto si už v antice některé myšlenkové školy pohrávaly s možností umístit do středu vesmíru spíše Slunce. Byli to jednak pythagorejci, jednak (pravděpodobně spíš mýtický než skutečný) Hermés Trismegistos, údajný zakladatel alchymie. Jejich důvody byly mystické a estetické, ne vědecké.

Až po půldruhém tisíciletí se k heliocentrické hypotéze vrátil polský duchovní Mikuláš Koperník. Publikoval ji v knize *De revolutionibus orbium coelestium* (O obězích nebeských sfér), s jejímž vydáním váhal. Vyšla až několik týdnů před jeho smrtí v roce 1543. V centru vesmíru je podle Koperníka Slunce, planety jsou uspořádány ve správném pořadí, Země se otáčí kolem své osy a Měsíc obíhá kolem ní.

Katolická církev Koperníkovo dílo zakázala, ale až roku 1616, tedy s velkým zpožděním. Po šedesát let mu nevěnovala pozornost a nepokládala je za nebezpečné.

Hůř dopadl Giordano Bruno, dominikánský mnich upálený roku 1600 v Římě, který ovšem zašel podstatně dál: prohlásil, že hvězdy jsou vlastně vzdálenými slunci, mohou kolem nich obíhat planety a na těch mohou žít bytosti podobné nám. To bylo otevřené rouhání. Bruno se dostal do rozporu s mnoha pasážemi v Bibli od knihy Genesis po vykupitelskou roli Krista. Dostal nabídku odvolat, není ovšem jasné, zda by mu zachránila život. Odmítl ji s (údajnými) slovy: „Vy, kteří mě odsuzujete k smrti, máte větší strach než já, jenž smrt podstupuji.“

Z Bruna na rozdíl od Koperníka mohla církev skutečně mít strach. Byl hlučnější a mnohem víc schopný zaujmout dav. Neměl však své vize čím podložit a bylo snadné ho odsoudit jako pomýleného bludaře. Skutečný problém vytvořil až Galilei, se kterým se tímto způsobem naložit nedalo.

Nešťastná země, která potřebuje hrdiny

Dalekohled vynalezli skláři v Nizozemsku, Galileo ho hbitě napodobil, zdokonalil (Holandané pracovali s čtyřnásobným zvětšením, on dosáhl třicetnásobného – víc to s tehdejšími čočkami, které se nedaly brousit oboustranně, už ani nešlo), velmi rozumně ho věnoval senátu Benátské republiky (ten se mu odvděčil zdvojnásobením platu na univerzitě) a pak udělal rozhodující krok: otočil dalekohled ke hvězdám.

Uviděl, co do té doby nikdo: „(...) obrovské množství jiných hvězd, které dříve nikdo nespatriil a které převyšují počet dříve známých hvězd více než desetkrát,“ jak to sám napsal v tenké brožurce *Hvězdný posel*, kde výsledky pozorování shrnul. Kromě toho spatřil povrch Měsíce s horami a proláklínami. Rozpoznal, že Mléčná dráha je shluk mnoha hvězd, nikoli ohlak nlnvni iak to tvrdil Aristoteles

muž, jehož se oba snaží přesvědčit. Autor však nezaujatý rozhodně nebyl, po přečtení Dialogu nemá nikdo pochyby, k čemu se přiklání. Zastánce geocentrismu má navíc příznačné jméno Simplicio (Prostáček) a podle některých je karikaturou nového papeže Urbana VIII. Galileo navíc svou knihu nenapsal latinsky, univerzálním jazykem vzdělanců, ale italsky, aby si ji mohla přečíst široká veřejnost.

To byla poslední kapka. Následovalo předvolání k inkvizičnímu soudu a proces. Galileo se nezachoval jako Bruno, na kolenou odvolal a zachránil si život. Zcela jistě po rozsudku nevykřikl: „A přece se točí!“ jak mu to připisuje legenda, to by hranici neušel. Co mohl doopravdy říci, to lépe vystihuje dialog (samozřejmě též fiktivní) z Brechtovy hry Život Galileův. Vědcův žák Andrea Sarti je hořce zklamán, pokládá Galileovo odvolání za zradu:

ANDREA: Nešťastná země, která nemá hrdinů!

GALILEO: Ne. Nešťastná země, která hrdiny potřebuje.

Katolická církev oficiálně rehabilitovala Galilea Galileiho roku 1992. Na jeho postulát o nezávislosti vědy a náboženství de facto přistoupila o něco dříve, na Druhém vatikánském koncilu v letech 1962–1965. V praxi se však církev smířila s vědou – přesněji řečeno, naučila se s ní žít bez velkých konfliktů – už během osvícenství. Věda získala svobodu bádání, církev si zachovala značnou část moci.

Právě Bertolt Brecht vidí Galileiho zradu v tom, že církvi takovou pohodlnou pozici umožnil, že nezkusil využít svých objevů ke spektakulárnímu podrytí její moci. „Skandál se jaksi zvrhl v diskusi mezi odborníky,“ píše v poznámkách k americké verzi hry.

Nemohlo to však být jinak. Jediné autentické lidové povstání, které tehdy probíhalo – to, které zažehl Luther – směřovalo naopak k bigotnějšímu způsobu života a fanatičtějšímu náboženskému výstřelkům než sama katolická církev. Galileo neměl ani ambice, ani možnosti změnit společnost.

Změnil však přírodní vědu. Možná lze dokonce říci, že ji založil.

Galileovská revoluce

Proč takové silné tvrzení? Lidé zkoumali přírodní jevy dávno před Galileem, od starověkého Egypta a Mezopotámie přes antiku a arabskou říši po evropské scholastiky. Teprve Galileo však důsledně uplatnil tři principy, které jsou v důsledcích revoluční.

Pozorování a měření má přednost před autoritou. Po staletí byli učenci zvyklí finálně řešit případné spory odvoláním na některý kanonický spis – v případě přírodních věd obvykle na Aristotela. Galileo prováděl kvantitativní experimenty. Pokud byly s autoritami v rozporu, jako tomu bylo například u volného pádu, neváhal starší vědomosti ignorovat. Věřil

tomu, co vidí, co dovede opakovaně prokázat měřením. Ani dnes tento přístup není úplně samozřejmý.

Naše smysly neumožňují poznat celý svět. Když si Galileo přibrál k pozorování oblohy dalekohled, uviděl víc než kdokoli předtím. Přístroj rozšířil meze pozorovatelného. Pro mnohé Galileovy současníky bylo těžké takovou změnu přijmout. Na smysly se mohou spolehnout, přístroj může klamat nebo být sestrojen kvůli záměrnému podvodu, říkali. Do značné míry to bylo omluvitelné uvažování. Princip dalekohledu nebyl většině z nich jasný a podvody pomocí důmyslně vyhlížejících zařízení nebyly vzácné například mezi alchymisty. Mnozí lidé odmítli Galileovu nabídku podívat se dalekohledem sami. To nebyla vědecká metoda. Vědecké bylo zalistovat v kanonické knize.

Některé vědecké poznatky mohou být v rozporu s každodenní zkušeností. Tohle je největší skok ze všech. Je opravdu těžké uvěřit tomu, že všechna tělesa padají stejně rychle. Všichni odmalička víme, že jinak padá peříčko a jinak kladivo. Fyzikální tvrzení, které říká opak, vypadá absurdně. Přesto je pravdivé, stejně jako je pravda, že předmět, který nějaká síla jednou uvedla do pohybu, se bude pohybovat po přímce navždy – pokud na něj nezapůsobí jiná síla.

Žijeme ve světě, kde padající tělesa ovlivňuje odpor vzduchu a na pohybující se předmět vždy působí tření a gravitace. Hlubší poznání vyžaduje oprostít se od zkušenosti. Když tohle vědci dokázali, Galileo mezi nimi první, otevřeli si cestu k pochopení elektřiny, atomů, kvantové fyziky. Tam všude je názorná představa k ničemu a selský rozum klame.

Moderní vědu charakterizují principy, které dál rozvíjejí Galileův přístup: důraz na experiment, na kritické myšlení, vědomí neúplnosti poznání. Publikace v seriózních časopisech, což je stále ještě základ komunikace mezi vědci, se před vydáním recenzují (peer review), totéž platí o příspěvcích na konference. Když dojde některé pracoviště k zásadnějšímu či překvapivému výsledku, hlavní proud vědy čeká, než se táž experimentální data podaří naměřit i jinde, do té doby se novinka akceptuje jen s velkým otazníkem. „Víme málo, ale na druhou stranu máme jistotu, že to opravdu víme,“ říkají rádi přírodovědci. Galileo by byl v takovém prostředí asi šťastný.

Jenže vědu dělají taky jen lidé, ve hře jsou ekonomické a politické tlaky, nic není dokonalé. I to by Galileo snadno poznal – nic nového pod sluncem. Věda trpí stejnými neduhy jako celá společnost. Není prosta podvodů, nepotismu, zneužívání vyššího postavení, diskriminace.

Výzkum v přírodních vědách je stále dražší a někdo to musí zaplatit. Vědecká agenda proto často není nezávislá, je směřována tam, kde jsou zájmy sponzorů, a základním zájmem je návratnost investice (viz též [P-HODNOTA](#)). Praxe peer review má často daleko k dokonalosti. Vedle seriózních časopisů existuje i záplava neseriózních, tzv. predátorských, kde vám otisknou skoro cokoli, když za to dostanou zapláceno. Věda pořád ještě dokáže odstrhávat a zahazovat své plané výhonky, ale je to pracnější než kdy dřív.

Zjevné a nepopíratelné nedostatky vědy jsou nutným důsledkem jejích úspěchů. Stala se nejuznávanějším vysvětlením podstaty světa. Její aplikace změnily společnost k nepoznání – zejména během posledních dvou set let, v jejich rámci pak především v období od druhé světové války po současnost. Ohromně se rozšířil počet lidí, kteří vědu dělají. Je viditelná: na rozdíl od dřívějších dob pracují dnešní vědci všem na očích, zejména tam, kde jsou financováni převážně z veřejných rozpočtů. Samotný její význam ji předurčuje k tomu, že je terčem přísného dohledu a kritiky – jako každá moc.

Zároveň prožívá dost nečekanou krizi důvěryhodnosti. Nemalá část veřejnosti o vědeckých závěrech pochybuje, nebere je vážně a uchyluje se k zjednodušeným vysvětlením světa. Polovina Američanů, obyvatel hlavní světové velmoci a vlasti technologických zázraků, nevěří v evoluci, zato se bojí pekla. Na Facebooku najdete nejednoho chytrého a vzdělaného člověka, který vás bude přesvědčovat, že vlády nás práškují z dopravních letadel psychoaktivními látkami. Věda se často vnímá jako spojenec moci, nástroj manipulace, součást spiknutí.

Osvícenci ze sedmnáctého a osmnáctého století, racionalisté století devatenáctého a inženýři časů našich dědečků by byli zděšeni, ale především by nechápali: jak jde dohromady tak obrovský pokrok s tolika pověrami, předsudky a popíráním faktů?

Nejspíš docela dobře – vlastně je téměř jisté, že zde existuje příčinná souvislost. Strach ze stále složitějšího světa nutí lidi hledat spásu v jednoduchých vysvětleních. Automatizace bere mnoha lidem takovou práci, která je ještě dost jednoduchá, aby ji zvládli bez větších schopností, přitom ale už dost smysluplná, aby skýtala uspokojení. A pak je tu samozřejmě internet, který vám potvrdí všechno, nač se ho zeptáte, pravdy i nesmysly.

Existuje i subtilnější kritika vědy. Ta ji viní z toho, že si monopolizuje právo na výklad skutečnosti, že se stala novou ortodoxií, podobnou dřívějšímu postavení církve. Termíny, které se v této souvislosti používají, znějí scientismus a redukcionismus.

Slovo scientismus je v podstatě nadávka, stejně jako kdysi byl nadávkou impresionismus. Tu však Monet, Renoir a Cézanne přijali za svou, dali si ji na prapor; vědci obviňovaní ze scientismu nic podobného neučinili. Z toho důvodu i rozmanité definice scientismu pocházejí od jeho kritiků. [Většinou se shodnou](#) na následující: scientismus říká, že jediné legitimní otázky týkající se reality jsou ty, na něž může dát odpověď věda. Neboli: jen vědecká znalost je opravdová znalost, všechno ostatní je pouhý názor anebo nesmysl. Aby taková definice dávala smysl, musí ještě vysvětlit, co rozumí pojmem věda: ta je definována použitými metodami. Obvykle to znamená požadavek ověřování hypotéz experimentálně, postupu od jedné [potenciálně vyvratitelné hypotézy](#) k jiné, dokonalejší.

Scientismus v takto extrémní podobě (stejně jako redukcionismus, tedy přesvědčení, že jakkoli komplexní jevy lze rozebrat na kousky a vysvětlit na nejzákladnější, tedy fyzikální úrovni) zastává [jen málo přírodovědců](#), není proto úplně fair obviňovat je z něj šmahem. Mnozí vědci se shodnou s filozofy a jinými kritiky, že existují otázky, jež jsou praktické a závažné,

věda k nim však nemá mnoho co říci. Týká se to hlavně morálních problémů a dále řady ryze filozofických otázek – takových, jejichž podstata spočívá ve vyjasnění obsahu pojmů.

Obvinění z hříchu scientismu často zazní v diskusích o ateismu a víře, hlavně od té doby, kdy se malá, ale hlasitá skupina přírodovědců přihlásila k tzv. novému ateismu. To je hnutí, které aktivně vystupuje proti náboženství, veřejně s ním polemizuje, vystavuje ho kritické racionální argumentaci a protestuje proti náboženské indoktrinaci dětí. U nás, v nábožensky chladné zemi, působí noví ateisté až hystericky (a občas nám připomenou protináboženskou propagandu komunistického režimu), jejich hlavním působištěm však jsou Spojené státy, kde je situace odlišná.

Tím se vracíme ke Galileovi a doktríně NOMA. Autorem tohoto termínu je americký přírodovědec [Stephen Jay Gould](#). Byl nadaným popularizátorem, výborně psal. Představu „nepřekrývajících se magisterií“ zavedl roku 1997 ve stejnojmenném eseji a později ji upřesnil v knize *Skála věků*, kde napsal, že zatímco věda se zabývá stářím kamenů (age of rocks), předmětem náboženství je skála věků (rock of ages). Slovní hříčka dává do souvislosti Gouldovu práci paleontologa, k níž patří datování vzorků hornin, s křesťanským hymnem *Skála věků*, jehož název je odvozen [od starozákonního verše](#): „Doufejte v Hospodina věčně, neboť Hospodin, jen Hospodin je skála věků.“

NOMA ovšem předpokládá, že se hranice oboustranně respektují. Příznivci tzv. Mladé Země mají za to, že svět byl stvořen před šesti až deseti tisíci lety (viz [EVOLUCE](#) a [RADIOAKTIVITA](#)). Vycházejí z doslovného výkladu Bible. Nedají se označit za nevýznamné excentriky – [podle Gallupova průzkumu](#) z roku 2017 s tímto názorem souhlasí 38 % dospělých Američanů, což je však nejméně za posledních 35 let! V době, kdy Gould zavedl NOMA, to bylo kolem 45 %. Každý druhý dospělý v Gouldově vlasti tedy pokládal jeho názor na „age of rocks“ za nesmysl a rouhání. V takovém kontextu se bojovný ateismus chápe trochu snáze.

Jeho hlavní zastánci – biolog Richard Dawkins, filozof Daniel Dennett, neurovědci Sam Harris a Steven Pinker a již zesnulý novinář Christopher Hitchens – mají za to, že na otázku existence božské entity lze uplatnit vědecká kritéria. Nevadí, že ji nelze přímo pozorovat, to není pro vědu nijak neobvyklá situace. Zejména kvantová fyzika, ale nejen ona, se zabývá nepozorovatelnými věcmi běžně a má na to metodu: měří jejich působení na pozorovatelné věci. S božstvem by to mohlo jít podobně, protože podle věřících ovlivňuje dění v našem normálním světě, jenž je pozorovatelný a měřitelný.

Pomáhá například nemocným přímluvná modlitba za jejich uzdravení? To se skutečně v USA měřilo formou standardních, dvojité slepých klinických studií. Žádná neprokázala kýžený efekt. Ta, která se dělala u pacientů zotavujících se po koronárním bypassu, však přinesla [jeden kuriózní výsledek](#): nulový efekt nastal jen u těch pacientů, kteří nevěděli, že se za ně někdo modlí. Ve skupině pacientů, kteří o modlitbě věděli, došlo ke statisticky významnému nárůstu pooperačních komplikací.

(Psychologické vysvětlení je nabíledni. Klidně se za své blízké modlete, ale raději jim o tom neříkejte.)

Richard Dawkins a jeho souputníci věří, že podobnými argumenty lze prokázat nejen nesmyslnost NOMA, ale že se lze velmi přiblížit důkazu neexistence jakéhokoli božstva. „Velmi pravděpodobně žádný Bůh není,“ zněl slogan, který použila Britská asociace humanistů za podpory Richarda Dawkinse pro reklamní kampaň roku 2008. Autobusy v Londýně i jiných městech byly opatřeny výrazným nápisem, jehož druhý řádek doporučoval: „Přestaňte si dělat starosti a užíjte si život.“ Jistý druh pokroku je nepopíratelný; tohle by v Galileových časech rozhodně neprošlo.

Spor mezi „magisterii“ se tak jednoduše však uzavřít nedá. Nedá se čekat, že ho vyřeší racionální argumentace. V tuto chvíli je těžko představitelné, že vůbec někdy skončí. Příliš silně do něj promlouvají nejhlubší aspekty lidské povahy: bůh i ďábel.

Einstein



Nebyl výstřední vědec a šílený profesor. Osud mu postupně dopřával a vnucoval různé životní styly, nejvíc doma se ale cítil ve spořádané měšťanské domácnosti, již mu zařídila jeho druhá žena Elsa.

Neoloupil svou první manželku Milevu Marićovou o její podíl na teorii relativity, neboť žádný nebyl. Navzdory dodatečným legendám se Mileva na této ani jiné jeho práci nepodílela.

Nebyl dobrý manžel. K Milevě se choval vysloveně špatně, což později trochu kompenzoval tím, že jí věnoval většinu peněz z Nobelovy ceny. Podváděl ji s Elsou. Elsu pak podváděl s dalšími ženami. Taky nebyl příliš dobrý otec, když už je o tom řeč. Prostě průměrný muž své doby a své společenské třídy.

Nebyl špatný žák. Jen ho nevezali na nejlepší technickou univerzitu v Evropě v šestnácti a zdvořile mu navrhli, že by si měl napřed udělat maturitu. Což neochotně učinil a vrátil se o rok později.

Byl špatný matematik. To jest, byl někde na konci žebříčku deseti tisíc nejlepších matematiků světa. Uvažoval intuitivně, pracoval s představivostí, ne se vzorci. Na exaktní formulaci obecné teorie relativity se nadřel jak kuň a trvalo mu to skoro deset let. David Hilbert stihl totéž za dva měsíce. To byl vynikající matematik. Ale sám by nevymyslel, co a proč má v tomto případě počítat.

Nevynikal v ničem kromě své specializace. Věděl to o sobě. Snažil se odmítat žádosti, aby se veřejně vyjádřil k jiným věcem, a docela se mu to dařilo.

Se slávou a popularitou nebojoval ze skromnosti, prostě si moc nepotrpěl na lidi. Včetně vlastní rodiny a s výjimkou několika intelektuálních přátel.

Nestal se prezidentem státu Izrael, když mu to vážně nabídli. Odmítl to velmi rozhodně a velmi zdvořile.

Nevěřil v Boha. Ale často s Ním rozmlouval a polemizoval. Vcelku o Něm měl dobré mínění. Přátelsky ho nazýval der Alte, tedy Starý.

Byl podivín, ale o nic větší, než je spousta lidí, kteří nic převratného nevymysleli.

Jeho práce od roku 1915, kdy publikoval obecnou teorii relativity – bylo mu tou dobou třicet šest let – neměla v podstatě žádný vliv na vývoj hlavního proudu vědy (viz [SCHRÖDINGER A KOČKA](#)).

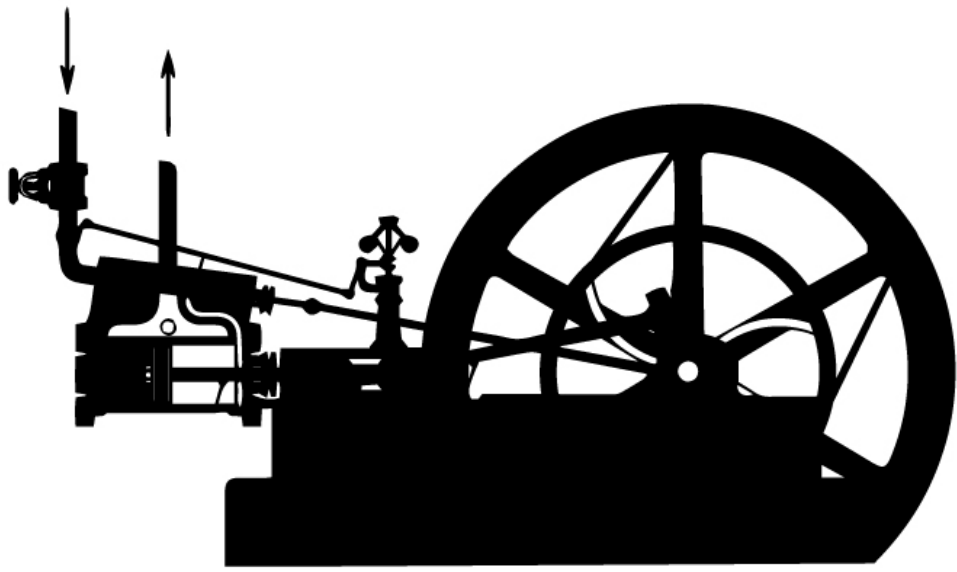
Stál stranou světového společenství fyziků, jež bylo ve dvacátých a třicátých letech velmi semknuté; on je kritizoval zpovzdálí v roli moudrého starce, jímž tehdy rozhodně ještě nebyl. Šel jim na nervy a vysloužil si, že ho začali ignorovat.

Nevzal si do hrobu žádnou zázračnou teorii, která by změnila svět, kdyby se ji nerozhodl utajit. Zemřel unavený, zlomený, nešťastný, osamělý a bez odpovědí na otázky, jež Starému kladl.

Richard Feynman, sám nepopiratelný génius, řekl, že teorie relativity je sice srozumitelná, ale naprosto nesrozumitelné je, jak na ni Einstein mohl přijít. Teprve dnes jsme schopni jakžtakž říci, o kolik v tomto případě Einstein předběhl svou dobu: minimálně o sto let.

Entropie

Existuje mnohem víc způsobů, jak mít věci v nepořádku než jak je mít v pořádku.



Parní stroj byl před dvěma sty lety tím, čím jsou dnes počítače a internet – základem ekonomiky, zdrojem potíží a nespokojenosti, praktickou výzvou pro techniky, kteří hledali možná zlepšení. Jak dosáhnout větší výkonnosti při menších nákladech?

Technologie parního pohonu už tou dobou urazila velký kus cesty. Vzrostla především efektivita. Prvním využitím parního stroje bylo čerpání spodní vody z uhelných dolů. Zpočátku se však dařilo zvýšit těžbu uhlí stěží o tolik, aby to stačilo na samotný pohon stroje. Vynálezci pracovali metodou pokusu a omylu, odhadem a pomocí řemeslného citu. Neměli žádnou teorii, o kterou by se mohli opřít. A i kdyby ji měli, byla by to pro ně nezvyklá představa. Řemeslo a věda – a tedy také technika a věda – byly dvě nesouvisející disciplíny, k jejich opravdovému propojení došlo až v závěru devatenáctého století. Jednou z mála výjimek byla pozoruhodná práce francouzského vojenského inženýra jménem Sadi Carnot.

Když chcete kopat uhlí, potřebujete uhlí

Že má pára sílu, věděli lidé odedávna, skutečná historie parního stroje se však začala až v osmnáctém století. Díky kuchyňskému vybavení dodnes dobře známe jméno Denise Papina. Ten postavil nízkotlaký stroj kolem roku 1690. Patent na tuto technologii získal po Papinově smrti Thomas Savery a dál ji rozvinul jeho obchodní společník Thomas Newcomen.

V Newcomenově tzv. atmosférickém stroji práci nevykonávala pára, ale atmosférický tlak. Na začátku pracovního cyklu klesá dolů vahadlo pumpy, a tím zvedá píst na opačné straně páky. Pod něj vniká nízkotlaká pára z vroucí vody. Nezvedá ho však, na to by její tlak nestačil. Když je píst v horní poloze, vstříkne se do páry trocha studené vody, ta páru ochladí, pára kondenzuje zpět na vodu, čímž prudce klesne její objem. Pod pístem proto vznikne podtlak. Normální tlak vzduchu píst stlačí dolů, tím zvedne vahadlo – v této fázi se koná užitečná práce. Když je píst dole, začne se pod něj zas pouštět pára, vahadlo vlastní vahou klesá a cyklus se opakuje. Oba ventily bylo zpočátku potřeba ovládat ručně, ale rychle se podařilo jejich činnost automatizovat převodovým mechanismem.

Hlavní problém Newcomenova stroje spočívá v tom, že píst se střídavě ohřívá a chladí, což je neefektivní – spotřeba tepla, a tedy paliva je obrovská. Říkalo se, že se v takovém stroji protopí víc uhlí, než kolik se ho díky němu vytěží... což je sice nadsázka, ale začarovaný kruh je zřetelně vidět: parní stroj – větší poptávka po uhlí – nutná těžba z větší hloubky – podzemní voda – je třeba ji čerpat ven – parní stroj...

Zlepšením byl Wattův stroj se samostatným kondenzátorem páry, kde píst zůstal trvale horký. To byl první skutečný parní stroj, motor průmyslové revoluce.

Další zdokonalení vedlo k dvojčinnému stroji, kde pára působí na píst střídavě z jedné a druhé strany, tedy v obou fázích pracovního cyklu. Začátkem devatenáctého století vyvinul Richard Trevithick vysokotlaký parní stroj, kde už práci konala skutečně pára, ne atmosférický tlak. (Princip byl jasný, ale šlo o to, z čeho a jak vyrobit kotel, válec a píst, aby vydržely.) Tím se otevřela cesta například k lokomotivám, protože vysokotlaký stroj může být menší a lehčí.

Parní stroje byly stále dokonalejší. Má takový vývoj nějakou mez, přes kterou už nejde jít? Sadi Carnot tuto otázku prozkoumal, zpracoval matematicky a přišel s odpovědí: ano, taková mez existuje a je absolutně nepřekročitelná. Dnes se jeho objevu říká druhý zákon termodynamiky.

Termodynamika je součást fyziky. Je to věda o teple, jeho výměně mezi látkami a schopnosti tepla konat práci, tedy vlastně věda o parním stroji. Vznikla velmi účelově a přizemně: Carnota zajímalo, jak udělat lepší tepelný motor. Přitom narazil na zákonitosti, které dnes pokládáme za jedny z nejhlubších poznatků o fungování celého vesmíru.

Tři hlavní zákony světa

Termodynamiku lze (s obrovským zjednodušením) shrnout [do tří tvrzení](#) – termodynamických zákonů. První a třetí jsou snadno srozumitelné, druhý ne.

První zákon termodynamiky je zákon o zachování energie: celková energie uzavřeného systému (například vesmíru) zůstává stále stejná. energii můžeme přeměnit z jedné formy do jiné, třeba tepelnou na pohybovou, ale nemůžeme ji vytvořit ani zničit.

Tak například sníte miskou rýže, usednete na kolo a odjedete. Z pohledu fyziky to znamená, že sluneční energie pomohla vytvořit vazby v molekulách polysacharidů, přeměnila se tedy na chemickou.

Když rýži sníte, převede se tato chemická energie – 1528 kJ na 100 g syrové rýže, u vařené asi třikrát méně – na chemickou energii v jiné formě. Pomůže vytvořit látku, které se říká ATP (adenosintrifosfát, viz též [MITOCHONDRIE](#)). Ta pohání svaly, mění se tedy na pohybovou energii pohánějící bicykl.

Část této pohybové energie se změní na teplo jak hned ve svalech, tak při tření pneumatik bicyklu o zem. Ke kolu můžeme také připojit dynamo a část kinetické energie použít k výrobě elektřiny. A tak dále. Na začátku takového řetězce je téměř vždy Slunce (s výjimkou využití jaderné energie), na konci nějaký užitečný výkon a odpadní teplo. V každé části tohoto řetězce dochází ke ztrátám, vždy se produkuje odpadní teplo, to je omezení, které nelze obejít.

Třetí termodynamický zákon říká, že teplota má spodní pevnou mez, ta činí nula kelvinů neboli $-273,15\text{ °C}$ a je nedosažitelná. Můžeme se k ní však libovolně přiblížit.

V současné době lze některé kovy ochladit pomocí magnetických jevů na stovky pikokelvinů, tedy zhruba na 0,000 000 000 1 K.

Ideální stroj a meze možností

Parní stroj zjednodušený na svůj základní princip – a Carnot byl první, kdo takové zjednodušení vymyslel – funguje díky tomu, že jeho pracovní látka (zpravidla vodní pára) přichází střídavě a pravidelně do styku s tzv. teplou a studenou lázní. Teplá ji zahřeje a způsobí rozpínání, studená naopak. Když to celé vhodně mechanicky uspořádáte – k tomu potřebujete ventily, které se ve správnou chvíli otevírají a zavírají, případně také setrvačnick, který vrátí píst do výchozí polohy –, dostanete pohyb, tedy užitečnou práci.

Což bude fungovat tak dlouho, dokud topíte pod kotlem a na druhé straně máte dostatek chladicí vody. Když parní stroj zjednodušíte na toto schéma, má to za následek, že se do stejné definice vejde mnoho jiných strojů, třeba spalovací motor vašeho auta nebo jaderná elektrárna. Carnot o jejich budoucí existenci samozřejmě nic netušil, základní matematika je však stejná.

Carnot spočítal, že maximální možná účinnost tepelného stroje (tak svůj model nazval) závisí výhradně na poměru obou pracovních teplot. Vyjádřil to vztahem $1 - S/T$, kde S je [teplota](#) studené lázně, T teplota teplé lázně, obě v kelvinech, takže například pro 100 °C a 20 °C dostaneme $1 - 293/373 = 21,5 \%$.

To je teoretické maximum při dokonalém provedení stroje. Účinnost reálných parních strojů je nižší a lze ji technickými zlepšeními zvyšovat, ale jen po tuto mez. Když chceme jít dál, tedy zvednout samu teoretickou účinnost, dá se to udělat jedině výhodnějším poměrem pracovních teplot. Ke stoprocentní účinnosti však nedospějeme nikdy, to bychom totiž buď museli mít horní teplotu nekonečnou, anebo dolní nulovou. A absolutní nuly nelze dosáhnout.

Energie ohně, dodaná na začátku cyklu expandující páře, se nepromění v užitečnou práci pístu všechna. Část se jí vždy spotřebuje na neúčinné zahřívání chladicí vody, část energie se vždy nevratně rozptýlí, vyplývá. To je daň, kterou platí parní stroj za svůj princip. Rozptýlení energie v chladicí vodě není totiž dáno nedokonalostí konstrukce, třením v převodech a podobnými nepříjemnostmi. Je zabudováno v podstatě světa, je neoddělitelným rysem vesmíru.

Jako myšlenkový experiment můžeme sestavit idealizovaný tzv. vratný stroj, který pracuje s maximální možnou účinností a zcela bez ztrát do okolí. Právě to Carnot udělal. Ale i vratný stroj, má-li se točit, musí odevzdávat část dodaného tepla chladicí lázni. To je jedna z možných formulací druhé termodynamické věty: [žádný stroj nemůže](#) cyklicky měnit teplo na práci bez tepelných ztrát.

Míra nepořádku

Poté co fyzikové poznali a pochopili druhý termodynamický zákon, zavedli novou veličinu, která se jmenuje entropie. Je to abstraktní pojem, nemá žádnou přímo pozorovatelnou podobu jako třeba teplota, rychlost či tlak. Přesto si ji můžeme názorně představit. Stačí vzít vzorně uklizený byt, uspořádat v něm divoký večírek a ráno se podívat, jak to kolem vás vypadá.

Pro fyziky je entropie mírou vratnosti děje. Při vratném ději – takovém, jehož směr lze kdykoli otočit bez porušení fyzikálních zákonů – se entropie nemění. (Představte si, že v uklizeném bytě velmi opatrně posunete židli a hned ji zas vrátíte zpět.) Při nevratných dějích, což je většina toho, co se odehrává v každodenní realitě, entropie neustále roste. (Představte si, že na podlahu vysypete sáček mouky, přidáte hrst popela a hrnek vody. Zamícháte.) To lze dokonce použít jako způsob, jak definovat směr plynutí času: uzavřené systémy se vyvíjejí směrem k vyšší entropii, nikdy naopak.

Neuklizený pokoj má vyšší entropii než uklizený. Rozbité vajíčko vyšší než celé. Když nalijete do vody barvu, entropie bude postupně růst, jak se barva ve vodě rozptýluje. Zvýšit ji můžete rozmícháním.

Jde o počet možných uspořádání. Aby pokoj působil uklizeným dojmem, k tomu vede jen poměrně málo způsobů uspořádání předmětů. Nepořádek se dá udělat daleko více způsoby než pořádek.

Molekuly barviva ve vodě mohou být uspořádány nepředstavitelně mnoha způsoby, ale jen nepatrný počet z nich odpovídá tomu, že všechna barva je vlevo a čistá voda vpravo. Proto také viditelná stopa po vlití barvy vydrží jen několik vteřin, a to i bez míchání – spontánní tepelný pohyb molekul se o rozptýlení barvy postará.

A mimochodem: pohybu molekul nic nebrání, aby přemístil všechnu barvu do jednoho místa sklenice a čistou vodu do druhého. Tedy – nic kromě pravděpodobnosti. Všechna uspořádání jsou stejně pravděpodobná, ale těch, v nichž není žádná pravidelnost, je mnohem více. Proto téměř vždy dostaneme některé z nich a barva bude po dostatečně dlouhé době rozptýlena homogenně.

Fyzika připouští, aby se všechny molekuly kyslíku v místnosti samy od sebe, bez vnějšího zásahu, nahromadily třeba u stropu, zatímco dole se udusíte. Poměr počtu takových výstředních uspořádání k pravidelným však odpovídá nesmírně malým číslům, takže na podobný zázrak byste mohli čekat po celou dobu trvání vesmíru, a nedočkali byste se.

Spíš než nepořádku jako takového se tedy týká entropie násobnosti možností. Čeho lze dosáhnout jedním nebo několika málo způsoby, to má nízkou entropii. Co může nastat mnoha způsoby, to ji má vysokou.

Je málo způsobů, jak pokoj uklidit, ale mnoho, jak v něm udělat nepořádek. Je málo konfigurací molekul, které umožňují fungující život, a mnoho způsobů, jak naživu nebýt. Živé organismy (viz [ŽIVOT](#)) lokálně snižují entropii avšak za cenu jejího zvýšení v jiné části uzavřeného

entropii, která se sama sama zvyšuje a jako sama uzavřeného systému, takže druhou termodynamickou větu neporušují. (Například proto, že přijímáme do těla složité molekuly a vylučujeme jednodušší.)

Proč se vůbec něco děje

Zákon o zachování energie vlastně není tak docela intuitivní. Energii vnímáme jako něco, co se spotřebovává, čeho ubývá. Natankujete plnou nádrž, ujedete osm set kilometrů, auto se zastaví a dál nepojede. Energie se „spotřebovala“, což ovšem není a nemůže být pravda. Ve skutečnosti se nespotřebovala, ale rozptýlila do prostředí ve formě tepla. Změnila formu z použitelné na nepoužitelnou.

Důvodem, proč nám první zákon termodynamiky může připadat nepřírozený, je druhý zákon termodynamiky. Spálením benzínu vzrostla entropie. Jednou využitou energii už nelze použít podruhé, přestože jí neubýlo, pořád někde je a navždy bude.

Nízká entropie je vlastně jediný doopravdy neobnovitelný zdroj. Svět ji stále spotřebovává. Růst entropie, neustálé „kažení světa“, je však zároveň důvodem, proč se vůbec něco děje. Entropie dává světu spád (stejně jako spád koryta dává téci řece) a času směr.

Obor, který se zabývá energií a entropií na úrovni molekul, se nazývá statistická termodynamika a za jejího zakladatele je pokládán rakouský fyzik Ludwig Boltzmann (1844–1906), muž, který spáchal sebevraždu kvůli nepochopení ze strany svého vědeckého okolí. Na jeho náhrobku je místo epítazu vytesána rovnice

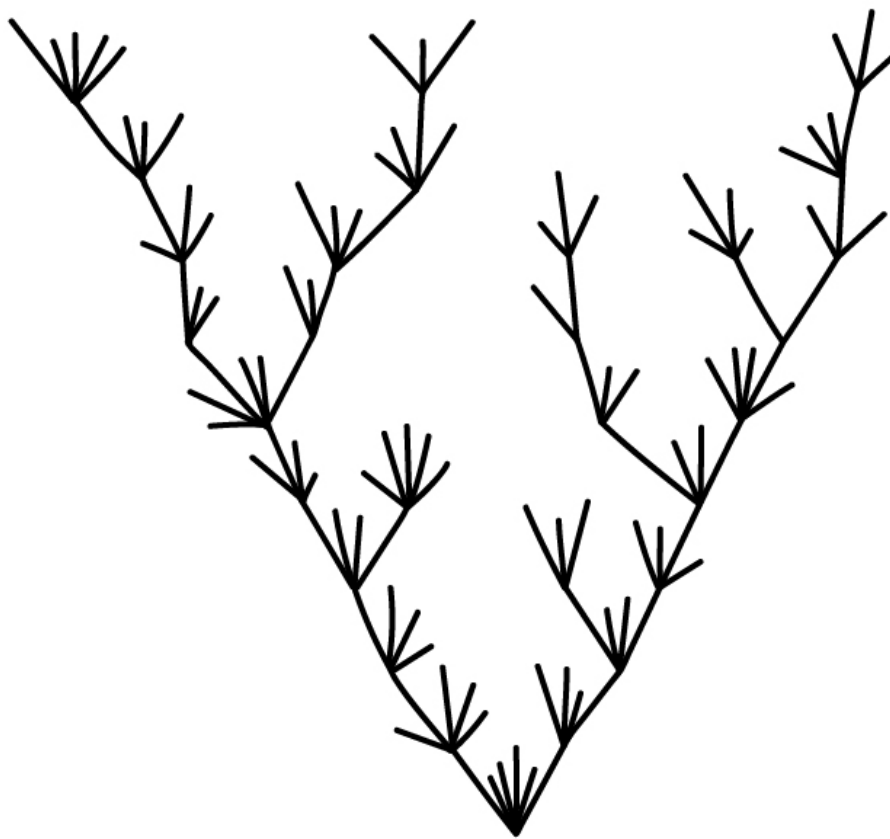
$$S = k \times \ln W$$

v níž S znamená entropii, k je převodní konstanta a W je počet možných stavů systému.

Entropie jako násobnost možností zaujala ve třicátých a čtyřicátých letech telekomunikační inženýry, kteří rozpoznali její souvislost se svými vlastními problémy, především s odlišením signálu od šumu. Tak vznikla teorie informace jako vědní obor. Jedna z možných definic informace je rozdíl mezi entropií výchozího stavu (před předáním informace) a entropií stavu cílového (poté, co informaci dostanete). Informace je tedy totéž co snížení entropie.

Evoluce

Z náhodné variability živých tvorů vybírá nenáhodná selekce ty, kteří se přednostně rozmnoží a své znaky předají další generaci.



Pocházíme z opic – takové je dodnes průměrné povědomí o Darwinově přínosu světu. V tom se od jeho současníků nelišíme, a to ještě v tom lepším případě. Evoluční teorii dnes většinou rozumíme méně než vzdělání lidé v devatenáctém století.

Darwin evoluci jako takovou neobjevil. Už v době jeho mládí většina přírodovědců připouštěla, že se živočišné druhy mohou vyvíjet a v jistých mezích měnit. Potvrzovala to koneckonců praxe všech pěstitelů a šlechtitelů, kteří vytvářeli nová plemena psů či holubů, starali se o záhonky se zeleninou a tak dále. Jednoho a ne zrovna bezvýznamného teoretika evoluce měl Darwin přímo v rodině. Byl jím jeho dědeček Erasmus.

Viktoriánský cestovatel

Mimochodem, druhým Darwinovým dědečkem byl věhlasný průmyslník Josiah Wedgwood, král britské výroby porcelánu a hliněného zboží. Charles Robert Darwin se narodil roku 1809 do bohaté a úspěšné rodiny, nadto na prahu doby, která přála jak jeho blízkým, tak jeho rodné zemi. V Anglii se na plné obrátky rozbíhala průmyslová revoluce. Přicházel věk páry, velkovýroby, rozmachu vědy. Osudy milionů lidí se radikálně převracely, někdy k lepšímu, někdy ne tak docela. Šikovní dělali kariéru, jiní přišli na mizinu. Duch doby je důležitý: ve stabilnějších časech by Darwin možná uvažoval jinak. Po otci se měl stát lékařem, ale nesnášel pohled na krev a ani jinak ho studium nezaujalo. Přešel na teologii do Cambridge. Čekala ho však docela jiná životní dráha. Díky doporučení svých učitelů byl přijat na loď Beagle jako neplacený přírodovědec – ač neměl specializované přírodovědné vzdělání, [byl jen nadšeným amatérem](#).

Beagle měla původně zkoumat pobřeží Jižní Ameriky, nakonec však z toho byla pětiletá plavba kolem světa a Darwin ji absolvoval celou. Na vlastní oči se tak mohl seznámit s velkou rozmanitostí živočišných a rostlinných druhů a s nejrůznějšími přírodními zvláštnostmi. Cesta založila jeho vědeckou kariéru – vzorky, pozorování a zápisky z ní ho proslavily v anglických odborných kruzích – a dala mu také inspiraci k jeho hlavnímu objevu. Jako klíčová se v této souvislosti jeví návštěva souostroví Galapágy. Na jednotlivých ostrůvcích tam Darwin našel velmi podobné, přesto odlišné druhy pěnkavek, drozdců nebo želv. Guvernér Galapág (anežtoval je Ekvádor roku 1832, tři roky před Darwinovou návštěvou) se mladému přírodovědci pochlubil, že místní lidé dovedou podle vzhledu a velikosti želvy rozpoznat, z kterého ostrova pochází. To by Darwin sám asi nedokázal. Dokázal však něco jiného: zamyslel se nad tím.

Galapágy jsou téměř dokonalou přírodovědeckou laboratoří. Leží na rovníku, tisíc kilometrů od nejbližší suché země, kterou je jihoamerická pevnina. Předkové tamních živočichů museli v minulosti tuto vzdálenost překonat, přijít z pevniny – a jistě šlo o nevelký počet jedinců. Odkud se tedv na malíčkém souostroví vzalv rozmanité druhy?

Nejsilnější at přežijí

Po návratu do Anglie začal Darwin poznatky zpracovávat. Jeho životopisci většinou soudí, že se mu musely propojit tři poznatky: zaprvé, galapážská pozorování. Zadruhé, šlechtitelská praxe, kterou na anglickém venkově viděl na každém kroku: když chce sedlák krávy, které nadojí více mléka, připouští k otelení jen ty, které požadovanou vlastnost mají. A zatřetí tu byl [slavný esej Thomase Roberta Malthuse](#) o nezadržitelném růstu populace (viz [YPRES](#)). Vyšel už roku 1826, Darwin jej však četl až po své cestě kolem světa. Malthus hovoří o populačním tlaku (primárně u lidí, ale úvahu lze aplikovat na jakýkoli živočišný a rostlinný druh): jedinců přibývá rychleji než zdrojů (například potravy), všichni tudíž nepřežijí. Kterí ano a kteří ne? A zde jsme u podstaty věci.

Evoluční teorie v Darwinově pojetí je jednoduchá. Tak jednoduchá, že se nevyhnutelně musíte zeptat: to je to celé? Moderními pojmy se dá formulovat takto: jedinci kteréhokoli druhu se od sebe mírně liší, nejsou dokonalými kopiemi. (Proč? V tom neměl Darwin jasno, ale přenesl se přes to.) Například někteří zajíci běhají rychleji než jiní. Tudíž s větší pravděpodobností utečou lišce. Tudíž mají větší šanci dožít se reprodukčního věku, rozmnožit se a předat své vlastnosti potomstvu.

Složení populace zajíců se tak postupně bude měnit; ti pomalejší se někdy rozmnožit vůbec nestihnou, neboť budou ještě před sexem sežráni. Tím se postupně, generaci od generace, mění průměrné vlastnosti celého druhu. Postupem času se takto vyvine z jednoho druhu jiný. (Jak dojde k rozdělení? To bylo jedno ze slabých míst celé teorie.) Darwin sám to v knize O původu druhů shrnul větou jedinou: „Množte se, odlišujte se, nejsilnější at přežijí, nejslabší at vyhynou.“

Dnešní stručné shrnutí zní: variabilita, konkurence, selekce. A namísto „nejsilnější at přežijí“ bychom spíše řekli: nejlépe přizpůsobení se rozmnoží. Slova „nejsilnější“ a „nejslabší“ později vedla k četným nepochopením a zneužitím Darwinových myšlenek. Přitom už Darwin tato slova použil pouze v té jediné citované větě. Jinak opakovaně zdůrazňoval a četnými příklady dokládal rozmanitou povahu adaptací přinášejících jedinci evoluční výhodu. Není jeho vinou, že se ujal jednoduchý slogan o „nejsilnějších“. Přesto je to velká škoda.

Podobně to ostatně funguje na každém záhonku, kde se zahradník snaží vypěstovat větší a červenější tulipány. Darwin škrtl zahradníka a ukázal, že to jde i bez něj. Jen o hodně pomaleji, z čehož se později vyklubal kámen úrazu.

Evoluce nezná slovo aby

Proč má žirafa dlouhý krk? Aby mohla žrát listí až úplně nahoře. – V téhle odpovědi je špatně nejspíš úplně všechno, hlavní chybou je však každonádně slovo „aby“

rozložení slova „aby“.

V darwinovské evoluci žádné „aby“ není. Evoluce neplánuje a nesleduje žádný účel. Právě to a nic jiného ji odlišuje od alternativních výkladů. Jean-Baptiste Lamarck, autor té teorie vývoje druhů, jež byla do Darwinova objevu nejvlivnější a nejucelenější, to viděl jinak: žirafa má motivaci natahovat krk (zajíc rychle běhat, medvěd mít sílu atd.), takže se snaží, posiluje tuto svou vlastnost, pak ji předá na potomstvo, a to má lepší startovní bod.

Dnes víme, že to není možné především z biochemických důvodů. Vytrénovaná žirafa nemá jak svou nabytou zdatnost předat potomkům, protože jí – a ostatním živým tvorům – chybí buněčný mechanismus, který by to mohl zařídit. Somatické buňky nemohou zapsat informaci do pohlavních. Na hlubší úrovni: podle centrálního dogmatu molekulární biologie (viz [CRISPR](#)) nemohou proteiny měnit DNA.

Evoluce bez „aby“ znamená, že její kroky jsou slepé, zcela náhodné a že směřují se stejnou pravděpodobností všemi směry. Mutace jsou náhodné. Nenáhodný je až následný výběr. To je hlavní rozdíl mezi Lamarckem a Darwinem.

Pokud jde o žirafu, její dlouhý krk by se zajisté dal vysvětlit darwinovsky, kdyby ovšem skutečně existoval příslušný selekční tlak – kdyby například antilopy pravidelně ožraly všechno listí na stromech dole a žirafy by tím pádem získaly výhodu v tom, že dosáhnou výše. [Jenže tak to není](#). Žirafy se ve skutečnosti krmí většinou v předklonu, s hlavou a úrovní ramen a těžko se zbavit dojmu, že jim krk spíš překáží. Zato ho uplatňují samci při soubojích. Jde tedy spíš o analogii jeleního paroží.

Darwinovi trvalo dvacet let, než svou teorii dopracoval tak daleko, že byl aspoň částečně spokojen a začal chystat publikování. Bylo pro něj důležité, aby jeho teorie byla opravdu obecná a aby se v celé živé přírodě nedala najít skutečnost, jež by s ní byla ve zřejmém rozporu. Kdo ví, zda by s ní vůbec byl někdy hotov, nebýt toho, že se na scéně objevil Alfred Russel Wallace, který formuloval základy evoluční teorie nezávisle na Darwinovi a [téměř stejnými slovy](#). To uspíšilo publikování knihy O původu druhů. Byla rozebrána v první den prodeje: přírodní vědy byly ve viktoriánské společnosti [velmi populární](#).

Opice by nevadila, Mendel ano

Přirozený výběr tedy, shrňme to ještě jednou, působí podobně jako šlechtitelé hospodářských rostlin a zvířat. Ti si z každé generace vyberou ty jedince, kteří nejlépe vyhovují jejich záměrům, ať už jde o největší a nejsladší plody, či nejsilnější svaly. Takové nechají dál rozmnožovat, zatímco nevyhovující vyřadí. Evoluce postupuje stejně, jen se dvěma rozdíly: nemá žádný specifický cíl, nevybírání nejsladší, ale nejživotoschopnější – a „pracuje“ tím pádem daleko pomaleji než šlechtitel. Evoluce nemůže, s výjimkou vzácných extrémních situací, jedny nechat rozmnožovat a druhé zcela vyřadit. Pouze zvyšuje a snižuje pravděpodobnosti.

To je hlavní důvod, proč je těžké evoluční teorii zahrnout do samozřejmého pohledu na svět. Nevidíme ji totiž při práci. Evoluce postupuje tak pomalu, že tisíc let pro ni neznámá nic, kdežto pro nás je to životnost celé jedné civilizace. Darwinova genialita spočívala v tom, že z nepřehledných stop dokázal rekonstruovat a pochopit evoluční proces – prostý, ale neviditelný.

Počáteční kritika darwinismu nespočívala v nepřijatelnosti názoru, že „člověk pochází z opice“, což ostatně není pravda a Darwin to netvrdil. Byly tu však dvě jiné oprávněné námitky.

První spočívala v tom, že evoluce je pomalá a že nebylo dost času, aby se z hypotetických počátků života vyvinuly soudobé živočišné druhy. Geologové tou dobou odhadovali stáří Země na 20 až 400 milionů let, o mnoho více než biblických 4500, ale ne dost na to, aby náhodně tápající přirozený výběr dospěl k požadovaným výsledkům. Tuto otázku vyřešil až objev radioaktivity jako zdroje tepla (viz [RADIOAKTIVITA](#)) v zemském jádru a termionukleárních reakcí jako mechanismu fungování hvězd (viz [ČERNÁ DÍRA](#) a [FÚZE](#)). Dnes víme, že Země je stará asi 4,5 miliardy let a že po většinu této doby na ní existovala nějaká forma života.

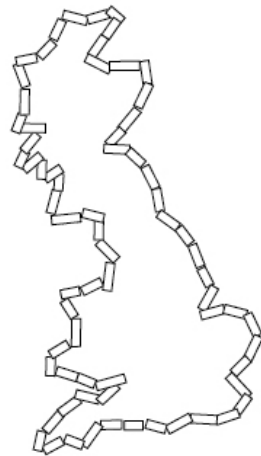
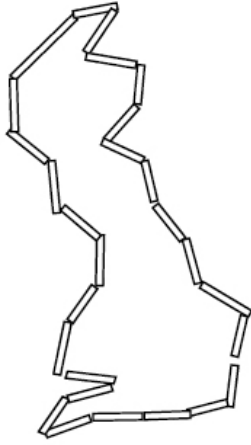
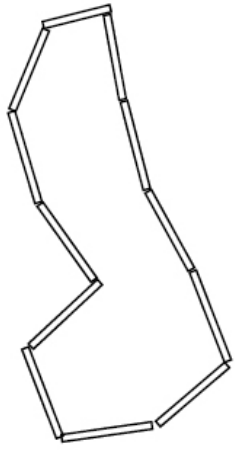
Druhý problém nechtě stvořil v Brně Gregor Johann Mendel. Svými trpělivými pokusy v klášterní zahradě pod Špilberkem (viz [CHROMOZOM](#)) objevil základní zákony genetiky a pochopil, že dědičnost je nespojitá, nikoli „směsná“, že za ni nesou odpovědnost blíže nspecifikované částičky, jež později dostaly jméno geny. Mendel postavil darwinisty před obtížnou otázku: odkud se berou v populaci odchylky, drobné variace, jež jsou pro teorii přírodního výběru nezbytné? Podle Mendela by každá populace měla časem dospět do homogenního stavu.

Darwinovi následovníci se vyrovnávali s Mendelovými objevy dlouho a těžce – až do doby, kdy se podařilo mechanismus dědičnosti odhalit v jeho biochemické podobě. Mechanismus pohlavního rozmnožování, kde se otcovské a mateřské chromozomy náhodně rozdělují do pohlavních buněk a pak se ještě spolu míchají – rekombinují –, je zárukou variability potomstva až až. To by viděl i Mendel na svém hrachu, kdyby měl možnost zkoumat více jeho vlastností než ty snadno viditelné pouhým okem.

Dnešní neodarwinismus se zabývá spíše soutěží genů než jedinců – toto pojetí proslavila teorie „sobeckého genu“ zpopularizovaná Richardem Dawkinsem (a jeho předchůdci, kteří pro své texty nezvolili tak chytlavé názvy a z nichž si zaslouží jmenovat přinejmenším George Williams a John Maynard Smith).

Fraktál

Věc, která zblízka vypadá stejně jako zdaleka.



Možná vás to překvapí, ale některé běžné objekty, jež najdete kolem sebe a také uvnitř svého těla, pocházejí z jiné dimenze. Třírozměrné uvažování, na něž jsme zvyklí, se pro ně nehodí. Je možné, aby existovala věc, která je jedenapůlrozměrná? Nebo napůl plocha a napůl objem? Ano. Seznamte se s fraktály.

Uvnitř těla dospělého člověka je asi čtyři sta čtverečních metrů sliznic. V plicích máme dva a půl tisíce kilometrů postupně se větvících průduškových cest. A jak dlouhé je pobřeží Velké Británie včetně Severního Irsku?

Wikipedie říká, že 12 459 km. To číslo stojí za trochu zamyšlení. Plocha Velké Británie činí 241 930 km². Srovnáme to s Antarktidou, což je také „ostrov“. Její rozloha je 14 milionů čtverečních kilometrů, tedy 58× více než plocha Britských ostrovů. Pobřeží Antarktidy je však jen 1,44× delší než pobřeží Velké Británie.

Geografové dokonce používají poměr délky pobřeží k rozloze jako užitečný ukazatel, který říká, jak snadno lze dosáhnout moře z náhodně zvoleného místa v zemi. V případě Velké Británie činí tento ukazatel 51,4 metrů na kilometr čtvereční, zatímco u Antarktidy jen 1,3. Čím víc, tím je k moři blíž.

Je vidět, že poměr délky pobřeží k rozloze souvisí jednak s velikostí útvaru, jednak se složitostí jeho tvaru. To je oboje docela srozumitelné a v souladu s názornou představou. Pak jsou tu ovšem další problémy.

Délka pobřeží očividně závisí na tom, čím měříme. Změřit neznámou délku znamená přiložit k ní měřítko: a čím kratší tyčí měříme pobřeží Velké Británie (nebo jakéhokoli jiného skutečného ostrova), tím větší délka nám vyjde. Kratší měřítko totiž umožní vzít v úvahu více detailů členitosti tvaru pobřeží, zatímco delší měřítko detaily „přehlídí“.

Poměr obvodu k ploše:

- 2,4 ■ Svět jako celek
- 22,2 ■ Kanada
- 2,3 ■ Rusko
- 0,9 ■ Brazílie
- 26,0 ■ Itálie
- 104,2 ■ Chorvatsko
- 172,4 ■ Dánsko
- 87 000 ■ Mikronésie
- více než milion ■ Ostrovy Korálového moře
- 4000 ■ Čtverec o straně 1 km
- 16 ■ Čtverec o straně 250 km
- 4000 ■ Kruh o průměru 1 km
- 16 ■ Kruh o průměru 250 km

6928 ■ Rovnostranný trojúhelník o straně 1 km

27,7 ■ Rovnostranný trojúhelník o straně 250 km

Matematika pacifismu

Lewis Fry Richardson (1881–1953) byl britský fyzik, chemik, matematik, ale především meteorolog. Narodil se jako nejmladší ze sedmi dětí v zámožné obchodnické rodině v severoanglickém Newcastleu. Rodina byla kvakerského vyznání, což vymezilo celý další Lewisův osud. Společnost přátel, jak se kvakerská církev oficiálně jmenuje, zastává důsledný pacifismus, odmítá autoritu státu a vojenskou přísahu.

Když vypukla první světová válka, Richardson odmítl sloužit se zbraní v ruce. Vyneslo mu to jednak nebezpečnou službu u sanitky na frontě, jednak následné potíže s akademickou kariérou, kde se nikdy nedostal nad úroveň „druhé ligy“, ačkoli se svými schopnostmi by patřil spíše do Cambridge, kde před válkou absolvoval. Aktivní meteorologická práce, kterou měl rád, pro něj také nepřipadala v úvahu, protože britská Meteorologická služba byla zařazena pod ministerstvo letectví – tedy zase práce pro válku.

Další Richardsonova profesní dráha byla pro současníky jasnou ukázkou života podivína. Pustil se totiž do dvou matematických teorií, z nichž ta druhá vypadala mnohem šíleněji než první, ale i ta první... Zkrátka, rozhodl se, že vytvoří matematický model jednak pro počasí, jednak pro válečné konflikty.

Roku 1922 vydal knihu *Weather Prediction by Numerical Process* (Předpovídání počasí číselnými technikami). Uvažoval v ní stejně jako tvůrci dnešních počítačových modelů počasí, z nichž lze odhadnout (pořád ještě ne zcela spolehlivě), jak kde bude za několik hodin či desítek hodin. Vezměte vlhkost, teplotu a tlak vzduchu na tisících míst, rychlost a směr větru, intenzitu slunečního svitu, sestavte obrovské soustavy rovnic a vypočtete z nynějšího stavu stav budoucí.

V principu to jde, když máte ty správné rovnice, velké množství včasných a přesných dat a obrovskou výpočetní sílu. Richardson měl jen ty rovnice – zhruba. Dat měl příliš málo a výpočetní sílu žádnou, čehož si byl rezignovaně vědom. Odhadl, že k výpočtu použitelné předpovědi by potřeboval asi 60 000 současně pracujících „computerů“, což tehdy znamenalo profesi, ne stroj.

S matematickou analýzou války to nemohlo dopadnout o nic lépe. Jak víme, měl osobní důvody se jí věnovat důkladně a dělal to. Publikoval několik knih, v nichž formuloval diferenciální rovnice válečných konfliktů a snažil se pravděpodobnostně kvantifikovat jejich parametry. Pracoval na svém problému po většinu života – i v době, kdy se sám ocitl uprostřed konfliktu enormních parametrů, druhé světové války.

Snažil se vyčíslit a zahrnout do svých modelů vše od velikosti armád po mezistátní sportovní utkání (zvyšují pravděpodobnost války, nebo naopak poskytují bezpečný ventil pro vášně?). Postupoval opatrně, byl si vědom vzájemných závislostí mezi proměnnými a nelinearit, jak ho to naučila meteorologie. Pokoušel se o předpověď politického počasí světa.

Jednou z proměnných, které mohly nebo nemusely ovlivňovat vznik konfliktu, je délka společné hranice. Richardson se údajně zarazil, když našel ve španělské učebnici délku hranice s Portugalskem uvedenou jako 987 km, zatímco v portugalské jako 1214 km. Nehledě na tuto anekdotickou příhodu, která spíš ilustruje kvalitu korektur než co jiného, začalo Richardsonovi vrtat hlavou měření hranic. A pobřeží.

Pobřeží nekonverguje

Měření křivky aproximací pomocí krátkých přímek není nic nového. Archimédes kolem roku 250 př. n. l. počítal obvod kruhu (viz [PÍ](#)) pomocí vepsaných a opsaných mnohoúhelníků; postupným zpřesňováním došel k tomu, že poměr obvodu k průměru musí být někde mezi $223/71$ a $22/7$.

Jiní došli později k daleko lepším výsledkům, ale o to ani tak nejde. Důležité je, že aproximace obvodu kruhu pomocí mnohoúhelníků – prakticky vzato tedy pomocí krátkých úseček přikládáných k jeho obvodu – konverguje. Člověk by ani nic jiného nečekal, že? Je jasné, že obvod kruhu nějakou přesnou délku má.

S délkou hranice nebo pobřeží by to intuitivně mělo být stejné. Jenže není. Lewis Fry Richardson po dlouhém rozvažování došel k závěru, že měříme-li tyčí o délce blízké se k nule, blíží se celková délka pobřeží k nekonečnu; že tedy všechna pobřeží jsou stejně, a to nekonečně, dlouhá.

Říká se tomu paradox pobřeží nebo také Richardsonův jev. Za takový objev by vám teoreticky měli buď dát Nobelovu cenu, anebo vás zavřít do blázince. Richardsonovi se nestalo ani jedno, vědecká obec si totiž jeho práce vůbec nevšimla; a všimla-li, pak ji ignorovala.

Signál v šumu v signálu v šumu

Problému s nekonečným britským pobřežím si povšiml v šedesátých letech jiný neortodoxní matematik. Benoît Mandelbrot (1924–2010) se narodil ve Varšavě, jeho rodiče byli litevští Židé. Roku 1936 rodina odešla do Francie, kde po válce Mandelbrot vystudoval prestižní École Polytechnique. Od roku 1958 žil v USA, kde pracoval ve výzkumném středisku IBM na problémech základního výzkumu.

Zabýval se tam studiem chyb telekomunikačních signálů. Při přenosu se často střídaly úseky signálu a šumu, přičemž v oblastech šumu byla

vždy místa s čistým signálem; schéma střídání úseků signál–šum v malém měřítku bylo velmi podobné tomuto schématu v měřítku větším.

To Mandelbrota vedlo k nalezení analogie s Richardsonovým problémem. Telekomunikační záznamy i čára pobřeží se vyznačují společnou vlastností, pro niž Mandelbrot zvolil název soběpodobnost. Když pozorujeme jejich výřez pod zvětšením, objeví se tvary shodné s těmi, které jsme pozorovali při větším měřítku, přičemž tento proces se opakuje donekonečna (nebo do vyčerpání možností měřicího zařízení). Soběpodobností, přinejmenším přibližnou, se vyznačuje mnoho přírodních útvarů jako mraky, hory, části rostlin a živočichů apod.

Mandelbrot své výsledky poprvé shrnul ve slavné knize *The Fractal Geometry of Nature* (1977), a jak se říká: zbytek je historie. Obrázky Mandelbrotovy množiny se potiskují trička, jsou všudypřítomné jako Einstein s vyplazeným jazykem. A většinou právě tak špatně pochopené.

Kapesní nekonečno

Útvary, které jsou soběpodobné (techničtěji řečeno, invariantní vůči změně měřítka), zná matematika už dlouhou dobu. Excelentním příkladem je Cantorovo diskontinuum (viz též [NEKONEČNO](#)), exotický útvar, poprvé svým autorem popsáný v roce 1883. Vznikne tak, že vezmeme úsečku (0,1), odstraníme z ní prostřední třetinu, tedy otevřený interval (1/3, 2/3) a pak celý postup opakujeme donekonečna: ze zbylých dvou souvislých částí opět odstraníme prostřední třetiny, a tak dále.



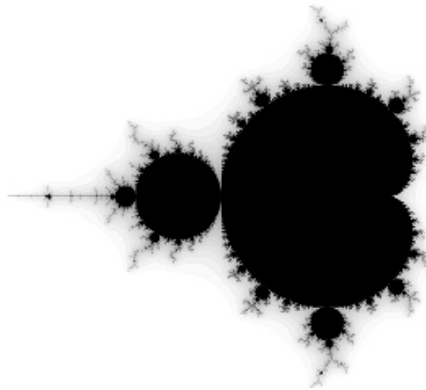
Prvních šest iterací Cantorovy množiny

V limitě vznikne množina, která je soběpodobná, nespojitá (to znamená, že v libovolně blízkém okolí každého jejího bodu lze nalézt body, které do množiny nepatří), a přesto má mohutnost kontinua (tj. počet prvků množiny je nekonečný „stejným způsobem“ jako množina všech reálných čísel).

Podobných kuriozit existuje mnohem více. Dobře známá je třeba Kochova křivka (nikoli křivka Kochové! Švédský matematik von Koch

mate, pokud jde o své pohlaví, další a další generace studentů, neboť jeho křestní jméno znělo Helge). Alternativním názvem je sněhová vločka, což výtečně sedí.

Vezmete rovnostranný trojúhelník, prostřední díl každé strany nahradíte dvěma stranami menšího trojúhelníka, obráceného špičkou ven, a pořád to opakujete. Délka Kochovy křivky roste do nekonečna. Naproti tomu plocha ohraničená touto křivkou nekonečná není. Dá se přesně spočítat a představuje osm pětiny plochy původního trojúhelníka.



Mandelbrotova množina

Což značně připomíná problém britského pobřeží: omezená plocha, ale velký (potenciálně nekonečný, věříme-li Richardsonovi) obvod.

Neceločíselné dimenze

Felix Hausdorff (1868–1942) byl německý matematik, jeden z uznávaných zakladatelů moderní topologie. Vedle ní se zabýval analýzou a teorií množin. Na pomezí těchto tří oblastí vznikl pojem, který dnes nese název Hausdorffova dimenze.

Hausdorffovy dimenze

- 1 ■ Přímka
- 1,02 ■ Pobřeží Jihoafrické republiky
- 1,25 ■ Pobřeží Velké Británie
- $\log 4 / \log 3 = 1,26$ ■ Kochova křivka
- 1,52 ■ Pobřeží Norska
- 2 ■ Standardní dvojrozměrný útvar (např. čtverec)
- 2 ■ Mandelbrotova množina
- 2,33 ■ Povrch kvěťáku
- přibližně 2,5 ■ List papíru zmuchlaný do koule

- 2,66 ■ Povrch brokolice
- 2,79 ■ Povrch lidského mozku
- 2,79 ■ Povrch plic
- 3 ■ Standardní trojrozměrný útvar (např. krychle)

Topologická dimenze je prostě to, čemu v běžném životě říkáme počet rozměrů: úsečka je jednorozměrná (takže její topologická dimenze je rovna jedné), čtverec dvourozměrný, krychle trojrozměrná. „Plocha“ i „objem“ úsečky jsou nulové – jediné, co lze měřit u úsečky, je její délka. „Délka“ čtverce (nikoli jeho obvodu, to jsou dvě různé věci!) je nekonečná, zatímco jeho objem nulový, měřit lze pouze jeho plochu. Pro krychli platí, že její „délka“ i „plocha“ – jde o natolik neadekvátní pojmy, že se samy vnucují do uvozovek! – jsou nekonečné, a má tedy smysl měřit pouze její objem. Pro každý z těchto útvarů existuje jedna jediná vhodná dimenze, která umožňuje měřit, přiřazovat číselné hodnoty a porovnávat, který objekt je menší a který větší.

Hausdorffova dimenze je zobecněním pojmu topologické dimenze. U jednoduchých geometrických útvarů je jí číselně rovna. Kochova křivka takovým jednoduchým útvarům není: ani čára, ani plocha. Dá se odvodit, že její Hausdorffova dimenze je rovna $\log 4 / \log 3 = 1,2618$. Topologická dimenze této křivky je ovšem rovna jedné, vždyť stále jde o křivku v rovině.

Benoit Mandelbrot o mnoho let později zavedl speciální název pro množiny, jejichž Hausdorffova dimenze je větší než dimenze topologická. Dal jim název fraktály. Sestrojil také několik působivých konkrétních příkladů matematických fraktálů, z nich nejznámějším je výše zmíněná Mandelbrotova množina.

Jak je vidět, fraktální charakter mají mnohé útvary z přirozeného světa, což je nejsilnějším argumentem pro rozvoj fraktálové geometrie: nejde o pouhou matematickou abstrakci, ale podle všeho o odhalení významných skutečností týkajících se světa, ve kterém žijeme, skutečností dříve skrytých.

Co zbývá dovyprávět

Lewis Fry Richardson zemřel o rok dříve, než BBC odvysílala první televizní předpověď počasí. Navzdory vší nepřízni osudu byl podle všeho spokojený a vyrovnaný – prvotřídní vědec, který si víc než slávy a kariéry cenil klidu na přemýšlení. Žil v době, která pacifistům nejen nepřála, ale ještě se jim vysmívala do očí.

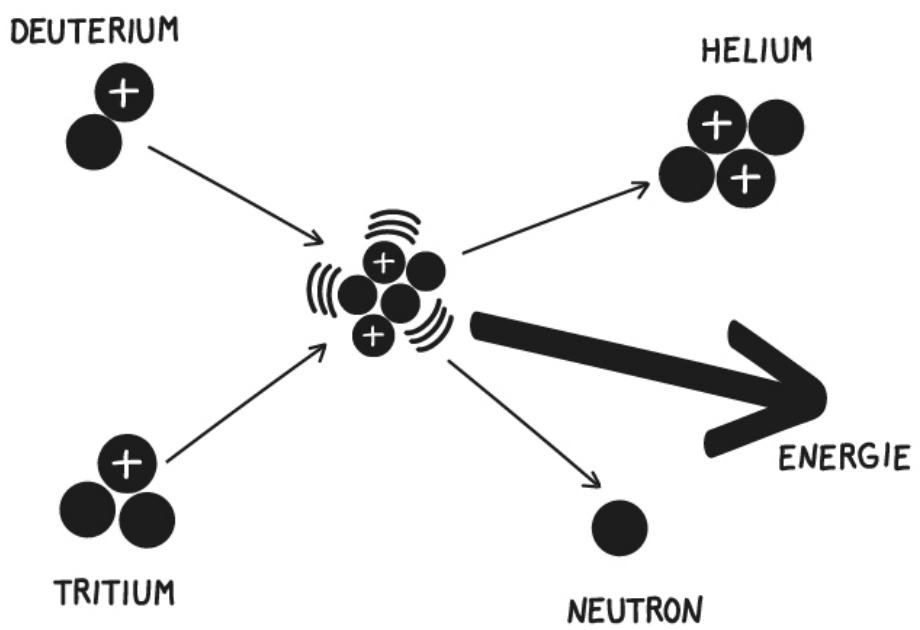
Benoit Mandelbrot zemřel v roce 2010 ve věku 85 let. Byl profesorem matematiky na Yale. Jeho posmrtně vydaná autobiografie je pečlivým, pomalým vyprávěním o dvacátém století.

Felix Hausdorff byl Žid, stejně jako Mandelbrot. V roce 1935 ho vyhodili z bonnské univerzity, zakázali mu i přístup do knihovny. Přesto s pomocí přátel dál vědecky pracoval – půjčovali mu knížky i peníze. Usiloval o emigraci do USA, ale neuspěl. V lednu 1942 spáchal sebevraždu spolu se svou manželkou a její sestrou. Vyčkali, dokud nedostanou povolávací rozkaz do koncentračního tábora. Bylo mu sedmdesát tři let.

Fraktály, soběpodobnost a Hausdorffova dimenze nám pomáhají lépe rozumět světu. Nic z toho není převratná záležitost, nic z toho není příliš efektní, i ta Mandelbrotova množina se dávno okoukala. Když se podíváte zblízka, uvidíte, že se celá ta velká struktura poznání a osudů v malém opakuje. Žijeme uvnitř fraktálu.

Fúze

Těžká atomová jádra se mohou štěpit. Lehká se mohou slučovat. V obou případech se uvolňuje energie.



Koncem února 2019, několik dnů před svými třináctými narozeninami, dokončil Jackson Oswald z Memphisu v Tennessee stavbu zařízení, v němž probíhá jaderná fúze. Jádra atomů deuteria se tam slučují, mění se na helium a uvolňují energii.

Jinde v této knize (viz [JADERNÁ BOMBA](#)) se dočtete, jak těžké je dosáhnout fúze a kolik úsilí museli vědci vyvinout, než objevili cestu k fungující termonukleární zbrani. Mimo jiné se tam dozvíte, že k zažehnutí fúze je zapotřebí konvenční atomový výbuch uranu či plutonia. Zpráva o Jacksonovi v téhle souvislosti působí buď jako omyl, nebo jako prvořadá senzace.

Ve skutečnosti není ani jedním, ani druhým.

Jackson Oswald je určitě nesmírně šikovný a motivovaný kluk, který navíc má [velmi chápavé rodiče](#) – zpráva uvádí, že postupně nakoupil součástky za deset tisíc dolarů. Zaslouží si publicitu a dost možná ho čeká výhodné stipendium na dobré univerzitě.

Což je v těchto případech zvykem. Protože Jackson z Tennessee není ani zdaleka první. Štolní zařízení produkující vodíkovou fúzi jsou dokladem technického umu svých tvůrců. Nepředstavují však žádnou novinku – princip i výrobní postup je dobře známý – a rozhodně nemají žádný význam z hlediska výroby energie. Energii neprodukují, ale spotřebovávají.

Hlavním znakem prakticky použitelné jaderné fúze by měl být opak. Z dostupné suroviny, prakticky jen z vody, by měla víceméně bezodpadově, levně a bezpečně vyrábět elektrickou energii v libovolném množství. A to všechno, ujišťují nás vědci působící v oblasti jaderné fúze, se stane během patnácti, nanejvýš dvaceti let. Což vypadá skvěle.

Potíž je v tom, že tento slib – během patnácti, nanejvýš dvaceti let – pronášejí odborníci už dlouho. Zhruba od roku 1950.

Síly spoutané v jádru

Jádro atomu je tvořeno subatomárními částicemi – protony a neutrony. To vám řeknou na střední škole. Co vám tam zatají, je odpověď na otázku, jež je nabíledni: jak to, že jádro drží pohromadě? Shodné elektrické náboje se přece odpuzují. Jádro tvořené kladně nabitými protony by se mělo okamžitě rozletět na všechny strany. Žádný jiný chemický prvek než vodík, jehož jádro je tvořeno jediným protonem, by neměl existovat.

Jenže existuje, protože (viz též [KVARK](#)) v jádru atomu působí další síla. Působí jen na velmi malou vzdálenost – právě v rozsahu jádra – a je velmi silná, mnohem silnější než elektrické odpuzování. Fyzikové ji s naprostým nedostatkem fantazie nazvali silnou silou (strong force).

Hmotnost jádra atomu je vždy trochu nižší než součet hmotností příslušných protonů a neutronů. Příčinou je právě síla, která drží jádro

pohromadě. Podle Einsteinova vzorce $E = mc^2$ jsou energie a hmotnost totéž, číselně se dají navzájem převádět. To, co chybí v bilanci hmotnosti, je v jádru přítomno v podobě energie. [Obrovského množství energie](#), protože převodní faktor v Einsteinově rovnici – druhá mocnina rychlosti světla – je obrovské číslo.

Největší silou drží pohromadě atomy středně těžkých prvků – vazebná energie jádra dosahuje maxima u železa a niklu. Jádra lehčích prvků se mohou (ne snadno a ne za jakýchkoli podmínek, ale mohou) sloučit a přitom se uvolní energie. Jádra těžkých prvků se zas mohou rozpadat (někdy i spontánně), rovněž s uvolněním energie. Tomu druhému procesu se říká štěpení (angl. fission), používá se v uranových a plutoniových bombách a v jaderných elektrárnách. První proces se nazývá jadernou fúzí (fusion), trvale probíhá ve hvězdách a krátkodobě při odpálení vodíkové bomby.

Otázka zní: dá se fúze využít pro výrobu energie, stejně jako štěpení?

Dokonalý stroj na nebi

Rozhodně ano, když máte k dispozici hvězdu. Průměrná hvězda – tedy taková, která se podobá našemu Slunci – je tvořena z 90 % vodíkem, z 9 % heliem a zbytek připadá na různé další prvky lehčí než železo.

Každá taková hvězda kdysi vznikla z velkého vodíkového oblaku. Jak se jeho částice gravitačně přitahovaly, zahušťoval se. Rostla rychlost pohybu atomů, množství jejich srážek, a tím tlak a teplota. Přibývalo takových srážek, kdy se jádra vodíku spojila, vytvořila jádro helia a uvolnila energii. Nakonec se zažehla stálá termionukleární reakce, díky níž hvězda svítí a hřeje.

Kdyby hvězda nebyla tak velká a těžká, jaderná fúze by ji rozmetala, stejně jako rozmetá vodíkovou bombu. Obrovská hmotnost však znamená obrovskou gravitaci, která drží ten permanentní výbuch pohromadě. Když se nitro hvězdy přehřeje, fúze nabude převahy nad gravitací a hvězda se zvětší. Tím klesne tlak v jádru a poklesne intenzita fúze. Tento zpětnovazební mechanismus hvězdu stabilizuje – až do doby, kdy jí začne docházet vodík, což se dřív či později musí stát, ale zde začíná zas jiná pohádka: o supernovách, bílých trpaslících a tak dále (viz [ČERNÁ DÍRA](#)). Pro nás je podstatné, že tento mechanismus nemůžeme napodobit. Funguje jen díky ohromným rozměrům hvězdy.

Jak ukrást kus hvězdy

Přesto byli první průkopníci jaderné fúze optimističtí. Zdálo se jim totiž, že rychle našli náhradu za sluneční gravitaci. Své maličké umělé

slunce chtěli spoutat magnetickým polem.

Což je vynikající nápad. Vysoce přehřátý plyn reaguje na magnetické pole, protože už plynem v běžném smyslu slova není. Při velmi vysokých teplotách se rozpadnou atomy, plyn se změní ve směs záporně nabitých elektronů a kladných jader. Jde o další skupenství hmoty, kterému se říká plazma.

A kus plazmatu se dá omezit a tvarovat elektricky a magneticky. Dá se uzavřít do neviditelné nádoby tvořené magnetickým polem – ostatně je to jediná možnost, protože jakákoli reálná nádoba by se ve styku s plazmatem rychle vypařila.

Stejnými nástroji, tedy vysokým napětím a elektrickými cívkami, jež vytvářejí magnetické pole, se dá plazmatu dodávat energie. A pokud je výchozím materiálem deuterium, velmi vhodné pro fúzní reakci, pak zbývá už jen vymyslet pro reaktor jméno, všechno pojede jak po másle.

Jméno vymysleli, což o to. V Americe to byl Stellarator, ve Velké Británii ZETA (Zero Energy Thermonuclear Assembly – k té „nulové energii“ se za chvíli vrátíme) a v Sovětském svazu Tokamak, z těch tří zdaleka nejúspěšnější. Na základě teoretických prací Igora Tamma a Andreje Sacharova ho postavil Natan Javlinskij v nynějším Kurčatovově institutu v Moskvě. Další vývoj Tokamaku je spojen hlavně se jménem Lva Arcimoviče.

Podivné slovo Tokamak je akronymem z ruského názvu „toroidalnaja kamera s magnitnymi katuškami“, což je vlastně popis vzhledu celého zařízení. Toroid je jakákoli věc prstencového tvaru, trubka uzavřená do kruhu – třeba plovací kolo. „Katuška“ je cívka. Tokamak spoutává horké plazma v uzavřené kruhové rouře pomocí magnetického pole, které trubku ovíjí jako šroubovice. Americké a britské přístroje, používající jiná prostorová uspořádání, byly méně úspěšné. Když se v šedesátých letech aspoň částečně obnovila komunikace mezi vědci z obou stran železné opony, začal Západ stavět své vlastní tokamaky. Dodnes jde o nejnadějnější konstrukci fúzního reaktoru. Mnozí by však mohli poznamenat, že naděje už není v téhle souvislosti příhodné slovo.

Auto, které nechytá

„Zero energy“ v názvu ZETA znamená, že fúzní reaktor vyrobí tolik energie, kolik se do něj vloží, bude tedy mít nulovou bilanci. V roce 1957, kdy Britové toto zařízení spustili, to byl nepřiměřeně optimistický název. V roce 2019 nepřiměřeně optimistickým zůstává.

Problém všech fúzních zařízení, od těch největších a nejmodernějších po stolní přístroj Jacksona Oswalta, je stejný. Vodíkové palivo – deuterium a tritium (viz [JADERNÁ BOMBA](#)) – se dá přinutit ke slučování jader, ale jen po dobu, dokud mu dodáváme energii zvenčí. Žádoucí řetězovou reakci se nedaří rozběhnout. Situace je podobná jako u auta, jehož startér

nefunguje dobře. Auto může taky jen trochu poskočit, ale nerozjede se. Fúzní reaktory produkují trochu energie. Ale víc jí spotřebují.

A stejně jako startér nemůžete mačkat pořád, ani ta nedostatečná produkce energie z fúze není trvalá. Dá se udržet po krátkou dobu, většinou zlomky sekund.

Proč se tedy vůbec ve výzkumu pokračuje? Za prvé a především – zas tak moc se nepokračuje. Financování výzkumu fúze vázne i v těch nejbohatších zemích, mimo jiné proto, že nedostatkem energie lidstvo momentálně netrpí. Nastoupily obnovitelné zdroje, technologie jaderných elektráren se štěpným palivem se značně zdokonalily, umíme odsiřovat uhlí a také jsme se naučili energii aspoň trochu šetřit.

Za druhé: pořád se hraje o vysokou sázku. V jaderné fúzi jsou potenciálně obrovské peníze. A není známo, že by jí v principu něco bránilo. Jen technické detaily reaktorů. To přece jednou vyjde, říkají si někteří.

Za třetí: moc se o tom nemluví, ale utichnutí závodů ve zbrojení představuje pro supervelmoci problém. Nemají práci pro vysoce kvalifikované nukleární zbrojní specialisty. Nemohou otestovat, jestli je jaderná hlavice vyrobená před třiceti lety stále ještě funkční. Výzkum fúze představuje aspoň nouzovou možnost, jak tyto potíže řešit.

Za čtvrté: objevila se nová nadějná technologie, která nepotřebuje strašlivě silná magnetická pole.

Laser jako nová naděje

Laser (viz [samostatné heslo](#)) je jedním z nejužitečnějších a nejuniverzálnějších vynálezů dvacátého století. Jde o zdroj světla, jaký nemá obdoby. Dá se soustředit do velmi úzkého paprsku, který může nést mimořádně velkou energii.

Když tedy vezmeme nepatrné množství fúzního materiálu, namíříme na něj několik vysokoenergetických laserů a zapneme je, pak... Ano, může dojít k fúzi. To je princip tzv. inerciálního udržení, které dnes soupeří s tokamaky. Hlavním světovým centrem této technologie je National Ignition Facility (NIF), které se nachází v Kalifornii a je součástí vyhlášené Lawrence Livermore National Laboratory, jednoho z hlavních středisek amerického zbrojního výzkumu. (Odtud pocházejí i výkonné lasery, které se používají v evropském výzkumném centru ELI Beamlines v Dolních Březanech u Prahy.)

Potíž inerciálního udržení je v tom, že slovo „udržení“ je eufemismem. Fúzní reakce je udržitelná jen po tu dobu, kdy jsou lasery zapnuté, tedy po zlomky sekundy. Pak jim dojde energie, kterou jsou nabitě, a kromě toho se přehřejí. Jde o základní výzkum, ne o energeticky užitečnou výrobu.

Zakázaná cesta

O studené fúzi před fyziky raději moc nemluvte. A před chemiky už vůbec ne. Byli to právě dva chemici, kteří celou tu záležitost spískali, a jejich jména se ve slušné vědecké společnosti nevyslovují. Mý si je samozřejmě řekneme: Martin Fleischmann a Stanley Pons.

Oba měli slušné renomé, Fleischmann se prosadil díky objevům v elektrochemii, které vypadaly podivně, ale nakonec se potvrdily. Takže když v roce 1989 oznámili svou velkou věc, dostalo se jim celkem nadšené reakce, v níž bylo jen málo skepse.

A skepsi zpočátku nevyvolal obsah oznámení, jen jeho forma. Ještě před publikováním příslušného odborného článku, což je ve vědě standardní způsob komunikace, totiž svolali tiskovou konferenci, kde oznámili, že dovedou jadernou fúzi spustit při pokojové teplotě, bez náročného vybavení a s kladnou energetickou bilancí.

Jejich fúzní zařízení sestávalo z nádoby s těžkou vodou, z drátů připojených k baterii a z tyčinky paladia. Paladium je těžký kov, o němž je známo, že dobře absorbuje vodík. Dokáže ho v obrovském množství vtáhnout do své krystalové mřížky. Co kdyby se v paladiu namačkaly atomy deuteria k sobě tak hustě, že by se začaly slučovat?

To by byla obrovská věc; asi největší přiblížení k perpetuu mobile, na jaké by si lidstvo mohlo troufnout pomyslet.

Blížkost perpetua mobile má bohužel jeden zvláštní efekt: zatemňuje mozek. Jinak se totiž chování Fleischmanna a Ponse nedá vysvětlit. Zpočátku jen zveřejnili neúplné a neproověřené výsledky. Pak začali kličkovat. Nakonec (asi) falšovali data. Výzkum byl financován vládou a postup obou vědců proto měl potenciálně kriminální charakter, šlo o zneužití veřejných fondů, na což Amerika bývá háklivá. Zachránili se nakonec odchodem do Francie, kde ještě pár let pracovali na studené fúzi pro japonské investory. Bez výsledku.

Podobný příběh se od té doby odehrál ještě několikrát. Studená fúze má i nadále blízko k perpetuu mobile, teď však v tom nejhorším smyslu slova: když se k ní ve vědecké komunitě přihlásíte, nikdo se vás už nedotkne ani třímetrovým klackem. Aby si nepošpinil/a životopis.

Ani o studené fúzi však není známo nic, co by ji vylučovalo. Neexistuje žádný fyzikální zákon, který by porušovala. Jednou ji někdo může objevit. Ale neradím vám vsadit si na to.

ITER to nevyřeší

Totéž platí o fúzi horké, ať už magnetické, nebo laserové. Může být k dispozici za těch příslovečných dvacet let. Nebo dokonce trochu dřív,

podle toho, kdy se doopravdy dokončí mezinárodní projekt ITER, největší tokamak světa. Nebo až v příštím století, případně nikdy.

ITER je pozoruhodná záležitost technicky i politicky. Projekt vznikl v roce 1988, tehdy ještě jako důležitý projev mírové spolupráce mezi USA a Sovětským svazem. V devadesátých letech do projektu postupně vstupovaly různé jiné země a zas odstupovaly, vlekla se jednání o lokalitě a pochopitelně chyběly peníze. Země, které už svá fúzní zařízení provozovaly, zejména USA, se jich nechtěly vzdát, což by však bylo nejspíš nutné z finančních důvodů.

Dnes je ITER v pokročilé fázi výstavby – s obrovským zpožděním proti plánu, ale přece. Nachází se ve Francii poblíž Marseille. Prostřednictvím členství v EU se na projektu podílí i Česká republika. Spuštěn by měl být roku 2025 a měl by mít produkci energie větší než spotřebu. Jenže jen na několik minut. Je to mnohem lepší než jakýkoli dosavadní výsledek, ale pořád to není stabilní jaderná fúze. A předem se ví, že nebude, přestože cena zařízení určitě překročí 20 miliard euro. Jde zas jen o dílčí krok.

Ostatně i kdyby nějaký budoucí tokamak či laserový fúzor zapálil trvale udržitelnou fúzi, pořád to ještě není elektrárna. Zda by se provoz takového zařízení, byť úspěšného, vyplatil ve srovnání s dnešními energetickými zdroji, zatím nikdo neřeší. Není k tomu důvod, je to čistě hypotetická otázka, odpověď na ni však rozhodně není jednoznačné ano.

Pořád na začátku

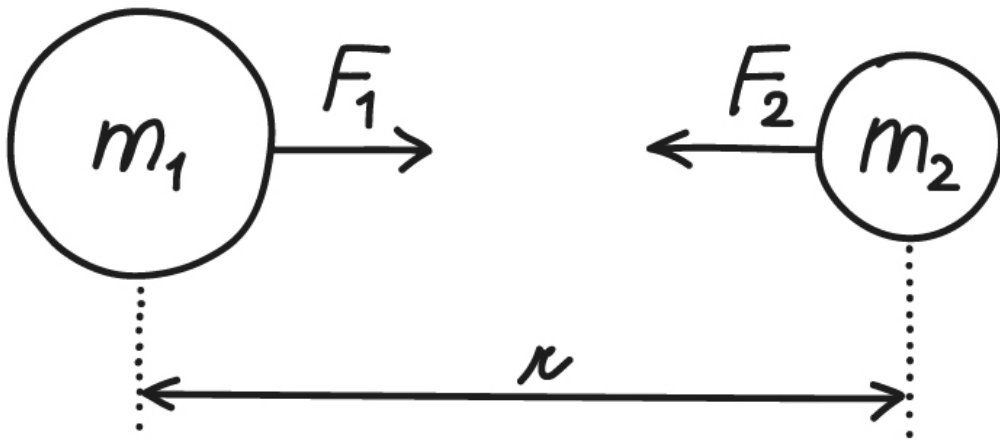
Projekt Jacksona Oswalta byl podstatně levnější. Amatéři stavějí stolní „fúzory“ od konce šedesátých let. Nejtypičtější design sestává ze dvou drátěných koulí, vnější a vnitřní. Vysoké napětí mezi nimi přitahuje kladně nabitá atomová jádra do středu zařízení. Tam se srážejí ve velmi malém prostoru, a jsou-li dostatečně urychlena – což záleží na rozdílu napětí –, některá z nich fúzují a uvolní energii. Pracovní látkou bývá opět deuterium (nic levného: litr těžké vody stojí kolem čtyřiceti tisíc korun).

Navenek se to projeví efektní oslnivou září, která však není nijak nebezpečná, přestože jádra mají teplotu vnitřku Slunce – kolem 45 milionů stupňů. Jsou však natolik maličká, že vás nepopálí, nezapálí dům, z reaktoru neuniká radioaktivita. Je to vlastně jen trochu podivná a zbytečně drahá oblouková lampa.

Stolními fúzory nepohrdnou ani profesionální vědci. Mohou tak levně a bezpečně zkoumat aspoň některé vlastnosti jevu, jehož praktické využití je nadále... jen ve hvězdách.

Gravitace

Veškerá hmota se přitahuje navzájem.



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Jestli existuje nějaký fyzikální jev známý a srozumitelný každému, pak to je gravitace: když upadneš, natlučeš si, když spadneš z velké výšky, může tě to zabít. Jestli existuje nějaká záhada, s níž si fyzika neví rady, pak je to gravitace: nezapadá do jinak velmi konzistentního modelu světa vycházejícího z kvantové teorie (viz [KVANTUM](#)).

Učit se fyzice znamená odnaučovat se zdravému rozumu. Anebo, pokud by vám to znělo příliš drasticky, odnaučovat se těm částem zdravého rozumu, které nás nutí vidět svět mylně. Vezměte si jen takovou maličkost, že v gravitačním poli padají všechny předměty stejnou rychlostí! Naprosto to odporuje každodenní zkušenosti; každý přece ví, že kilové závaží dopadne na zem dřív než list papíru. Těžší předměty padají rychleji, zdá se... jenže to není pravda.

Abychom viděli, že to není pravda, musíme však odstranit všechny rušivé vlivy, především odpor vzduchu. Dnes si díky rozmachu různých „vědeckých parků“ (díky za ně, je to báječná věc!) může každý dopřát pohled na to, jak ve vakuové skleněné trubici padá pírkó a hřebík – přesně stejně. Jako první na to přišel Galileo Galilei, nikoli úvahou, ale velmi pečlivě prováděnými experimenty (bez vakua, to neměl k dispozici).

Jablkem do hlavy

O padesát let později Isaac Newton geniálně uhodl, že přitažlivost je univerzální síla: Země přitahuje padající jablko, ale jablko zároveň přitahuje Zemi, jen s ní pohne o hodně méně než Země s jablkem, protože je o hodně lehčí. Gravitační síla, kterou na sebe dvě tělesa působí, je přímo úměrná součinu jejich hmotností a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti mezi nimi. (Historika s jablkem je téměř určitě vymyšlená nebo přibarvená, ale komu to vadí? Jabloň, o které se soudí, že je ta pravá, pečlivě chráněná plůtkem, pořád ještě stojí a můžete se na ni jít podívat, což je milé a velmi, převelice anglické.)

Jinými slovy: „přitažlivou mocí“ nedisponuje jen Země (nebo jiná speciální tělesa), ale hmota jako taková, a to úměrně svému množství.

V nevelké vzdálenosti od zemského povrchu a při zanedbání odporu vzduchu padají tělesa se zrychlením: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. To znamená, že během první sekundy dosáhnete rychlosti 10 m/s neboli 36 km/h. Na konci druhé sekundy budete mít rychlost 20 m/s, na konci třetí sekundy 30 m/s čili 108 km/h, což zní už zcela smrtelně, však také k pádu trvajícím tři sekundy potřebujete výšku 45 m.

Obecně platí, že rychlost volného pádu $v = g \cdot t$, dráha volného pádu je $s = 0,5 \cdot g \cdot t^2$ a rychlost dopadu z výšky h je $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$. To jsou ovšem teoretické hodnoty pro vakuum. Odpor vzduchu roste nelineárně s rychlostí (zhruba s její druhou mocninou), závisí také na poměru hmotnosti tělesa a plochy kolmé na směr pádu (proto list papíru padá pomalu, olověná kulička rychle), na charakteru proudění kolem tělesa

(laminární nebo turbulentní – to je obrovské téma samo o sobě) a samozřejmě také na hustotě vzduchu, která rychle klesá s nadmořskou výškou.

Přesto je situace vlastně jednoduchá. Při dostatečně dlouhém pádu v atmosféře se síla odporu vyrovná gravitační síle, takže padající těleso už nezrychluje a pokračuje stálou rychlostí. Ta činí pro lidské tělo při normální hustotě vzduchu asi 180 km/h, takže bez padáku nemáte šanci (až na [neuvěřitelné výjimky](#)). Při pádech z velké výšky lze tuto rychlost na nějakou dobu výrazně překročit právě kvůli řidšímu vzduchu, proto Felix Baumgartner při svém slavném skoku z výšky 39 km dosáhl na chvíli rychlosti 1350 km/h.

Nebeská mechanika

[Isaac Newton](#) výtečně popsal fungování vědy svým slavným výrokiem: „Jestliže jsem viděl dál než ostatní, bylo to proto, že jsem stál na ramenou obrů.“ (Porovnejte s parafrází, kterou používal Murray Gell-Mann – viz [KVARK](#).) Největším z těch obrů byl v jeho případě Galilei, ale hned po něm následuje Johannes Kepler, známá postava rudolfínské Prahy – dokonce tak známá, že si ho Češi rádi, neprávem ovšem, přivlastňují jako krajana.

Kepler byl asistentem Rudolfova dvorního astronoma Tycha de Brahe. Ten byl především vynikajícím pozorovatelem a Kepler, spíše teoretik, těžil z jeho obsáhlých a kvalitních dat. Mezi oběma muži byl generační rozpor. Brahe nevěřil v Koperníkovu heliocentrickou soustavu, Kepler o ní nepochyboval a postavil ji na pevný základ. Z dat odvodil tři tzv. Keplerovy zákony pohybu planet: za prvé, planety obíhají Slunce po elipsách, Slunce je jedním z ohnisek každé takové oběžné dráhy. Za druhé, když je planeta blíž ke Slunci, pohybuje se rychleji. Za třetí... [to teď není důležité](#). Keplerovi muselo být jasné, že planety na oběžných drahách drží nějaká síla, o jejím charakteru ale nepřemýšlel. (A pokud přece, nepublikoval to.)

Newton však ano. Keplerovy práce znal a dovedl si je spojit se svým jablkem. Pochopil a popsal (i když větší část této úvahy před ním patrně provedl jeho kolega a soupeř [Robert Hooke](#)), že pohyb planety kolem Slunce (nebo Měsíce kolem Země) je ve skutečnosti součtem dvou pohybů: volného pádu lehčího tělesa směrem k těžšímu a současného pohybu lehčího tělesa po přímce – tečně oběžné dráhy. Jiná otázka je, odkud se vzal ten pohyb po přímce – hodně rychlý, jinak by se nesložil s volným pádem do věčného oběhu (viz [ORBITA](#)), ale do spirály končící ve Slunci. Jakžtakž přijatelnou odpověď najdeme v obecně uznávané [hypotéze vzniku Sluneční soustavy z akrečního disku](#) a v zákonu zachování momentu hybnosti. Ve skutečnosti však nikdo do všech důsledků neví, proč se nebeská tělesa pohybují rovnoměrným přímočarým pohybem, odkud se tahle složka jejich pohybu vzala

Váha, tíha a hmotnost

Běžně říkáme, že to či ono váží kilo či dvě, fyzikové ale termín váha nepoužívají a neradi to vidí u jiných. Rozlišují hmotnost a tíhu, což jsou vzájemně nezaměnitelné veličiny – každá z nich se měří v jiných jednotkách! Tíha je jednodušší: je to síla, kterou těleso v gravitačním poli působí na podložku (a je tedy zhruba úměrná bolesti, kterou pocítíte, když si ho upustíte na nohu). Těleso o hmotnosti 1 kg působí na zemském povrchu tíhou zhruba 10 newtonů (přesněji 9,81 N, protože $F = m \cdot g$, viz výše). Na Měsíci je gravitační zrychlení zhruba šestkrát menší, takže 1 kg tam působí tíhou asi 1,6 N, a když vám spadne na nohu, bude to bolet méně. Na Mezinárodní vesmírné stanici je tíha nulová, protože stanice je ve volném pádu vůči Zemi.

Tím jsme však stále ještě neodpověděli na otázku, co to je hmotnost. Definice zní, že jde o „vlastnost hmoty, který vyjadřuje míru jejích setrvačných nebo gravitačních účinků“, jinými slovy o míru množství hmoty. Hmotnost se nemění, na Zemi, na Měsíci i na ISS je pořád stejná. Přesněji řečeno, nemění se, dokud se těleso nepohybuje. Pak to začne být složitější kvůli teorii relativity.

Ta nás nutí rozlišovat klidovou a relativistickou hmotnost. Zatím jsme mluvili o klidové. Hmotnost pohybujícího se tělesa roste (viz [RELATIVITA](#)), což ovšem neznamená, že by přibývalo množství látky v tělese! Situace je stejná jako při paradoxu dvojčat: jde o to, zda hmotnost pozorujeme zvenčí, nebo zevnitř – z pozice stacionárního, nebo pohybujícího se pozorovatele.

A už úplně jiná otázka je, jak se přitažlivá síla přenese například od Slunce k Zemi.

Hlas pulsaru

Existence gravitačních vln plyne z rovnic obecné relativity zcela jasně. Měla by je vyvolávat oscilace hmoty, právě tak jako oscilace elektrického náboje vytváří elektromagnetické vlny. Gravitační vlny by se měly projevovat jako drobné záchvěvy struktury prostoročasu (přesněji řečeno jen jedné jeho prostorové složky – v rovině kolmé na směr šíření vlny). A mělo by jich být všude kolem nás plno, měly by přicházet z hlubin vesmíru všemi směry. Na rozdíl od světla a jiných elektromagnetických frekvencí totiž gravitační vlny procházejí vším, nelze je nijak odstínit nebo pohltit. Zbývalo tedy jen postavit nějaké to gravitační rádio – přijímač vln.

Háček je v tom, že žijeme v silném gravitačním poli a všude kolem nás je spousta vibrujících hmot, což dohromady vytváří tak silný gravitační šum, že signál se v něm spolehlivě ztratí. Napřed proto byly gravitační vlny zpozorovány nepřímou metodou, což není dokonalé, ale je to rozhodně lepší než nic.

Pomocí radioteleskopu v Arecibu na Portoriku objevili roku 1974 dva američtí astronomové – Joseph Taylor a Russell Hulse – neobvyklý pulsar. Tímto termínem se označuje periodický rádiový zdroj polohou a vzdáleností odpovídající hvězdě. Dnes se pokládá za jisté, že pulsary jsou rychle rotující tzv. neutronové hvězdy, tedy zbytky po výbuchu supernovy, a pulsy souvisejí s extrémně silnými magnetickými poli, která by se v nich měla vyskytovat. Detailní mechanismus znám ovšem není.

V sedmdesátých let byly pulsary žhavou novinkou, první objevila Jocelyn Bellová teprve v roce 1967, a dokonce se chvíli zvažovalo, že jde o signály mimozemských civilizací. Pulsar PSR 1913+16, který objevili Taylor a Hulse, se ukázal být dvojhvězdou. Taková soustava je dokonalou ukázkou oscilátoru. Existují-li gravitační vlny, musí je vysílat. Změřit je přímo není možné, ale dá se spočítat, kolik energie by měl pulsar ztrácet vyzařováním gravitačních vln a co by to mělo dělat s jeho rádiovou frekvencí. Taylor a Hulse naměřili hodnoty odpovídající teoretickým. Alternativní vysvětlení sice lze vymyslet, ale vesměs jsou komplikovanější než existence gravitačních vln; práce obou radioastronomů byla proto přijata jako nepřímý důkaz a mnohem později oceněna Nobelovou cenou.

Průkopníkem přímého měření byl americký fyzik Joseph Weber. Jeho detektory byly, jak dnes víme, o pět desítkových řádů méně citlivé, než by bylo třeba, takže nenaměřil nic. Přišel však na velmi důležitý princip: chceme-li vyloučit nahodilé odchylky, které může způsobit třeba auto jedoucí půl kilometru od přístroje, pak musíme měřit současně na dvou či ještě více místech co nejvzdálenějších od sebe. Weberovými detektory byly těžké kovové tyče, co nejlépe izolované od všech vlivů prostředí. Průchod vln je měl měřitelně rozechvět (a kdyby byly o zmíněných pět řádů citlivější, snad by se to skutečně stalo). Kdyby se rozechvěly dvě či více najednou, byl by to silný náznak, že nejde o šum. (Přesněji řečeno: ne úplně najednou, to by bylo špatně. Detekci signalizuje zpoždění odpovídající co nejpřesněji vzdálenosti mezi oběma detektory. Tento princip se využívá u všech podobných měření dodnes.) Weber občas skutečně něco naměřil, ale zpětně se vše vyhodnotilo jako falešný poplach. Kromě toho se nikomu dalšímu nepodařilo jeho zdánlivé výsledky reprodukovat. Mezi fyziky rostla skepse a frustrace. Ale také se zrodila nová technologie.

Lovci gravitačních vln

Vlastně ne zas tak nová. Lovci gravitačních vln si vzpomněli na starý interferometr, tedy přístroj, s jehož pomocí Michelson a Morley vyvrátili roku 1887 hypotézu o existenci éteru. Dnešní fyzici použili beze změn starý princip, jen ho trochu přizpůsobili pro své účely – a samozřejmě postavili přístroj mnohem přesnější, než to bylo možné v devatenáctém století.

Vezmete laserový paprsek (ten také Michelson a Morley neměli, a jak by se jim byl hodil!) a rozdělíte ho hranolem na dva. Ty vyšlete do dvou

vzájemně kolmých směrů – interferometr má dvě dlouhá ramena spojená do tvaru L. Na konci ramen jsou zrcadla. Když se zrcadla nepatrně pohnou dopředu či dozadu („nepatrně“ znamená o zlomek vlnové délky použitého světla), pak se odražené paprsky nespojí přesně, jeden bude vůči druhému trochu posunutý a jejich složením vznikne interferenční obrazec s maximy a minimy. Princip je prostý, jen musíte zařídit, aby ta zrcadla byla zcela dokonalá, aby se žádná z částí interferometru nemohla sebeméně hnout sama od sebe (a pokud ano, aby to pohltit některý z mnoha kompenzačních mechanismů), prostě takové ty maličkosti, které stojí čtvrt miliardy dolarů a trvají pětadvacet let.

(Jen každé z třiceticentimetrových zrcadel stojí půl milionu dolarů. Váží dvacet kilo a je vyleštěné tak, že hrbolky nesmějí přesahovat pět miliontin milimetru. Na jedno z nich jim jednou upadl šroubek. A bylo po zrcadle.)

LIGO se skládá ze dvou stejných měřicích jednotek. Obě se nacházejí v USA, jedna v Louisianě, druhá ve státu Washington. Každá z větví měří kolem 4 km. Jejich konce musí být zdviženy oproti terénu, aby se kompenzovalo zakřivení Země.

Základní nápad dostal roku 1972 Rainer Weiss na MIT. O rok či dva později se pro jeho myšlenku nadchl Kip Thorne. Oba se stali předními průkopníky pátrání po gravitačních vlnách a stáli u vzniku projektu LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Ten oficiálně započal před 35 lety, v roce 1984.

Před čtyřmi lety, v létě 2015, byla aparatura LIGO osazena citlivějšími detektory. 14. září 2015 ji poprvé v tomto uspořádání zapnuli. Téhož dne prošly Zemí gravitační vlny. A LIGO je zachytilo.

Po půlročním ověřování svůj objev zveřejnili. Trval dvě desetiny sekundy. Zahrnoval frekvence od 35 do 250 Hz. A nešlo o planý poplach. Na získání jistoty oceněné jako „pět sigma“ (pravděpodobnost omylu menší než tři miliontiny) padlo těch šest měsíců.

Odkud přišly gravitační vlny, které LIGO zachytil, a co je způsobilo? Šlo o srážku dvou černých děr ve vzdálenosti více než jedné miliardy světelných let. A jak si vysvětlit, že k tak zásadnímu objevu došlo hned v prvních hodinách měření? Vypadá to jako mimořádně podezřelá náhoda, téměř diskvalifikující. Jenže se ukazuje, že černé díry se srážejí celkem často – v průměru připadá na každou galaxii jedna srážka každých sto tisíc let. Vesmír je velký a galaxií je v něm hodně. LIGO nyní zaznamenává další události, jež by mohly být detekcí gravitačních vln. Celkem [jedenáct již bylo potvrzeno](#), další se vyhodnocují.

Heisenbergův princip neurčitosti

Když pozorujeme kvantové jevy, nevyhnutelně do nich vždy zasáheme.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Po první světové válce se fyzika ocitla ve vážných potížích. Seznam nevyřešených hádanek vypadal přinejmenším takto: nepochopitelné dráhy elektronů (viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#)), nepochopitelný dualismus (či co vlastně) částice-vlna (viz [KVANTUM](#)), ničím nevysvětlená radioaktivita (viz [RADIOAKTIVITA](#)).

V téhle situaci se prosadila nová generace fyziků, generace válečné mládeže nebo přímo válečných dětí: Wolfgang Pauli (ročník 1900), Werner Heisenberg (1901), Enrico Fermi (1901), Paul Dirac (1902). Rakušan, Němec, Ital a Angličan. Jejich práci se občas říkalo *die Knabenphysik*, klukovská fyzika, a lichotka to nebyla. Všichni se stali součástí světové špičky už kolem dvacítky, ale pochopitelně budili vedle nadšení i nedůvěru.

Klukovská fyzika

Za normálních okolností by jim asi nikdo nenaslouchal. Jejich štěstí bylo v tom, že ti o generaci starší, tedy uznávaná špička oboru, byli tehdy skutečně výjimečnými osobnostmi: Planck, Rutherford, Einstein, Bohr. A ti si také nevěděli rady. Stáli tvář v tvář dráždivé hádance, která nebyla ani malá, ani akademická. Nešlo koneckonců o nic menšího než o samu podstatu světa.

Myšlenka, že realita není taková, jak se nám jeví, připadala nastupující generaci skvělá. Už jen proto, kolik lidí dokázala naštvat! (Doložitelné korespondencí mezi Heisenbergem a Paulim.)

Werner Heisenberg v červenci 1925 publikoval článek, který jednak předložil obtížný matematický aparát pro popis kvantových dějů (tzv. maticovou mechaniku, kterou dnes nepoužíváme, protože ji zcela vytlačil daleko elegantnější formalismus zavedený Richardem Feynmanem), jednak vyhlásil Heisenbergovu (a generační) filosofii fyziky:

Starejme se o [popis vztahů mezi měřitelnými veličinami](#), ne o vnitřní principy fungování atomů, je klidně možné, že ty principy nikdy nepochopíme. A nemusí to ničemu vadit.

To nebyl jen vědecký článek. To byla hozená rukavice. Rovnalo se to prohlášení: staří, pohrdáme vašimi zásadami!

Vyneslo mu to proslulost, sympatie jedněch a nesympatie jiných a také Rockefellerovo stipendium, na které odjel k Bohrovi do Kodaně. Jako občan zchudlého poválečného Německa by si to jinak nemohl dovolit.

Procházka parkem

Následuje jedna z mtických historek, jichž je v Heisenbergově životopisu víc. Podle ní se v noci procházel v Kodani parkem, měl po delší

době klid od svého učitele (Bohr odjel lyžovat do Norska) a dostavil se okamžik osvícení. V nočním parku Heisenberga napadlo, že některé dvojice veličin popisujících pohyb elementárních částic nelze změřit s libovolnou přesností. Takovou dvojici tvoří například poloha a [hybnost](#) částice.

Podle zákonů klasické fyziky, jimiž se řídí – nebo nám to aspoň tak připadá – běžný svět kolem nás, takové omezení neexistuje. Polohu i hybnost cyklisty, motýla i střely vypálené z pušky můžeme změřit tak přesně, jak jen chceme a jak to umožní použité měřicí zařízení.

Heisenberg však neměl na mysli žádnou nedokonalost měření, ale principiální a absolutní nepoznatelnost. Čím přesněji změříme polohu částice, tím méně se dozvíme o její hybnosti, a naopak. Součin obou nepřesností nemůže být menší než polovina tzv. redukované Planckovy konstanty, což je [nesmírně malé číslo](#), v základních jednotkách soustavy SI je řádu deset na minus třicátou čtvrtou.

Princip neurčitosti platí pro makrosvět i mikrosvět. Přísně vzato, vztahuje se tedy i na motýly, cyklisty a letící kulky. Obrovská hmotnost těchto předmětů ve srovnání s Planckovou konstantou a nedokonalost našich sebelepších metod měření však působí, že Heisenbergův vztah je v běžném životě nepozorovatelný. Na úrovni elektronů a jiných částic má však zásadní význam a patří k hlavním faktorům určujícím, „jak to tam vypadá“, stejně jako „tady u nás nahoře“ je klíčová třeba gravitace.

Heisenbergův objev lze interpretovat i tak, že každé pozorování v mikrosvětě nevyhnutelně ovlivňuje pozorovaný objekt.

„Dívat se“, ať už prostřednictvím jakékoli techniky, můžeme jen na to, nač dopadnou světelné paprsky (nebo, obecněji, jakékoli elektromagnetické záření). Ty však narážejí na pozorovanou částici a mění tak její pohyb. Světlo s kratší vlnovou délkou umožní přesněji změřit polohu, ale jeho fotony mají větší energii, a tak vychýlí pozorovanou částici více – změní tedy více její hybnost. U světla s delší vlnovou délkou je tomu naopak. Menší energie fotonů vede k menší výchylce pozorované částice, ale přesnost stanovení polohy je přímo úměrná vlnové délce, tedy horší. Pozorovatel se nemůže zbavit vlivu na pozorovaný objekt, ať postaví experiment jakkoli. Tohle je výchozí bod, z něž vznikla kodaňská interpretace kvantové mechaniky, které se snažil oponovat Erwin Schrödinger svým slavným myšlenkovým experimentem (viz [SCHRÖDINGER A KOČKA](#)).

Vzestup a pád a vzestup

Nobelovu cenu za princip neurčitosti získal Werner Heisenberg v roce 1932. Bylo mu jednatřicet, byl jedním z nejslavnějších vědců světa a celou kariéru měl vlastně teprve před sebou. O rok později se v Německu dostal k moci Hitler. Z univerzit museli odejít Židé – do ústraní nebo do zahraničí. A ostatním nezbylo, než se rozhodnout, jak se v nové situaci

zachovají. Budou solidární s židovskými kolegy, anebo naopak využijí toho, že prostor pro kariéru se významně rozšířil?

Těch prvních bylo víc. Mezi těmi druhými byl Heisenberg zdaleka nejvýznamnější. Stal se výkladní skříní německé vědy, i když se napřed musel vyzpovídat ze svých hříchů a nechat se od gestapa ostře pokárat za styky s nevhodnými a rasově nečistými (a jeho maminka musela [poprosit o pomoc](#) svou známou, paní Himmlerovou, která měla také úspěšného syna). Dostal však důvěru, aby mohl napravit chyby a zasloužit se o Vaterland zásadním způsobem. Roku 1940 se ocitl v čele výzkumného programu, na jehož konci měla být atomová bomba, tzv. Uranového spolku – řídil tedy německou analogii amerického projektu Manhattan. Skvělý fyzik, energický organizátor, oddaný nacisty; nikoho lepšího na tu práci Hitler opravdu mít nemohl.

Co bylo dál, o tom se mluví velmi rozporně. Werner Heisenberg po válce vynaložil mnoho úsilí, aby předložil tuto interpretaci: bombu jsem postavil mohl, ale nechtěl, takže jsem hrál s Hitlerem nebezpečnou dvojí hru – předstíral úsilí a zároveň získával čas. Tím jsem jednak zabránil tomu, aby bombu postavil někdo horlivější, jednak jsem ochránil mnoho mladých talentovaných lidí před frontou nebo jiným zlým osudem. Historici jsou na Heisenberga přísnější, a to paradoxně ve dvou směrech zároveň. Viní ho jednak z toho, že se bombu postavil snažil, jednak z toho, že to nedokázal. Selhal tedy podle nich jako člověk i jako fyzik.

Kde je pravda? Kde je nějaký pozorovatel dostatečně oddělený od pozorovaného subjektu? [Skoro celý výkvět fyziky](#) během druhé světové války stavěl atomovou bombu: většina v Los Alamos, menšina s Heisenbergem v Německu. Americký projekt skončil Hirošimou, německý nefungujícím reaktorem. Werner Heisenberg se mohl hájit i tím, že on se smrtelným hříchem neprovinil, že krev nevinných mají naopak na rukou jeho kolegové, kteří pracovali v USA. V prvních letech po válce by taková obhajoba byla nemyslitelná, ale Heisenberg se dožil poměrně vysokého věku, zemřel v roce 1976 jako vysoce vážená osobnost německé i světové vědy, profesor mnichovské univerzity a ředitel Fyzikálního ústavu Maxe Plancka. Tou dobou se již o mnoha věcech mluvilo i uvažovalo jinak.

Ještě jednou v Kodani

Všechny historické studie a výklady se vracejí do jednoho klíčového bodu: k Heisenbergově návštěvě u bývalého učitele Nielse Bohra v říjnu 1941. Dánsko bylo obsazenou zemí. Návštěvu bývalého žáka, jenž se domohl v třetí říši vysokého postavení, Bohr jistě přijal se smíšenými pocity. Heisenberg po válce tvrdil, že se chtěl s Bohrem poradit, zda má pokračovat v atomovém programu. Ten návštěvu pochopil zcela jinak: v lepším případě jako varování, v horším jako hrozbu.

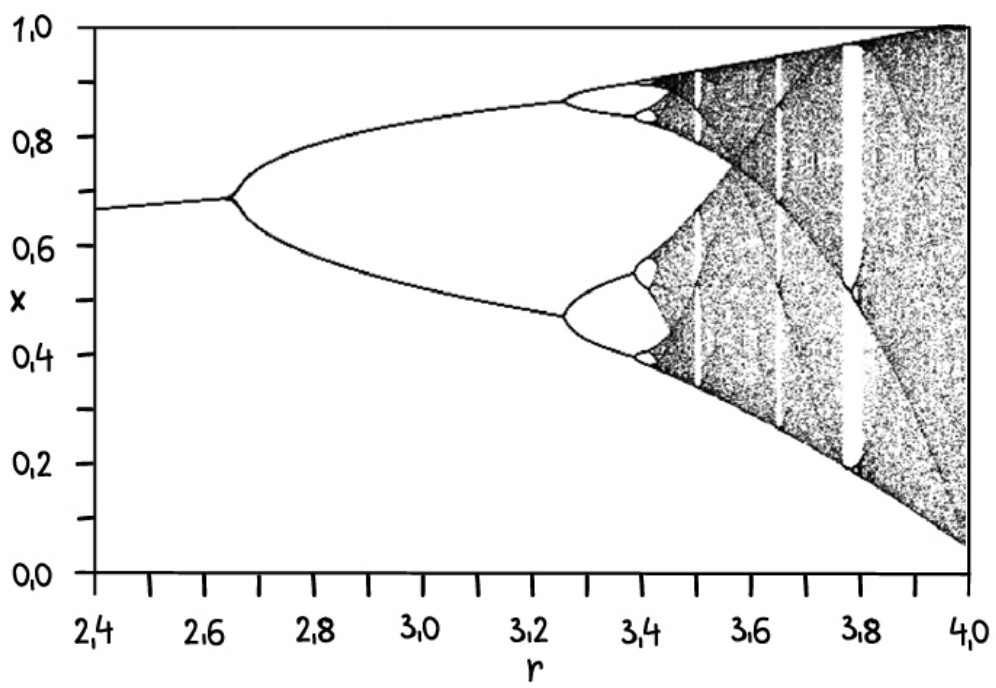
O válečném setkání velkých vědců, přátel a rivalů byla napsána dokonce i divadelní hra. Imenuie se Kodaň. ieím autorem ie Michael Fravn.

Naznačuje mimo mnoha jiných variant i verzi, že Heisenberg mohl mít v úmyslu dohodnout s Bohrem jakýsi mírový pakt, základ smlouvy vědců, že jaderné zbraně nevyvinou pro jednu ani pro druhou stranu. Mohlo tomu tak skutečně být? Pravděpodobně ne, nedává to smysl politicky, lidsky ani logicky.

Není správné dělat z Heisenberga faustovského hrdinu. Dilemata totalitních režimů nemívají temnou krásu smlouvy s Mefistofelem, zpravidla jsou mnohem přízemnější a trapnější. Subtilním trestem pro Heisenberga je to, že se zcela vypočreboval. Po válce zastával řadu významných postavení, dostalo se mu poct, napsal pár knih – ale už nikdy neudělal nic vědecky významného.

Chaos

Malé příčiny mohou mít velké následky.



V češtině, stejně jako v angličtině a dalších moderních jazycích, používáme slovo chaos ve významu zmatek, nepořádek, nesoulad. V antickém Řecku znamenal chaos něco jiného: byl to stav před počátkem světa, univerzální prázdnota, z níž se pak vydělila noc Nyx a tma Erebos, světlo Aithér, země Gaia, podsvětí Tartaros a láska Erós – a pak teprve první generace Titánů, strašlivých bohů, které bylo nutno svrhnout, aby se svět stal takovým, jaký je.

Když použije slovo „chaos“ matematik, neodkazuje tím ani na neuklizený dětský pokoj, ani na řecké mýty, od obojího tam však trochu je. Pro matematika je chaotické chování takové, které vypadá náhodně, ale náhodné není. Aby se tenhle aspekt věci zdůraznil, hovoří matematici často o deterministickém chaosu. Je-li něco deterministické, znamená to, že budoucí vývoj takové věci je beze zbytku určen jejím současným stavem a že bychom tím pádem mohli ten budoucí vývoj předvídat, kdybychom ovšem zákonitostem takového deterministického systému rozuměli do všech detailů. Opakem deterministického chování je takové, do nějž zasahuje nepředvídatelná náhoda – takovým systémům matematici říkají stochastické.

Přírodní vědy dříve pracovaly a dodnes často pracují s deterministickým pohledem na svět. Je to velice užitečný přístup, který poskytuje výborné výsledky. Například zatmění Slunce dovedeme předvídat na tisíce let dopředu s přesností na minutu, protože víme, že nebeská mechanika je deterministická, rozumíme jejím zákonitostem a s velkou mírou jistoty smíme předpokládat, že do ní nezasáhne žádný náhodný vliv – hvězdy a planety jsou příliš velké a těžké, aby jen tak něco narušilo jejich dráhy. Kromě toho, což je velmi důležité, se nebeská tělesa pohybují ve vakuu, nic je nebrzdí, matematika popisující jejich pohyb je velmi jednoduchá.

Popis fyzikálních jevů odehrávajících se na Zemi je daleko obtížnější už jen proto, že vždy musíme brát v úvahu odpor vzduchu, tření o podložku a jiné vlivy, které nám tu pěknou, jednoduchou matematiku kazí. Fyzikové neobyčejně rádi říkají věty jako: „Odpor vzduchu zanedbáme...“ Ve školním výkladu se to udělat dá, dokonce musí. Při návrhu karosérie auta, o letadlu nemluvě, se to udělat nedá a nesmí. Přesto jde pořád o deterministické systémy, jen složitější než oběh planet. Jejich chování by mělo jít spočítat a předvídat. Když se o to začali vědci vážně snažit – což bylo možné až po vzniku moderní výpočetní techniky, tedy v půlce dvacátého století –, narazili na divné věci.

Motýl nad Pekingem

Typickým systémem, jehož chování bychom rádi uměli předvídat, je počasí. (Teď není řeč o klimatu, ale o každodenních krátkodobých předpovědích.) Moderní meteorologie je stará sotva sto let. Dosáhla značného pokroku, ale opravdu spolehlivé předpovědi počasí, jak každý ví, pořád nemáme. Proč vlastně. Co je na tom tak těžkého?

Moderní odpověď zní: protože počasí je nelineární dynamický systém, který vykazuje chaotické chování. Takhle by to však nikdo nemohl formulovat před rokem 1963, kdy svou převratnou práci publikoval Edward Lorenz. Ten objevil, že nepatrná změna ve stavu atmosféry může vést k obrovským důsledkům. Nazval to efektem motýlího křídla: jeho mávnutí nad Pekingem může vyvolat tornádo na americkém Středozápadě. (Nebo nemusí. Hlavní vlastností efektu je jeho nepředvídatelnost. Proto se nedá sebemeně prakticky využít.) Tím se odhalila důležitá vlastnost systémů podobných jako počasí: extrémní citlivost na výchozí podmínky.

Zkoumání krabičky

Chaos je typickou vlastností nelineárních dynamických systémů. Ta tři slova stojí za vysvětlení. Systém je pro matematika, fyzika a inženýra cokoli, co se dá znázornit krabičkou, která má vstup, výstup a stav. Představte si třeba nádrž s trubkou na přívod vody (vstup) a další trubkou na odtok (výstup), v níž je hladina tak a tak vysoko (stav). Vstup a výstup bývá zpravidla měřitelný, stav může být, anebo nemusí. Vstupů, výstupů a stavů může mít systém tak málo jako v tomto příkladu, anebo naopak mnoho. Důležitou skupinou systémů jsou matematické modely, tedy popisy skutečných věcí zapsané v podobě rovnic. U těch se zpravidla snažíme, aby byly co nejjednodušší, aby postihovaly jen nejpodstatnější vlastnosti skutečného systému. Jinak by se s nimi totiž nedalo zacházet.

Když mají vědci před sebou systém, snaží se řešit tři úlohy (ne nutně všechny a ne nutně najednou): zaprvé, pochopit, co je uvnitř krabičky, jaké zákonitosti tam panují. Zadruhé, předvídat chování krabičky na výstupu, když se mění vstup. (Znalost vnitřního mechanismu je k tomu velice nápomocná, ale není vždy nezbytná.) Zatřetí, řídit chování krabičky, aby výstup byl takový, jaký chceme.

Pod dynamickým systémem rozumíme cokoli, co se mění v čase, co produkuje časovou řadu výsledků. Kapající vodovodní kohoutek je dynamický systém (z hlediska výzkumu chaosu dokonce velmi významný): můžete u něj měřit čas, který uběhne mezi dvěma kapkami, a velikost kapek. Teplota za vašim oknem je dynamický systém. Jedoucí auto je dynamický systém. Víceméně všechny zajímavé systémy jsou dynamické.

Některé systémy jsou lineární. Malá příčina u nich vede k malému následku, velká k velkému. O nelineárních systémech se nedá říci ani předchozí věta, ani její opak. Jejich chování je proměnlivé. Malá změna vstupu může vést k malé změně výstupu, nebo k velké, nebo k žádné, nebo k časově opožděné, nebo třeba k velké, ale jen tehdy, když předtím došlo k několika malým změnám. Chování nelineárního systému je v každé situaci jiné a závisí nejen na okamžitých hodnotách vstupu, ale také na historii systému.

V praxi se s nelineárními systémy zachází většinou tak, že se jejich nelinearita ignoruje. Pokud to jsou stroje nebo něco jiného, co zvenku ovlivňujeme, je dobrá rada do nich moc neštouchat, udržovat je co nejlépe v klidu, v okolí ustáleného stavu. Pokud to jsou přírodní objekty, pak obvykle sestavujeme katalog jejich chování a pokoušíme se o přibližné předpovědi na základě zkušeností. Tím se dostáváme zpět k počasí, kde lidové pranostiky o Medardovi či třech zmrzlých nemusí být o nic horším zdrojem informací než dlouhodobá předpověď ČHMÚ.

Ryby Roberta Meye

Na jiný zajímavý příklad chaotického chování – dnes klasický, modelový – narazil roku 1976 australský biolog Robert May, když přemýšlel o kolísání stavů zvířecích populací. Stejně jako Lorenz sestavil zjednodušený matematický model; v tomto případě dokonce extrémně jednoduchý, tvořený jedinou rovnicí s jedinou proměnnou. Říká se jí logistická a uvedu ji zde, protože je jako stvořená k hrátkám s kalkulačkou. Zní:

$$Y_{(\text{napřesrok})} = R \times Y_{(\text{letos})} \times (1 - Y_{(\text{letos})})$$

Představte si rybníček s rybami jednoho druhu. Je v něm dejme tomu 200 ryb. V našem vzorci tomu číslu říkáme $Y_{(\text{letos})}$. Kolik jich bude napřesrok? Čím víc ryb máme, tím víc se jich může rozmnožovat, takže populace určitě roste. Nemůže ale růst neomezeně, protože rybníček pojme (kvůli velikosti, množství živin, narůstajícímu znečištění apod.) jen určité množství ryb. Když se přemnoží, začnou vymírat. Rybníčky mohou být různé; kvalitu rybníčku vyjadřuje číslo R . Z důvodů, které tu nebudu rozebírat, si to zařídíme tak, aby se počet ryb vyjadřoval procenty a pohyboval se mezi nulou (všechny mrtvé) a jedničkou (nejvyšší možný počet ryb, které rybníček uživí). Hodnota R se pak musí (a opět nevysvětlím proč, už i tak zacházíme hodně do technických detailů) pohybovat mezi 2,4 a 4 (když bude menší nebo větší, je brzy po rybách).

A s těmihle znalostmi můžete sami udělat to, co dělal Robert May: zkoumat, jak se rybí populace bude vyvíjet. Zvolíte si výchozí $Y_{(\text{letos})}$ a výchozí R , spočítáte $Y_{(\text{napřesrok})}$ a to pak do rovnice vrátíte na místo $Y_{(\text{letos})}$. A tak dále. Jestli se vám nechce hrát si s kalkulačkou, jak to dělali vědci tenkrát, naprogramujte si to do Excelu, je to práce na dvě minuty.

Když dáte rybníčku dejme tomu dvacet let času – dvacet následných generací ryb – uvidíte, že se výsledky ustalují, i když ne nutně na jediném čísle. Nelineární dynamické systémy mohou obecně vzato dospět do čtyř koncových stavů. Prvním z nich je pevný bod: rybí populace zůstane rok od roku stejná. Druhým periodické chování: pravidelně se začne střídát několik navzájem odlišných počtů ryb, v nejjednodušším případě dva – v liché roky jeden, v sudé druhý. Třetí možností je chaos. V „rybím“ modelu k němu dospějete, když parametr R dosáhne hodnoty 3,56995.

May našel dobrý způsob, jak celou záležitost přehledně znázornit. Jeho obrázku se říká bifurkační diagram a najdete ho na začátku této kapitoly na zdůraznění, že jde o důležitý obrazový symbol deterministického chaosu. Na vodorovné ose je parametr R , na svislé počet ryb poté, co se ustálí výchylky. Diagram krásně vystihuje chování celého systému. Když je R malé, ustálí se počet ryb vždy na stejném čísle, které s rostoucím R pomalu stoupá. Pak se čára rozdvojí. To je právě bifurkace: počet ryb se teď bude rok od roku střídát mezi dvěma hodnotami (protože diagram má dvě větve neboli jednomu R odpovídají dva možné počty ryb). Pak se každá z větví znovu rozdvojí a v rybníčku se začnou periodicky opakovat čtyři různé stavy ryb. A když R dál zvětšujeme, nastane nakonec chaos. Ne však napořád! Při ještě větším R se začnou objevovat ostrůvky daleko jednoduššího chování, cykly s lichou periodou. Po nich opět chaos... a když dospějeme k hodnotě 4, ryby vymřou.

Nedokončená revoluce

Na Mayovu práci navázal matematik Mitchell Feigenbaum z Los Alamos National Laboratory. Ten nevěděl nic o rybách, ale hodně o rovnicích. Začal zkoumat bifurkační diagram čistě matematicky a objevil v něm zákonitosti, kterých si May nepovšiml. Především přišel na to, že vzdálenosti mezi bifurkacemi měřené na vodorovné ose tvoří tzv. geometrickou řadu – takovou, kde je poměr dvou po sobě jdoucích členů stejný. (Například 1, 3, 9, 27...) Poměr neboli kvocient ve Feigenbaumově řadě činil 4,669.

Dále Feigenbaum zkusil jiné rovnice než logistickou. Ukázalo se, že velice široká třída nelineárních systémů se chová úplně stejně jako Mayův rybník. A co víc, že vede ke stejnému bifurkačnímu poměru 4,669. Toto číslo dnes známe na obrovský počet desetinných míst a řadíme ho mezi základní matematické konstanty, tedy do stejné společnosti jako třeba π . Každá z těchto konstant vyjadřuje něco zásadního. $\pi = 3,14$ je číslo kruhu a periodických dějů. Číslo $e = 2,71$ je klíčové pro věci a děje, které rostou anebo se zmenšují. A Feigenbaumova konstanta je obecnou charakteristikou nelinearity a chaosu, ačkoli věda zatím neví ani zdaleka vše, co z toho vyplývá.

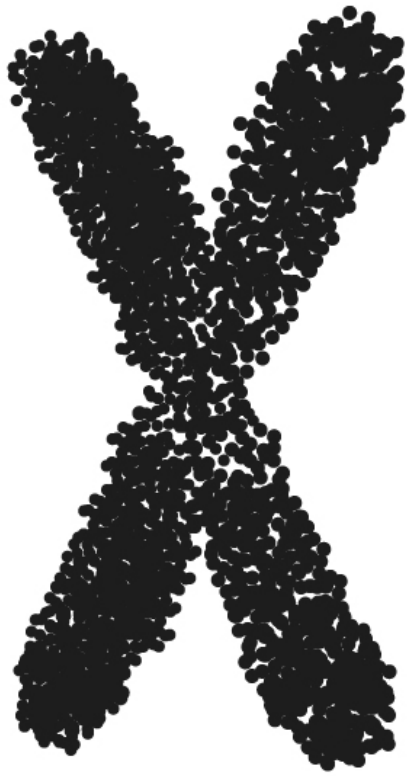
Sám Feigenbaum to nazval principem univerzality. Stejně chaotické chování charakterizuje změny počasí, kolísání populací, turbulence v potrubí, fraktální obrazce typu Mandelbrotovy množiny, některé chemické reakce, výkyvy akciových kurzů a mnoho dalších dějů. Všechny mají společnou důležitou vlastnost: generují svůj vlastní chaos a dělají to zákonitě. Stačí je po nějakou dobu ponechat volnému vývoji. Aby upadly do nepředvídatelných výkyvů, nepotřebují vnější impuls, může za to jejich vnitřní struktura.

Jeden čas se zdálo, že tento objev představuje klíč k důležitému tajemství světa, že Feigenbaum, May, Lorenz a mnozí další objevili něco stejně fundamentálního jako třeba Einstein. Tento optimismus po čase

vymizel. Chaos vzdoruje zkrocení, jeho matematický popis nestačí k praktickému využití. Stále více vědců pokládá celou záležitost za dobovou módu a matematickou kuriozitu. Prozatím. Čas využití a opravdového zkrocení chaosu ještě může přijít.

Chromozom

V každé naší buňce je o nás zapsáno úplně všechno.



Dalekohled k pozorování planet a hvězd měl už Galileo počátkem sedmnáctého století. Opačným směrem, tedy na věci menší než malé, se lidé podívali až o nějakých padesát let později. Antoni van Leeuwenhoek, takto vrátný na radnici v Delftu, přišel ve volném čase na to, jak vyrábět mikroskopy – na tehdejší dobu až neuvěřitelně dokonalé. Ty, které se dochovaly, zvětšují 275×, a prý měl ještě lepší. Dával pod ně všechno, co mu přišlo pod ruku – krev, kousky masa, hmyz, sperma –, výtečně to kreslil a většinou naprosto nechápal, nač se vlastně dívá. Asi největší překvapení mu přinesl pohled do obyčejné kapky vody, v níž se to jen hemžilo životem.

Tím vznikla mikrobiologie jako vědní disciplína; věda na opačném konci soustavy čoček než astronomie. Už mnozí Leeuwenhoekovi současníci byli teoreticky lépe vybavení a začali mikrosvět systematicky mapovat. V první polovině devatenáctého století se začali přírodovědci shodovat na tom, že vše živé je vystavěno z buněk. Díky stále lepším mikroskopickým technikám se pustili do jejich zkoumání.

Buněčné jádro jako první objevil a nakreslil už Leeuwenhoek, aniž ovšem tušil, oč jde. Je celkem kuriózní, že ho spatřil v červené krvince lososa. Kdyby zkoumal vlastní krev, nenašel by nic, červené krvinky savců jádro nemají, liší se tím od všech ostatních buněk našeho těla. U ryb to však neplatí.

Postupem času se optická mikroskopie stala jednou ze základních technik využívaných biology a lékaři. Kromě vylepšování přístrojů se vědci věnovali také tomu, jak zacházet s věcí, na kterou se dívají, tedy přípravě preparátu.

K důležitým trikům patří barvení. Existují látky, které obarví jen některé části mikroskopického preparátu, například buňky nebo vzorku tkáně. Rozdíl ve vybarvení je většinou způsoben tím, že některé biologické materiály jsou zásadité, jiné kyselé, což lze vhodně zvoleným barvivem velmi pěkně rozlišit. Tak získaly své jméno chromozomy (z řeckých slov chroma a soma, barva a tělo, těleso) – drobné struktury uvnitř jádra buňky, které se dají zřetelně vybarvit anilinem. Nejlépe se daly pozorovat u buněk, které se právě dělily.

Německý histolog Walther Flemming už v osmdesátých letech 19. století velmi přesně popsal jednotlivé fáze toho, co se děje s chromozomy při dělení buňky, a dal tomuto složitému procesu jméno mitóza – aniž věděl, jaký význam má.

Už tou dobou měli biologové silné podezření, že chromozomy nějak souvisejí s dědičností. Potvrdil je Thomas Morgan svými pokusy s octomilkami. Tyhle vcelku protivné mušky začal používat právě on a dodnes jsou v laboratorní genetice standardem. Mají výrazné tělní znaky, které se dobře pozorují, a mají neobyčejně krátký vývojový cyklus – deset dní od vajíčka k dospělému jedinci. Oč Morganovi šlo? Zde se musíme na chvíli vrátit v čase do poloviny devatenáctého století.

Zahrada pod Špilberkem

Gregor Johann Mendel je dnes právem pokládán za jednoho z nejslavnějších obyvatel Brna, spravedlivého uznání se však dočkal až posmrtně. Pocházel ze slezských Hynčic, studoval nějakou dobu v Olomouci, ale jeho rodina na to neměla peníze, v jednadvaceti proto vstoupil do augustiniánského řádu a v brněnském klášteře pak strávil celý svůj život s výjimkou několika let dalších studií ve Vídni. Poslali ho dělat faráře, ale neměl na to nervy a neuměl dobře česky, takže se nedomluvil s většinou svých farníků. Pokoušel se o učitelské místo, ale ani na opakovaný pokus nesložil zkoušky předepsané státem, propadl z přírodovědy.

Přesto se nedá říci, že by se do klášterní zahrady uchýlil jako outsider hledající útočiště. Spíš jako člověk, kterému dal konečně celý svět pokoj a on se mohl soustředit na to, co ho doopravdy zajímalo: na výzkum dědičnosti. Ani Mendelovy podrobné životopisy neuvádějí, kde přišel právě k tomuto zájmu, pocházel ale každopádně ze statku a dobře věděl, jak pečlivě sedláci vybírají a kříží hospodářská zvířata, jak se roubují stromy. Kromě toho se na vídeňské univerzitě dověděl, jak cenným nástrojem přírodovědce může být matematika.

Jeho slavné pokusy s hrachem započaly roku 1856 a trvaly osm let. Nejprve si opatřil, zcela ve shodě s moderními metodikami, čisté linie hrachu – takové, které vykazovaly nezměněné vlastnosti v dalších a dalších generacích. Sledoval celkem sedm vlastností zvolených tak, aby byly binární, tedy aby měly jen dvě možné hodnoty. Patřila k nim barva květů (bílá či fialová), délka stonku, tvar lusku, barva hrášku (zelená či žlutá) a tak dále. V moderní terminologii se takovým binárním vlastnostem (anebo genům, které je kódují) říká alely.

Pak začal rostliny s protilehlými vlastnostmi křížit. Jak bude vypadat potomstvo hrachu s krátkým a dlouhým stonkem? Jako celkem pravděpodobná se nabízela možnost, že bude něco mezi: rostlina se středně dlouhým stonkem. To se však nestalo. Všechny rostliny vzniklé křížením měly výhradně dlouhé stonky.

Křížení rostlin se zřetelem na jiné vlastnosti dopadlo stejně. Jedna alela vyhrála, druhá vymizela. Sám o sobě to byl pozoruhodný a nový výsledek. V zemědělské praxi k němu muselo v různých podobách dojít milionkrát, ale nikdy mu nikdo nevěnoval pozornost.

Za zmínku stojí, jak pracné tyto pokusy musely být. Hrách je samosprašný, nepotřebuje opylovače. Pyl (což je zde analogie spermií) se sám uvnitř květu přenesl z tyčinek na bliznu. Tomu musel Mendel zabránit, včas nanést pyl z jiné rostliny a vlastní tyčinky květu zakrýt. (A pak rok čekat.) Slovo piplačka je zde asi jediné vhodné.

Záhada druhé generace

Mendel pak pokračoval svým nejlepším nápadem. V další generaci zkřížil rostliny vypěstované původním křížením – tedy například dva jedince s dlouhými stonky, jejichž rodiči byla jedna rostlina s dlouhým stonkem, druhá s krátkým.

A krátký stonek se vrátil. Měla ho přesně (viz [P-HODNOTA](#)) čtvrtina potomstva.

Geniální Mendelovo vysvětlení zní takto: ve dvojici znaků (např. dlouhý stonek – krátký stonek) je vždy jeden tzv. dominantní, druhý recesivní. Když se oba sejdou v jedné rostlině, prosadí se vždy dominantní. Potomek dlouhého a krátkého hrachu zdědí od každého rodiče jednu alelu – protože šlo o čisté linie, nevyhnutelně je jedna z nich „dlouhá“, druhá „krátká“. Ve stavbě jeho těla se prosadí jen ta dominantní, tedy dlouhá, rostlina však obsahuje a může dál předat obě – náhodně buď jednu, nebo druhou.

Když dva takové potomky zkřížíme mezi sebou, mohou vzniknout se stejnou pravděpodobností čtyři kombinace alel: D–D, D–K, K–D a K–K. Ve třech případech vyroste dlouhý stonek, v jednom – tam, kde se sejdou dvě recesivní alely – stonek krátký. Stejným způsobem lze počítat složení dalších generací a ověřit ho experimentálně.

Co z toho plynulo? Dědičnost má fyzický základ. A musí jím být nějaké částičky, které se nemíchají, nedělí na kousky, nerozpouštějí v sobě, zůstávají stále stejné.

Mendel uvažoval čistě statisticky. Nepředložil žádnou domněnku, co je hmatatelným základem takového mechanismu. Propočítal poměry a trpělivou osmiletou prací se štětečkem je prokázal u všech sedmi sledovaných vlastností. Poté vše sepsal na několik desítek stránek, počátkem roku 1865 je prezentoval na dvou veřejných přednáškách a poté publikoval v časopisu *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn*, aniž se však dočkal ohlasu. Byť třeba jen malého.

Snažil se o něj. Nebyl tak skromný a ušlápnutý, jak si ho později občas představovali, věděl o potenciálním významu své práce. Těžko by jí jinak věnoval osm let života. Kopie článku rozeslal desítkám významných vědců po celé Evropě. Velmi pravděpodobně i Charlesi Darwinovi, o jehož práci věděl a vážil si jí (viz [EVOLUCE](#)).

Darwin naopak o Mendelovi nevěděl a těžko říci, co by si s jeho objevy počal. Rigidní dědičnost, zdánlivě neměnitelná, se do schématu přirozeného výběru nehodila. Neposkytovala žádný prostor pro spontánní variabilitu a bez ní nemá výběr z čeho vybírat. Mendelovy populace byly deterministické, matematicky předepsané. Středně dlouhý stonek, který by mohl evolučně zápolit s krátkými a dlouhými, se v jeho schématu u hrachu nemohl vyvinout. A už vůbec se nemohl z hrachu vyvinout jiný rostlinný druh. Darwinistům to dlouho dělalo těžkou hlavu. Bylo zapotřebí ne jednoho, ale mnoha dalších objevů, aby věci začaly dávat smysl.

Někteří naopak mají za to, že Darwin by při své genialitě potřebné úvahy učinil a že by se za jeho života celý obor posunul mnohem dál, kdyby Mendela četl. Měl k tomu blízko – souhrn jeho práce se nacházel

v knize, kterou měl ve své knihovně. A kterou prokazatelně četl, neboť si ji opoznámkoval. Jen příslušné dvě stránky přeskočil...

Gregor Johann Mendel se posléze stal opatem, byl zahlcen administrativou a na vědu už neměl čas. Nic dalšího nikdy nepublikoval. Přírodovědci jeho práci totálně ignorovali po pětatřicet let, a když ji znovuobjevili, vedlo to ke sporům o původnost – chytré Mendelovy nápady si leckdo chtěl přisvojit.

Pravidla Mušárny

Morgan a jeho žáci navázali na Mendelovy brněnské pokusy, ale šli dál. Pomocí křížení octomilek prokázali, že některé znaky se dědí společně (třeba konkrétní zbarvení těla a konkrétní tvar křídel), že je nelze oddělit jeden od druhého – když moucha získá z předchozí generace jeden z nich, dostane s ním i druhý. To znamenalo, že dědičnost musí mít nějaký fyzický základ, že ji přenáší něco hmatatelného. Začalo být prakticky jisté, že to něco jsou chromozomy – ale ne celé; ono „něco“ muselo být menší, mnohem menší než chromozom, protože proměnlivých znaků organismu je mnoho, kdežto chromozomů málo.

Octomilka má osm chromozomů – dvě sady po čtyřech. Obě sady jsou stejné (přinejmenším na pohled) s výjimkou jedné dvojice. Toho si povšimli biologové už před Mendelem (u moučných červů) a správně určili, že tato neshodná dvojice kóduje pohlaví jedince. Samičky mají v posledním páru oba chromozomy shodné, samečci jeden odlišný. Z historických důvodů (nikoli tedy proto, že by se jejich tvar příslušným písmenům podobal) se těmto chromozomům říká X a Y: samička má XX, sameček XY.

Chromozomy X a Y nesou i další informace, nejen tu o pohlaví, což Morganovi poskytlo nepřímý důkaz o fyzické podstatě dědičnosti. Některé znaky se do další generace přenášely jen u samečků a dalo se tedy usoudit, že se předpis pro tyto znaky nachází právě na chromozomu Y.

K dalším objevům Morganova týmu nenapomohlo pravidlo, ale výjimka z něj. Občas, ve vzácných případech (museli k tomu strčit těch octomilek pod mikroskop postupně tisíce a vypěstovat ještě daleko víc – jejich laboratoři na Kolumbijské univerzitě se po léta říkalo The Fly Room, Mušárna), se ty znaky, které se normálně přenášely pospolu, přece jen při přechodu do následující generace rozdělily. Kód pro vlastnost, kterému se tou dobou už začalo jednodušeji říkat gen, se tedy výjimečně mohl odtrhnout ze svého místa a přidat jinam, na opačný chromozom téhož páru.

Morgan pro to zavedl dodnes (i v češtině) používaný termín crossing-over. Byl to další důležitý dílek do skládačky zvané popis dědičnosti.

Dlouhá tenká nit

Hlavní částí každého chromozomu je jedna molekula DNA, velmi tenké a velmi dlouhé vlákno. Průměr vlákna je 2 nanometry, délka několik centimetrů. Kdybychom DNA z jediného chromozomu zvětšili tak, aby byla tlustá jako běžná nit (0,2 mm), musela by být dlouhá asi tři kilometry. Kromě DNA tvoří chromozom ještě podpůrná bílkovina, jakási kostra.

V každé buňce lidského těla je chromozomů čtyřicet šest (s výjimkou pohlavních buněk, tedy vajíček a spermií, kde jich je polovina, a s výjimkou červených krvinek, kde nejsou žádné). Když odmotáte DNA ze všech 46 chromozomů, dostanete vlákno dlouhé asi dva metry. Když ty dva metry vynásobíte počtem buněk v lidském těle, což je podle současných výpočtů asi 40 bilionů, dostanete 80 miliard kilometrů. To je asi pětsetkrát víc než vzdálenost mezi Zemí a Sluncem.

Stojí za to zamyslet se nad těmi čísly – ne jako nad kuriozitou, ale hlavně proto, že je dobré si uvědomit, jak nás klame představivost a zdravý rozum. Ještě jednou: všechna DNA z vašeho těla by se dala natáhnout ze Země ke Slunci pětsetkrát. Má to dva špatně představitelné důvody. Zaprvé, buněk tvořících tělo je opravdu hodně. Čtyřicet bilionů čehokoli si nepředstavíte, neexistuje žádné názorné přirovnání.

A za druhé, dva metry vlákna v jediné buňce, to je také nepředstavitelně mnoho. Buňky se co do velikosti liší – spermie jsou maličké, vajíčka velikánská, somatické buňky někde mezi –, ale jejich jádra, kde se DNA nachází, zas tolik ne. Jádro lidské buňky bývá kulovité o průměru šest mikronů. Mikron je tisícinou milimetru, což se s vypětím sil představit dá: rozdělte si v duchu vzdálenost dvou čáreček na pravítku na 150 stejných dílů, a máte velikost jádra buňky. A teď tam smotejte dvoumetrovou nitku! Funguje to nejen díky tomu, že nitka je opravdu tenká, ale taky proto, že se dovede poskládat neskutečně hustě, do tvarů, které si neumíme představit (viz též [FRAKTÁL](#)). Zkroucení totiž probíhá na molekulární úrovni. Nit nezkroutíte pomocí vazeb mezi atomy, molekulu naopak nezkroutíte žádným jiným způsobem. Malé věci jsou nejen menší než velké, ale především fungují odlišným způsobem.

Továrna na proteiny

Kompletní sada chromozomů v každé buňce každého živého organismu vypadá jako plýtvání. Poučení každodenní zkušeností s počítači víme, že cenná data stačí uchovávat v jedné hlavní verzi a několika záložních kopiích a že je to tak dokonce lepší, protože čím víc kopírování a přepisování, tím víc chybných údajů.

Jenže genetický kód není databáze, ale spíš kuchařský předpis – a dokonce ani to ne; nejlepší je přirovnat ho k součásti automatu na výrobu proteinů. A proteiny (viz [CRISPR](#)) potřebuje vyrábět každá buňka, a to neustále. Výroba proteinů rovná se (do určité míry) život. Neustále

a to neustále. Výroba proteinů rovněž se (až jako nikdy) zivou. Neustále proto musí mít k dispozici kompletní aparát k jejich produkci. Chromozomy jsou jeho nepostradatelnou částí. Buňka ostatně nemá své jméno nadarmo, je to skutečně samostatná, do značné míry soběstačná jednotka.

Buňky mají omezenou životnost a musí se neustále obnovovat. Činí tak dělením, a když k němu dochází, musí se náležitě přenést i genetická informace. Děje se tak pomocí procesu zvaného mitóza – jak jsme si řekli o něco výše, objeven byl už v předminulém století, ale do detailů vysvětlen až s poznáním struktury DNA.

Molekuly DNA se na všech chromozomech nejprve zreplikují: dvoušroubovice se roztrhne a ke každému jejím oddělenému vlákně „doroste“ vlákno nové. Pak se rozdělí jádro buňky a až pak následuje vlastní mitóza – zformování dvou nových jader a rozdělení buňky. U většiny mnohobuněčných organismů trvá mitóza od několika desítek minut do několika hodin. (Jiný případ jsou bakterie, jejichž buňka je jednodušší, mechanismus dělení také jednodušší a podstatně rychlejší.)

Obě dceřiné buňky pak obsahují ve svých jádrech stejnou genetickou informaci jako buňka mateřská.

Přesněji řečeno, skoro stejnou. Mechanismus přepisu dělá chyby – málo, ale dělá (odhaduje se, že asi v jednom případě z miliardy, což ale pořád znamená tři chyby při každém dělení kterékoli buňky). Tím vznikají v genetickém kódu drobné náhodné mutace. Většinou jsou bezvýznamné, proti většině potenciálně rizikových má tělo různé obranné mechanismy. Občas selžou a pak na to organismus doplatí – ne vždy nutně nádorovým bujením, ale jedna z možností to je.

Mitóza je poměrně přímočarý a pochopitelný proces (dokud se nepustíme do detailů, což dělat nebudeme). Komplikovanější je meióza, při níž vznikají pohlavní buňky.

Pohlavní loterie

Nový jedinec vzniká, když splynou pohlavní buňky rodičů. Říkejme jim vajíčko a spermie, u většiny mnohobuněčných organismů to tak buď skutečně je, anebo jde o nějakou zřetelnou analogii.

Pohlavní buňky se od somatických (tělních; tedy všech ostatních) liší tím, že mají jen jednu sadu chromozomů. Že to tak musí být, je vcelku pochopitelné, a výsledkem jejich spojení je skutečně to, že „máte v každé buňce jeden párový chromozom od tatínka, jeden od maminky“. Zajímavější ovšem je (což o sexu ostatně platí obecněji), co tomu předcházelo.

Vznik vajíčka a spermie procesem meiózy je klíčem k pochopení, proč nejsme všichni stejní, proč je každý jedinec odlišitelným individuem – dokonce do té míry odlišitelným, že se testy DNA běžně používají jako soudní důkaz.

Meióza začíná podobně jako mitóza: chromozomy se zduplikují. Z každé dvojice párových chromozomů („jeden od maminky, jeden od tatínka“) se stanou dvě zcela shodné dvojice. Při mitóze by se teď od sebe oddělily a daly postupně vzniknout dvěma buňkám se zcela stejnou genetickou informací.

Meióza však udělá jinou věc: ty dvě dvojice náhodně rozstříhá, útržky promíchá a poslepuje. Vzniknou čtyři nové chromozomy, obsahují všechny informace ve správném pořadí (protože se poslepovaly na správných místech, to meióza zaručuje), ale jejich původ se promísil, některé úseky pocházejí od jednoho rodiče, jiné od druhého. To je zdroj variability v populaci a kouzlo pohlavního rozmnožování.

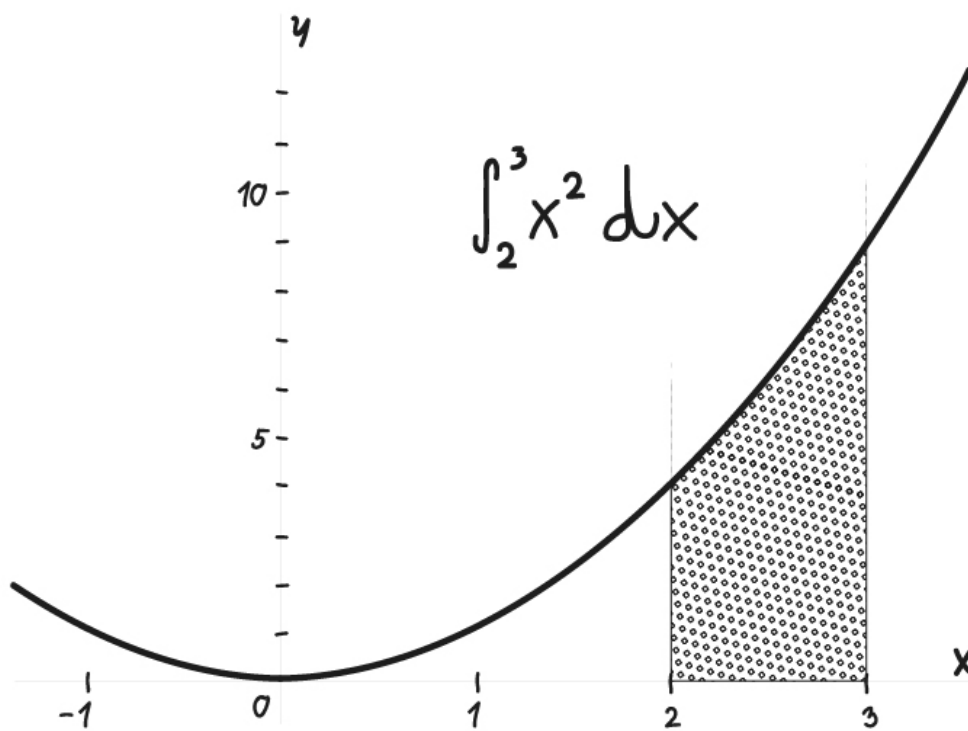
V závěrečné fázi meiózy se buňka rozdělí na dvě a každá z nich zas na dvě. Čtyři buňky „vnučky“ (takový termín genetici ovšem nepoužívají, pro ně to jsou dceřiné buňky druhé generace) dostanou po jednom promíchaném chromozomu. A ten čeká ve vajíčku či spermii na svou příležitost.

Když spermie oplodní vajíčko, nespojí se tudíž takové chromozomy, které jsou v somatických buňkách rodičů, ale chromozomy z jejich pohlavních buněk. A ty jsou docela jiné. Dědičnost proto není přímočará a jednoduchá, nikdo z nás není otec plus matka lomeno dvěma.

Ostatně, otázka, čím vlastně jsme, jak jsme svými geny formováni, je ještě mnohem složitější. Žádný jedinec, byť by šlo o sebejednodušší živočišný či rostlinný druh, se samozřejmě nevyvíjí čistě jen na základě svých genů.

Integrál

Jak spočítat plochu vymezenou křivkou.



Když počítáme derivace (viz [samostatné heslo](#)), jde o to, jak vydělit nekonečně malé nekonečně malým. U integrálu řešíme podobný problém: co se stane, když sečteme nekonečný počet nekonečně malých dílků.

Obě tyto věty sice vystihují podstatu věci, ale zároveň jsou vážnou matematickou herezí. Ani nekonečno, ani „nekonečně malé“ nejsou čísla a nedá se s nimi jako s čísly zacházet. Nemůžeme například ve zlomku krátit nekonečno proti nekonečnu a říci, že výsledek je vždy jednička. Korektní postup spočívá ve zmenšování dílků konečné velikosti. Spočteme výsledek pro malé dílky, pak je ještě zmenšíme a podíváme se na nový výsledek, pak je znovu zmenšíme a tak dále. Důležité je, aby se postupné výsledky přibližovaly – konvergovaly – k jediné hodnotě, aby například neoscillovaly nahoru dolů. Pokud tomu tak je, pak ona hodnota může být (ale není to jisté!) finálním výsledkem.

Během historie se matematici postupně naučili:

- Objevit popsany postup (v případě integrování Archimédes v antice – viz [PI](#), u derivací Newton a Leibniz v sedmnáctém století).
- Zjednodušit ho do praktických vzorců, aby se pokaždé nemusel opakovat pracný postup se zmenšováním dílků.
- Převést pojmy „nekonečno“ a „nekonečně malé“ do výpočtů tak, aby žádné nekonečno neobsahovaly, aby se počítalo jen s korektními matematickými výrazy.
- Dokázat, že tento postup platí obecně a pro velmi širokou třídu matematických funkcí.
- Zobecnit popsany aparát, aby byl použitelný v dalších matematických oblastech, především v počítání s komplexními čísly (viz [samostatné heslo](#)).

A trvalo to asi dva tisíce let.

Nejlepší názornou představu o integrálu dává úloha spočítat plochu nějakého obrazce. Když má jednoduchý tvar – obdélník, trojúhelník, kruh –, máme na to školní vzorečky. Představme si však obrazec, jehož jedna strana je vymezena grafem funkce $y = x^2$ (známe ji už z výkladu derivací). Může vypadat například jako graf na začátku kapitoly.

Všimněte si, že na vodorovné ose sahá od hodnoty 2 do hodnoty 3. Tomuto úseku se říká integrační interval.

U integrálu tohoto typu můžeme vždy spočítat jednak dolní odhad, jednak horní – podle toho, jestli se budeme řídit počátečními, anebo koncovými body intervalů. Začneme bez dělení na části, vezmeme tedy celý úsek na ose x . Dolní odhad pak bude $2^2 \times 1 = 4$, horní odhad $3^2 \times 1 = 9$. To je hodně velký rozptyl, ale při tak hrubém dělení se nedá čekat nic jiného.

Zmenšíme dílky na polovinu. Dolní odhad spočteme nyní jako $2^2 \times 0,5 + 2,5^2 \times 0,5 = 5,125$, horní odhad je $2,5^2 \times 0,5 + 3^2 \times 0,5 = 7,625$ a je vidět, že rozmezí, v němž by měl ležet výsledek, se zužuje. Když vzdálenost mezi dvojkou a trojkou rozdělíme na deset částí, dostaneme se k odhadům

6,085 a 6,585. Dalším zjemňováním bychom se dostali k číslu 6,333... To je přesným výsledkem. Udává velikost plochy vyznačené na obrázku. Správná matematická formulace zní: určitý integrál z funkce x^2 od dvou do tří je 6,333...

Tímto způsobem se integrály v praxi *nepočítají*. Namísto toho se využívá poznatku zvaného základní věta analýzy. Ta říká, že integrování je opačná operace k derivování. Když je funkce B derivací funkce A, pak (s jistými omezeními) platí, že funkce A je neurčitým integrálem neboli tzv. primitivní funkcí k B. Neurčitý integrál je funkce, určitý integrál je číslo – rozdíl dvou funkčních hodnot odpovídajícího neurčitého integrálu.

Nejdůležitější derivace a primitivní funkce se studenti matematiky učí jako slovíčka – nazpaměť. Na rozdíl od slovíček by se daly logicky odvodit, ale často velmi pracně, takže budme rádi, že to předkové udělali za nás. Když tedy hledáme neurčitý integrál funkce jako x^2 , přemýšlíme: čeho je x^2 derivací? V referenční příručce snadno najdete, že takovou funkcí je $1/3 \times x^3$. To je tedy primitivní funkce k x^2 .

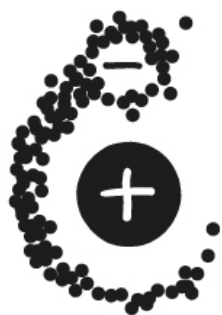
Určitý integrál se pak počítá tak, že od hodnoty primitivní funkce v horní mezi integračního intervalu odečteme její hodnotu v dolní mezi. Tím si můžeme ověřit, zda jsme před chvílí počítali správně. Spočteme $1/3 \times 3^3 - 1/3 \times 2^3 = 9 - 8/3 = 6 \frac{1}{3}$. Hurá!

Integrály jsou opět velmi důležité ve fyzice, kde se pomocí nich počítá všechno možné, co je součtem, celkem nějaké veličiny, od průtoku vody potrubím po dráhu kosmické lodi.

Izotopy

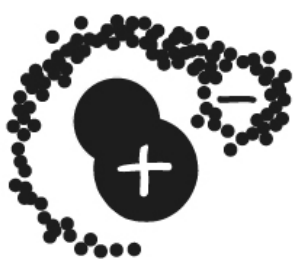
Všechny atomy téhož prvku mají stejný počet protonů. Nemusí však mít též počet neutronů.

${}^1_1\text{H}$



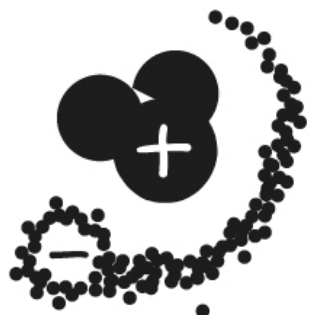
H

${}^2_1\text{H}$



D

${}^3_1\text{H}$



T

Atom se skládá z kladně nabitého jádra a záporného elektronového obalu (viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#)). Počet elektronů určuje chemické vlastnosti prvku. Počet kladně nabitých částic v jádru – protonů – je stejný, aby náboje elektronů vyvažoval.

Roku 1932 James Chadwick experimentálně potvrdil existenci neutronu. To je subatomární částice, která se v jádru vyskytuje společně s protony. Nemá elektrický náboj. Prvky se v přírodě obvykle nacházejí v několika různých variantách, u nichž se počet neutronů liší. Těmto variantám se říká izotopy.

Například přírodní měď, prvek s 29 protony, je vždy směsí 69,15 % izotopu Cu-63 (s 34 neutrony, $34 + 29 = 63$) a 30,85 % izotopu Cu-65. Z toho důvodu není její relativní atomová hmotnost celé číslo, ale odpovídá složení směsi a činí 63,55. Další izotopy mědi se dají připravit uměle, jsou radioaktivní a rychle se rozpadají – mění na jiné prvky, v tomto případě na nikl a zinek.

Z chemického hlediska se všechny izotopy téhož prvku chovají téměř stejně. Vytvářejí stejné sloučeniny. Drobné rozdíly nastávají tam, kde záleží na hmotnosti atomů. Tou se izotopy navzájem liší, což může ovlivňovat rychlost chemických reakcí. Daleko důležitější je však rozdíl v chování při jaderných přeměnách.

V přírodě na naší planetě se vyskytuje prvních 94 prvků Mendělejevovy tabulky. Třináct z nich nemá žádné stabilní izotopy (viz [ASTAT](#)), jsou tedy radioaktivní a proměňují se spontánně v jiné prvky. Velice se však navzájem liší rychlostí této přeměny.

Tu vyjadřujeme tzv. poločasem rozpadu, což je doba, za kterou výchozí množství látky klesne na polovinu. Nejstabilnější izotop uranu, U-238, má poločas rozpadu 4,5 miliardy let, tedy zhruba stejně, jako je stará planeta Země. Bi-209, nejstabilnější izotop bismutu, má poločas rozpadu dokonce 2×10^{19} let, miliardkrát více, než činí stáří vesmíru! Naproti tomu poločas rozpadu radia Ra-226 je 4,5 roku, u radonu Rn-222 to jsou necelé čtyři dny, u astatu At-210 osm hodin a u francie Fr-223 dvaadvacet minut.

Uměle připravené prvky s pořadovými čísly 95 a výše jsou ještě méně stabilní. U některých z nich se poločas rozpadu měří v milisekundách. Nejstabilnější z nich je americium Am-243 s poločasem rozpadu dvacet let a zhruba platí, že čím vyšší pořadové číslo, tím menší trvanlivost. To vede k domněnce, že lepší to už nebude: můžeme sice v urychlovačích částic srážkami jader vytvářet těžší a těžší prvky, ale vždy se nám rozpadnou před očima. Nikdo ovšem neví, kde je horní mez pořadového čísla prvku (tj. počtu protonů) a zda vůbec existuje. Tím pádem ani není jasné, zda nemohou existovat nějaké supertěžké stabilní či jinak zajímavé prvky.

Dvaadvacet z devadesáti čtyř přirozeně se vyskytujících prvků má jen [jeden izotop](#) – k příkladům patří hliník, zlato, fosfor či arzén. Všechny ostatní jsou směsí izotopů, jejíž složení někdy mírně kolísá podle toho, odkud pochází vzorek.

Přírodního složení směsi izotopů lze občas prakticky využít. Dobře známým příkladem je uhlík. Přírodní uhlík je směsí dvou stabilních

izotopů C-12 a C-13 s malou příměsí radioaktivního C-14, jenž má poločas rozpadu 5730 let. C-14 neustále vzniká v atmosféře srážkami kosmických paprsků s molekulami dusíku. Uhlík je součástí všech organických sloučenin a živý organismus – rostlina nebo živočich – si neustále vyměňuje uhlík se svým okolím. Po dobu života tedy obsahuje stejný podíl C-14, jaký je v atmosféře.

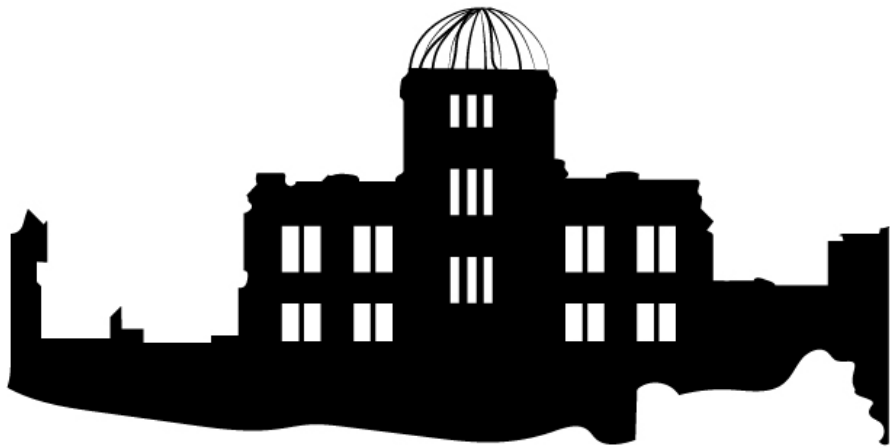
Po smrti organismu se tato výměna zastaví a C-14 začne z organismu mizet přirozeným radioaktivním rozpadem. Takto se dají datovat archeologické nálezy: v jejich organické hmotě se změří podíl C-14 a porovná se s atmosférickou hodnotou, přesněji řečeno s tou atmosférickou hodnotou, která platila v době života organismu, protože ta nemusela být stejná jako dnes. Metoda, kterou vynalezl krátce po druhé světové válce americký chemik Willard Libby, znamenala průlom v archeologii. Dá se dobře použít až do stáří vzorku kolem 50 000 let, pak už je podíl C-14 příliš malý a neumožňuje spolehlivé měření.

Podobným způsobem se dají datovat i vzorky anorganických materiálů a dá se jít do mnohem vzdálenější minulosti, jen je potřeba použít jiné prvky a jejich izotopy. Dobře propracovaná je metoda využívající souběžnou přeměnu U-238 na olovo Pb-206 a U-235 na Pb-207. Takto se datují minerály staré až dvě a půl miliardy let s chybou pod 5 %. Velkou předností metody je, že vzorek vždy obsahuje oba zmíněné izotopy uranu, takže máme k dispozici dvoje na sobě nezávislé hodiny, jejichž měření můžeme porovnat.



Jaderná bomba

Když se uvolňuje síla, která drží pohromadě jádro atomu, snažte se být co nejdál.



Kdybyste se stali diktátory nějaké ambiciózní země, bude se vám hodit informace, že existují tři hlavní druhy jaderných bomb: uranové, plutoniové a vodíkové. Každý z nich má své výhody a nevýhody.

Uranová bomba je jako jediná z nich konstrukčně jednoduchá, protože jednoduchý je i její princip: když máte pohromadě dostatečně velké množství uranu, vybuchne. Stačí tedy vzít dva menší kusy uranu a zařídit, aby se v pravý čas k sobě přiblížily, zbytek zařídí fyzika.

Uran: snadná konstrukce, nedostupné palivo

Takto fungovala bomba v Hirošimě. Tvořila ji dělová hlaveň o průměru 165 mm a dlouhá necelé dva metry. Na každém jejím konci se nacházelo podkritické množství uranu. Jedno z nich sedělo na malé náloži normální výbušniny. Když se tato zažehla, dělo vystřelilo: uranový projektil prolétl hlavní necelé dva metry a setkal se s druhým kusem uranu.

Postavit takovou bombu podle návodu na internetu dnes představuje náročnější kutilský projekt. Naštěstí je však obtížné obstarat si pro ni štěpný materiál, tedy uran 235 ve zbrojní kvalitě (viz [IZOTOPY](#)). Přírodní uranová ruda obsahuje jen 0,7 % tohoto izotopu a 99,3 % vojensky nepoužitelného uranu 238. Problém není ani tak v tom, že je tam „správného“ uranu tak málo, jako spíš v tom, že oddělit oba izotopy od sebe je velice obtížné. Pro reaktory jaderných elektráren stačí směs, ve které je kolem čtyř procent U-235. Pro uranovou bombu potřebujete čistotu 85 % a více.

Kolik obohaceného uranu musíte mít? Kritické množství závisí na jeho čistotě, na prostorovém uspořádání a dalších faktorech. V hirošimské bombě bylo 64 kg uranu, jeho větší část byla obohacena na 89 %, menší jen na 50 %. Když bomba vybuchla, řetězová reakce proběhla v necelém kilogramu uranu, zbytek byl rozmetán na všechny strany dřív, než se v něm štěpení stihlo rozběhnout. A z tohoto kilogramu se na energii přeměnilo jen 0,6 gramu.

Toho 0,6 gramu zničilo město. Účinek výbuchu odpovídal 15 tisícům tun klasické výbušniny TNT.

Plutonium: přesně naopak než uran

S plutoniovou bombou je to přesně opačně než s uranovou. Štěpný materiál si dnes opatříte celkem snadno, ale potíž budete mít s konstrukcí.

Plutonium je kov, který se na Zemi vyskytuje jen v nepatrném množství jako produkt jaderných přeměn jiných prvků. Dá se však připravit uměle v jaderném reaktoru z uranu 238. Dokonce tam vzniká, ať chceme nebo nechceme: je nevyhnutelnou součástí vyhořelého jaderného paliva a dá se z něj poměrně snadno izolovat. Na světě je spousta jaderných elektráren a plutonium je tím pádem levnější a dostupnější – i nelegálně – než U-235.

Na rozdíl od uranu se však plutoniová bomba nedá účinně odpálit pouhým nahromaděním nadkritického množství. Reakce by se rozběhla příliš rychle, a proto by příliš brzy skončila. Bomba by rozmetala sama sebe na kusy dřív, než by dosáhla plného účinku. Plutonium se odpaluje řízenou implozí: pomocí přesně dávkovaných výbušnin se kus plutonia rychle stlačí do menšího objemu, a tím se nastartuje řetězová reakce.

To si už doma nevyrobíte – opět naštěstí. Američané použili plutoniovou bombu jak k vůbec první jaderné zkoušce v Novém Mexiku v červenci 1945, tak v Nagasaki.

Termonukleární zbraně: velmi složité

Vodíková neboli termonukleární bomba je dvoustupňová. První stupeň tvoří uranová nebo plutoniová bomba. V extrémním žáru jaderného výbuchu se pak zažehne slučování jader vodíku (viz [FÚZE](#)), což je reakce napodobující hvězdu. Vodíková bomba není nic jiného než maličký a dočasný kousek hvězdy.

Vodík je nejhojnější prvek ve vesmíru, právě proto, že je stavebním materiálem hvězd. Na Zemi ho taky máme až až, ale téměř výhradně ve sloučeninách: ve vodě, ve většině organických sloučenin (uhlovodíky), v kyselinách. Dovedeme ho z nich snadno vyrábět v průmyslovém měřítku, když je třeba.

Situace je však stejná jako s uranem – běžný vodík se ve zbraních použít nedá. K tomu jsou potřeba jeho dva vzácnější izotopy. Pro svůj význam nesou dokonce speciální jména. Obyčejný vodík nemá žádný neutron, izotop s jedním neutronem se jmenuje deuterium, se dvěma neutrony tritium. Deuterium je stabilní, na každých deset tisíc atomů přírodního vodíku připadají dva atomy deuteria. Tritium se připravuje uměle a je radioaktivní.

Když vystavíte deuterium a tritium podmínkám jaderného výbuchu a splníte spousta dalších požadavků – především ten, aby to celé aspoň nepatrnou chvíli drželo pohromadě –, nastartuje se fúzní reakce. Jádra deuteria a tritia se začnou slučovat. Tím vznikne helium a uvolní se spousta energie, hlavně v podobě rychlých neutronů.

Horké chvíle studené války

Takové zařízení se dá vyrobit. Američané to skutečně udělali. Prvního listopadu 1952 úspěšně odpálili první vodíkovou bombu na světě. Projekt nesl kódový název Ivy Mike. Došlo k tomu na atolu Eniwetok, součásti Marshallových ostrovů v Pacifiku. Ty byly v padesátých letech americkou atomovou střelnicí.

Potíž s Ivy Mike spočívala hlavně v tom, že vlastně o bombu nešlo. Odpálené zařízení, konstrukčně velmi složité, vážilo 82 tun a vojensky bylo tím pádem k ničemu. Těžko můžete takové monstrum shodit na nepřítele.

Tohle všechno se dělalo v horečném spěchu. Nikdo v USA spolehlivě nevěděl, na čem pracují Sověti a jak jsou daleko. Stalin byl ještě živ a studená válka hrozila kdykoli přerůst v horkou. Supervelmoci nevyjednávaly, jen se ostražitě pozorovaly a jedna od druhé čekaly to nejhorší.

V lednu 1950 zatkli Britové [Klausa Fuchse](#), německého fyzika, který pracoval v Los Alamos. Prokázali mu, že dlouhodobě předával údaje o americkém jaderném programu Sovětskému svazu. V létě téhož roku vypukla korejská válka, otevřený a velice krvavý střet USA a komunistického bloku. Ten v bojích otevřeně zastupovala Čína, která tehdy ještě byla spojencem SSSR. Mělo se za to, že světová válka je na spadnutí.

Pochyby amerických stratégů a morální zábrany amerických vědců – byly-li jaké – tím padly. Zásadně vylepšit takzvanou Teller-Ulamovu konstrukci se podařilo během necelých dvou let. Tým, v němž vedle obou jmenovaných působili prvotřídní vědci Hans Bethe, John von Neumann a Enrico Fermi (oba posledně jmenovaní už tou dobou nevléčitelně nemocní), přišel na to, jak nahradit kapalné palivo pevným a vyřadit ze hry těžko dostupné a nestabilní tritium. Namísto toho použili deuterid lithný, což je lehká, snadno dostupná a dobře zpracovatelná krystalická látka. Cesta k „suché“ vodíkové bombě byla otevřena.

Mimochodem, ani jeden z výše jmenované pětice se v Americe nenarodil. Dva z ní byli Maďaři, jeden Polák, jeden Němec a jeden Ital. Všichni byli samozřejmě geniální a všichni byli přesvědčeni, že je třeba dát Americe do rukou co nejděsivější zbraň, má-li se zachránit svět před totalitou či úplným zničením. Nejsilněji na tuhle strunu hráli oba vědci maďarského původu, tedy Teller a von Neumann.

Bílé vločky nad Šťastným drakem

Prvního března 1954 vyšlo nad atolem Bikini druhé slunce krátce po tom prvním. To explodovala první vojensky použitelná vodíková bomba na světě, tehdy známá pod kódovým označením Castle Bravo. Měla

patnáct megatun – odpovídala tedy patnácti milionům tun TNT. Byla tisíckrát silnější než ta v Hirošimě. Byla nejsilnější, jakou kdy Američané otestovali. Nebyla však nejsilnější vůbec – Sovětský svaz odpálil větší bomby počátkem šedesátých let postupně čtyřikrát na své střelnici na souostroví Novaja Zemlja. Největší z nich, přezdívaná Car-bomba, měla 50 megatun.

Castle Bravo byla však bomba, která zasáhla úplně nejvíc lidí – svým způsobem.

Prvními z nich bylo třidvacet japonských rybářů, posádka lodi Šťastný drak 5. Ta se 1. března plavila poblíž Marshallových ostrovů, ale vně zóny, kterou Američané předem prohlásili za nebezpečnou – 130 kilometrů od epicentra.

Jenže Castle Bravo se částečně vymkla z rukou. Za prvé, meteorologové špatně odhadli sílu a směr větru. Za druhé, bomba byla silnější, než se čekalo, protože chování lithia v podmínkách termionukleární reakce nebylo předem otestováno a teoretici ho neodhadli správně.

Na japonské rybáře po tři hodiny padaly bílé vločky podobné sněhu. Byly to spálené pozůstatky korálového útesu nesoucí vysoce radioaktivní izotopy. Japonci zametali prach z lodi holýma rukama. Brzy pocítili příznaky nemoci. Předčasně se vrátili domů, podstoupili léčbu a všichni kromě jednoho přežili, přestože se v nemocnici po krevní transfuzi ke všemu nedopatřením nakazili hepatitidou typu C.

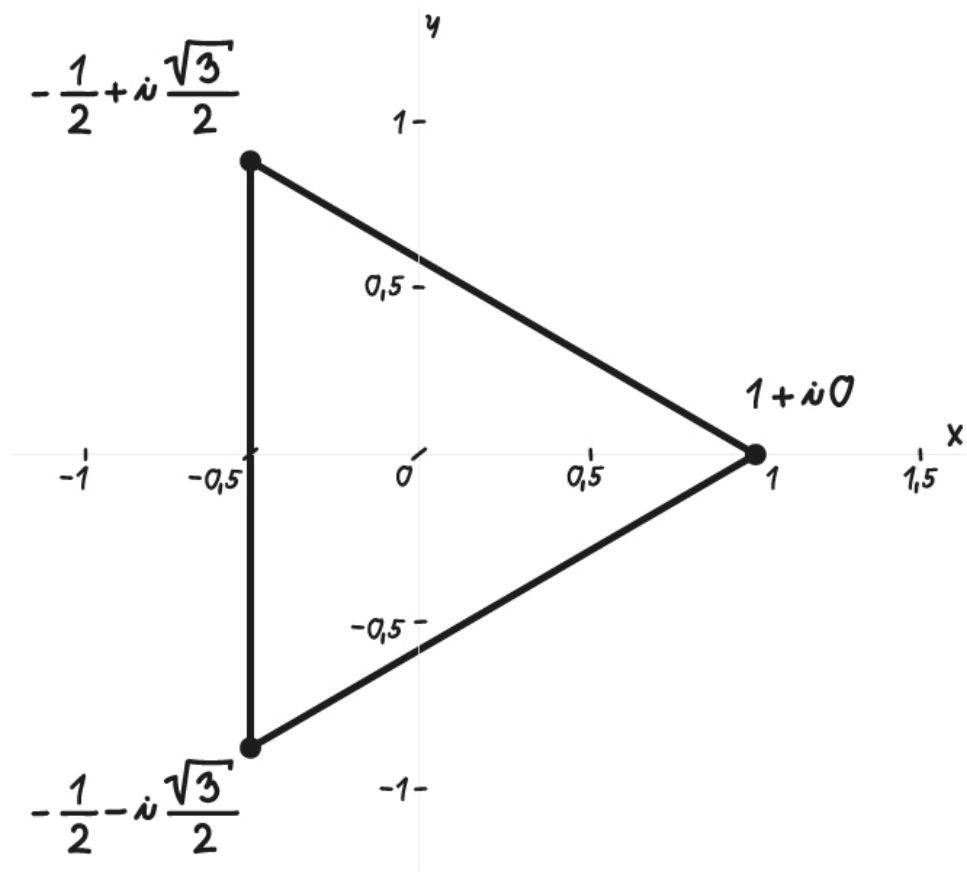
Jejich případ však měl velkou odezvu ve světových médiích. Obavy z jaderných zbraní, tak jako tak velké, našly konkrétní výraz, vizualizaci, příběh živých lidí. Západní veřejnost se začala ozývat hlasitěji než dříve. (Východní taky – proti západním jaderným zbraním. Proti sovětským se ozvat nesměla a velkou část z ní by to tehdy ani nenapadlo.)

Roku 1963 podepsaly hlavní jaderné velmoci dohodu o zákazu testů jaderných zbraní s výjimkou podzemních výbuchů. Do té doby došlo k celkem pěti stům dvaceti pokusným jaderným výbuchům v atmosféře. Většinu z nich uskutečnily Spojené státy a Sovětský svaz, menší množství také Velká Británie, Francie a Čína.

Tou dobou už slovo Bikini nikoho nestrašilo, naopak. Už roku 1946, několik dnů po prvních jaderných zkouškách v Tichomoří, využil francouzský podnikatel Louis Réard vlny zájmu a pojmenoval stejným názvem nové dvoudílné plavky.

Komplexní číslo

Jsme zvyklí nanášet čísla na přímku – číselnou osu. Komplexní čísla používají dvě číselné osy, navzájem kolmé.



Běžně se [ten příběh](#) vykládá takto: nejprve se lidé naučili počítat na prstech a měli tím pádem přirozená čísla: 1, 2, 3... Pak k nim přidali záporná, aby mohli odečíst třeba pět od dvou, taky nulu, aby mohli odečíst pět od pěti, a dostali tak množinu celých čísel. Ta mohli dle libosti sčítat, odčítat a násobit. Aby je mohli mezi sebou i dělit, museli zavést zlomky neboli racionální čísla.

Pak ale objevili operaci odmocňování a tím narazili na dva nové problémy. Za prvé, zdaleka ne všechny odmocniny se dají vyjádřit jako racionální čísla – tak třeba hned $\sqrt{2}$ se nedá zapsat jako zlomek, nenajdeme žádná dvě čísla, jejichž podílem by byla. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí zavést iracionální čísla. A za druhé, záporná čísla se odmocňovat nedají, dokud neprovedeme další rozšíření a nepořídíme si čísla komplexní.

Poučení z příběhu je jasné, nezlomná lidská zvědavost vždycky vymyslela nějakou operaci, která byla v používané číselné množině neproveditelná, a tak byl důvod množinu rozšířit (viz též [NEKONEČNO](#)).

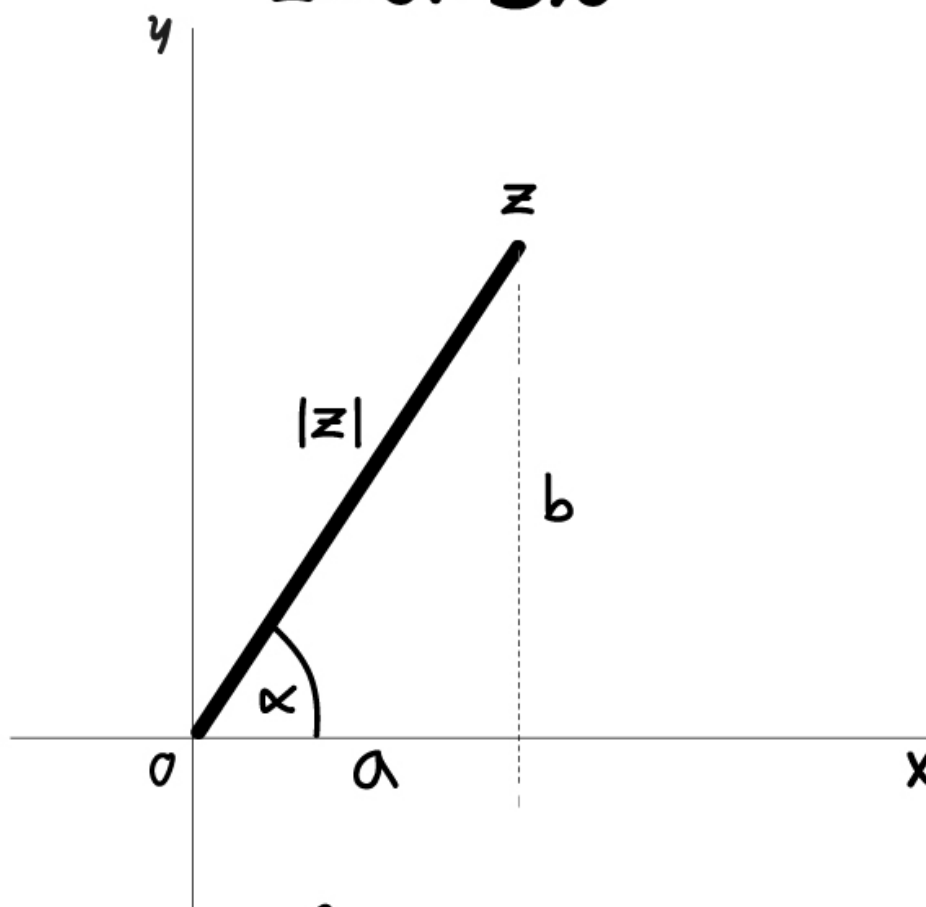
Ve skutečnosti to bylo trochu jinak. Babylónská, a hlavně řecká matematika kladla hlavní důraz na geometrii. Ve starověku pracovali s takovými čísly, jež se dala geometricky znázornit. Proto od přirozených čísel přešli ke zlomkům, tedy číslům racionálním (vyjadřujícím třeba poměry stran geometrických obrazců), a tím pádem objevili (ke své malé radosti) také čísla iracionální, třeba odmocninu ze dvou. Až později se začala používat záporná čísla a nula (viz [NULA](#)), kde názorná geometrická představa chybí. A téměř současně s jejich všeobecným přijetím vznikl problém vedoucí ke komplexním číslům. Tou dobou už bylo centrum rozvoje matematiky v Evropě.

Rovina plná čísel

Komplexní čísla jsou taková, která mají reálnou a imaginární část. To zní záludně, ale je to celkem jednoduché. Představte si číselnou osu – přímku, která se táhne od minus do plus nekonečna a uprostřed má nulu. Právě tam nakreslete druhou přímku, kolmou na tu první. Vodorovné ose budeme říkat reálná, svislé imaginární. Každé číslo v rovině se pak dá pojmenovat dvěma souřadnicemi, třeba jako „minus dvě na reálné ose, plus tři a půl na imaginární“. To se běžně píše jako $-2 + 3,5i$.

Kromě toho existuje ještě jeden způsob, jak komplexní čísla zapisovat: pomocí vzdálenosti od středu souřadnic a úhlu, který svírá příslušný vektor s osou x. To je tzv. goniometrický tvar, ve vyšší matematice obvykle vhodnější.

$$z = a + bi$$



$$z = |z| \times (\cos \alpha + i \sin \alpha)$$

Poprvé se komplexní čísla objevila na scéně už v 16. století jako dočasné mezivýsledky některých rovnic – objeví se, pomohou ke správnému výsledku a zase zmizí. Systematizoval je o necelých dvě stě let později Leonhard Euler, který zavedl dnešní symboliku. Písmeno i ve vyjádření komplexního čísla znamená odmocninu z minus jedné a je to číslo, které „bydlí“ přímo na imaginární ose, vzdálené od počátku o délku jedna. Ve škole jsme se učili, že záporná čísla se odmocňovat nedají. Je to pravda, ale jen v oboru reálných čísel. Když zavedeme komplexní čísla, tohle omezení padne.

Platí, že $i \times i = -1$ a zároveň také podle běžných algebraických pravidel, že $(-i) \times (-i) = -1$, protože $(-i) \times (-i) = i \times i$, minus krát minus dá jako vždy plus.

S komplexními čísly se počítá úplně normálně, jen je třeba si pamatovat, že $i \times i = -1$. Ukažme si třeba násobení $2 + i$ krát $3 - 2i$:

$$(2 + i) \times (3 - 2i) = 6 - 4i + 3i + 2 = 8 - i$$

Sčítání a odčítání je banální, dělení maličko pracnější, ale stačí umět rozšiřovat zlomky, a zvládnete ho taky – trik je v tom, jak dostat i pryč ze jmenovatele.

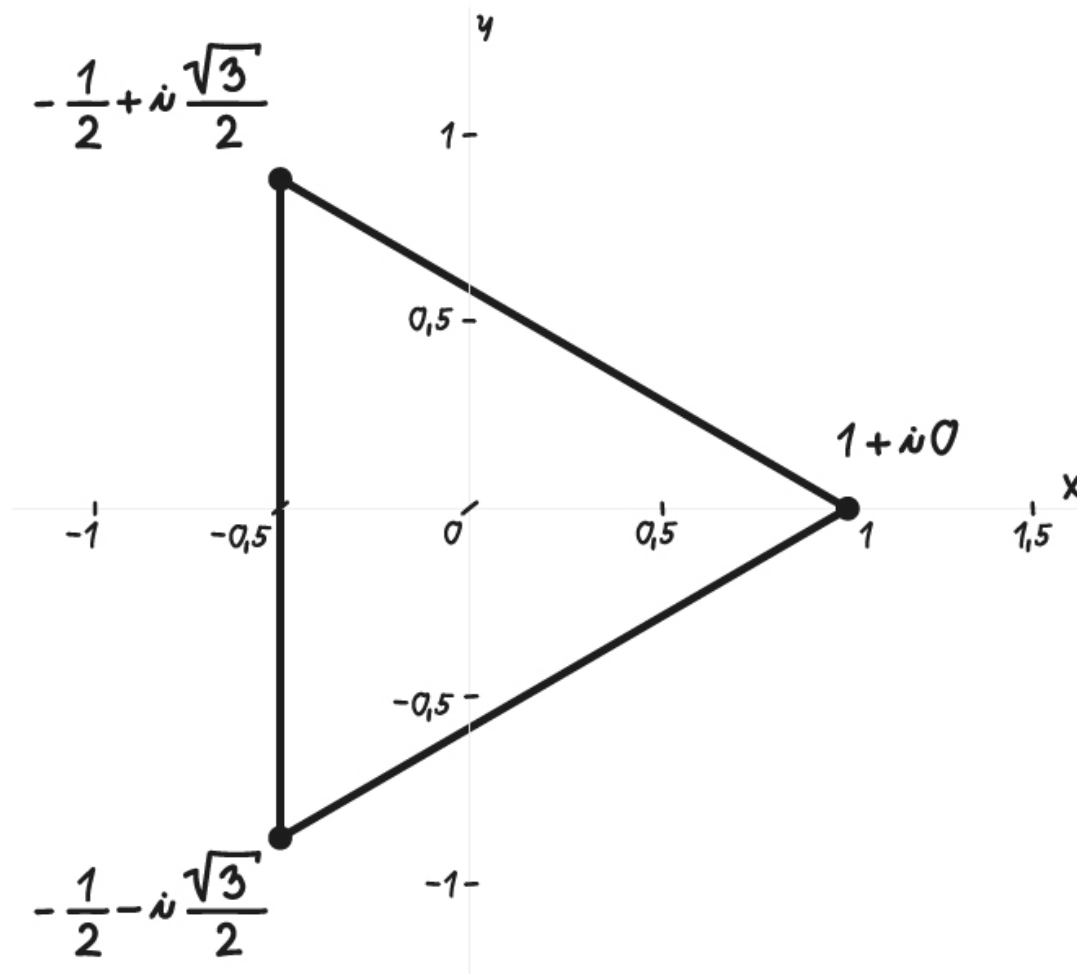
Odmocňovat záporná čísla je samo o sobě užitečné, ale opravdová kouzla začínají až s komplexními funkcemi. Funkce je předpis, který jednomu číslu přiřazuje jiné (viz [DERIVACE](#)). Tak třeba kvadratická funkce přiřazuje každému číslu jeho druhou mocninu, tedy nule nulu, trojce devítku, desítky stovku, číslu 11,34 číslo 128,5956... což se zapisuje jako $y = x^2$. Když v tomhle vzorci použijeme jako x komplexní číslo, bude fungovat taky a z každého x nám opět vypočte příslušné y . Tak třeba $(1 + i)^2 = 2i$, $(1 - 2i)^2 = -3 - 4i$. A tak dále. Komplexní funkce se dají derivovat a integrovat podobně jako „obyčejné“ a často je to kupodivu snazší – zhruba řečeno proto, že hřiště je větší, ubylo na něm překážek a mantinelů.

Potíž je v tom, že neexistuje opravdu dobrý způsob, jak komplexní funkce nakreslit. K zobrazení reálné funkce potřebujeme dva rozměry: na vodorovnou osu nanášíme x , na svislou y . Pro x^2 pak dostaneme dobře známou křivku – parabolu. Komplexní funkce však nedělá z jednoho čísla jedno, ale ze dvou dvě (reálnou a imaginární část), takže je třeba ji zakreslit do čtyř rozměrů... ouvej. Existují různé pomůcky (barevně kódované „vrstevnice“, dvojice prostorových grafů anebo tzv. Riemannova plocha), nic z toho se však nedá hodnotit slovem „snadné“. To je hlavní důvod, proč vzdělaná veřejnost nezná a nechce znát komplexní funkce. Škoda, jejich teorie je krásná a užitečná. Třeba náročnější elektrotechnika by bez nich byla úplně nemožná.

Kružnice udělaná z odmocnin

Kolik je odmocnina z jedné? Jedna, samozřejmě. Ale pozor: také minus jedna, protože $1 \times 1 = 1$, ale také $(-1) \times (-1) = 1$. Každá algebraická rovnice musí mít právě tolik kořenů, kolikátého stupně je. Takže rovnice $x^2 = 1$ má chtě nechtě dvě řešení, což je právě plus a minus jednička.

Kolik je třetí odmocnina z jedné? Výsledky musí být podle téhož pravidla tři. A nemůže mezi nimi být minus jednička, protože $(-1) \times (-1) \times (-1) = -1$. Kde jsou tedy ty zbylé dva kořeny rovnice $x^3 = 1$? Na jednotkové kružnici. Což je útvar, který stojí za trochu pozornosti.



Načrtněte si obvyklou dvojici os: vodorovnou pro reálná čísla, svislou pro imaginární. Vykreslete kružnici se středem v počátku a poloměrem jedna. Každou z os protne dvakrát: průsečíky s vodorovnou osou odpovídají číslům 1 a -1 , průsečíkům se svislou osou říkáme i a $-i$.

Kružnici, kterou jste nakreslili, se říká jednotková, protože všechna komplexní čísla, která na ní leží, mají vzdálenost od středu souřadnic (neboli absolutní hodnotu) rovnou jedné. Tím pádem na ní také leží všechny odmocniny z jedné, ať jsou kteréhokoli stupně. Rozloženy jsou vždy symetricky. Když chcete třetí odmocninu, rozdělíte jednotkovou kružnici na tři stejné části. Geometrická konstrukce je snadná, výpočtem lze zjistit, že vedle jedničky jsou těmi zbylými dvěma kořeny čísla $1/2 + i\sqrt{3}/2$ a $1/2 - i\sqrt{3}/2$. Zájemci si je mohou umocnit na třetí a přesvědčit se, že výsledek je opravdu 1.

Jsou to podivná nezaokrouhlená čísla (zejména, když si je zapíšeme jako $0,5 \pm 0,866i$) a na první pohled rozhodně nevypadají, že vznikla z pouhé

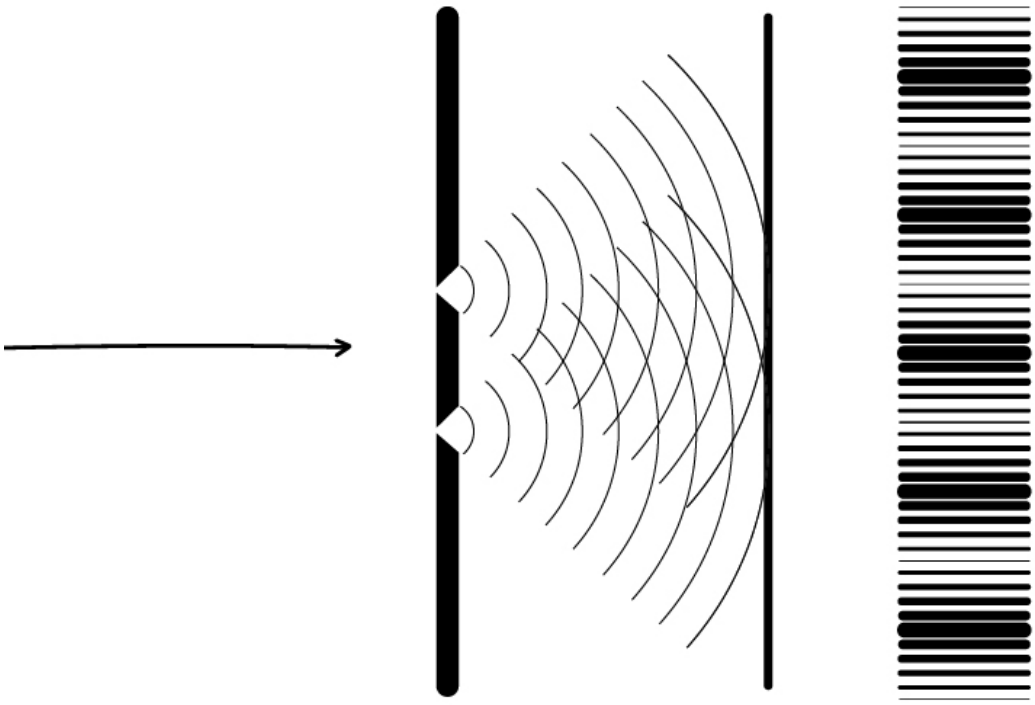
jedničky pomocí jednoduché operace. U vyšších mocnin to je ještě horší.

Anglicky se odmocninám z jedničky říká vysloveně poeticky: roots of unity, „kořeny jednoty“. (Taky se tak jmenuje jeden výtečný blog o matematice.) A skutečně se na ně můžeme dívat jako na výraz jednoty mezi algebrou a geometrií. Tvoří vrcholy pravidelného mnohoúhelníka: pro třetí odmocninu to je rovnostranný trojúhelník, pro čtvrtou čtverec, pro pátou pětiúhelník a tak dále. Počítač vám to spočte a nakreslí jako nic, v minulosti s tím však byly spojeny složité úlohy. Dokonce sám Gauss, jehož dílo rozhodně nebylo chudé na zásadní objevy, pokládal svou konstrukci pravidelného sedmnáctiúhelníka za výkon tak úžasný, že si přál mít tento obrazec na náhrobním kameni. Což se mimochodem nestalo, kameník to odmítl s (celkem rozumným) zdůvodněním, že by heptadekadon nebyl k rozeznání od kružnice.

Je pozoruhodné, jaké pojmové bohatství v sobě obsahuje tak prostá věc, jakou je obyčejné číslo jedna. Stačí na něj zlehka poklepat a rozevře se do překvapivých symetrií jako složitě tvarovaný květ.

Kvantum

Hodně malé věci se chovají úplně jinak než ty,
které známe.



Přírodní vědy po staletí závisely na intuitivním chápání, na názorné představě a na jasném souladu s realitou. Sůl se rozpouští ve vodě a každý si to může zkusit. Když vodu zahřejete, rozpustí se více soli, když roztok ochladíte, začne se sůl zas srážet. Když roztočíte dynamo rychleji, žárovka svítí jasněji. Když máte sedm bonbonů, nemůžete je rozdělit mezi tři děti rovným dílem, ledaže jeden rozkrájíte. Za všemi těmito každodenními zkušenostmi je teorie, která je vysvětluje a dovede předvídat a popsat další související jevy.

Jenže jak poznání postupuje, začíná se s intuicí a zkušeností rozcházet. Pokud jde o fyziku, dobře se orientujeme ve věcech „střední velikosti“ – těch, které jsou srovnatelné s velikostí našich těl a naší planety. Svět „nahore“, tedy vesmír, i svět „dole“ – molekuly, atomy, elementární částice a kvantové jevy – jsou naprosto mimo naši představivost. Naše smysly s nimi nemají a nikdy nebudou mít zkušenost. Můžeme si tak či onak znázornit černou díru nebo elektron, ale to neznamená, že tak vypadají doopravdy. Doopravdy totiž nevypadají nijak, protože se vymykají pojmu vypadat (viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#)). Řečeno programátorsky, operace „vypadat nějak“ pro ně není definována, přinejmenším z lidského hlediska. Nezdá se pravděpodobné, že by mohly existovat ne-lidské rozumné bytosti, jimž by světy kosmologie nebo kvantové fyziky byly smyslově přístupné – a kdyby existovaly, stejně by nám o tom neměly jak vyprávět.

To ovšem neznamená, že bychom o těchto světech nevěděli nic. [Richard Feynman jednou poznamenal](#), že kvantové fyzice nerozumí vůbec nikdo. Měl tím na mysli právě tu názornou představu, intuitivní porozumění. S kvantovými jevy však zacházíme jinými nástroji: matematicky. Dokážeme je převést do rovnic, o nichž z větší části nevíme, co vlastně znamenají, jaké složce fyzikální reality odpovídá ten který člen rovnice. To je nepříjemné. Tento přístup ovšem funguje, a to nesmírně přesně a spolehlivě, takže je jisté, že ty rovnice máme správně. Kdyby tomu tak nebylo, nedokázali bychom mimo jiné pracovat s polovodiči a neměli tudíž nic z moderní elektroniky.

Jen taková maličkost

Roku 1900 přemýšlel v Berlíně [Max Planck](#) o fyzikálním problému, který byl nevyřešenou záhadou: o tzv. záření černého tělesa. Název je matoucí, v podstatě jde o vyzařování energie jakýmkoli zahřátým objektem (Slunce se pro fyzika pohodlně vejde do definice „černého tělesa“). Čím je těleso teplejší, tím je kratší průměrná vlnová délka (viz [ULTRAZVUK](#)) jeho vyzařování. Záření radiátoru ústředního topení nevidíme, přestože existuje, nachází se však v infračervené oblasti spektra (vojenské brýle pro noční vidění by nás o tom snadno přesvědčily); záření Slunce vidíme dobře – a zdaleka ne všechno, protože vzhledem k teplotě Slunce značná část jeho vyzařování spadá do ultrafialové oblasti a do ještě

kratších a nám škodlivějších vlnových délek, které naštěstí pochyťá zemská atmosféra.

To je jasná a samozřejmá věc, jenže když se na základě fyzikálních zákonů známých a uznávaných v roce 1900 vypočítá vzorec popisující vztah mezi vlnovou délkou záření a jeho energií, je v souladu s experimentem jen v infračervené oblasti. Energie v něm je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky (ale stačila by i první mocnina), takže když vlnovou délku zkracujeme k nule, energie jde do nekonečna. A dávno předtím, už v ultrafialové oblasti spektra, vyšplhá vypočtená energie do zcela absurdních hodnot.

Když je experiment v rozporu s teorií, je potřeba změnit teorii. Což v tomto případě nebylo jednoduché, protože vzorec pro energii záření vycházel z obecně uznávaných a dobře prověřených poznatků, které se jen tak snadno vyvrátit nedaly.

Nikomu se do toho ani příliš nechtělo. Fyzika vypadala začátkem dvacátého století jako velmi solidní a velmi úplná stavba, v níž zbývá objasnit pár maličkostí, vedle záření černého tělesa například radioaktivitu. Tento dojem, sdílený velkou částí vědců, byl – jak víme dnes – naprosto mylný. Jen s tím vyjasňováním „maličkostí“ začali, stavba jim spadla skoro celá.

Planckovy schody

Maxe Plancka napadlo podivné řešení. Kdyby se energie neměnila spojitě, ale jen po nedělitelných balíčcích, a kdyby velikost takového balíčku rostla s vlnovou délkou, pak by se v jistém okamžiku při zkracování vlnové délky došlo do bodu, kdy se energie už nemůže vyzářit, protože balíček je příliš velký. V tu chvíli začne celková vyzářená energie prudce klesat směrem k nule, místo aby rostla do nekonečna.

Představte si, že stoupáte do svahu. Nadmořská výška roste plynule s každým krokem. Můžete udělat krok větší či menší; výška může nabývat libovolné hodnoty. To je představa klasické fyziky.

Podle Maxe Plancka však nestoupáte po stráni, ale po schodech. Výška, v níž se nacházíte, se mění skokem, od jednoho schodu k druhému, nemůže mít mezilehlou hodnotu. A co víc – výška schodů není stálá. Čím jste výš, tím jsou schody vyšší a dá vám víc práce vyhoupnout se na ten další. Nakonec dorazíte ke schodu tak vysokému, že se na něj už nevyškrábate. Přírůstek vaší výšky, který až dosud byl schod od schodu stále větší, rázem klesne na nulu.

Když Planck zapsal opravené rovnice, ukázalo se, že souhlasí s experimentálně pozorovanými daty. Svým balíčkům říkal kvanta (jednotné číslo: kvantum). Jenže nikdo nevěděl, proč by se elektromagnetické záření (neboť o něm si celou dobu povídáme: světlo i teplo jsou speciálními případy elektromagnetického záření) mělo chovat tak podivně. Světlo hvělo [podle Maxwellovy teorie](#) (mnohokrát

...
experimentálně ověřené, ostatně platné dodnes) vlněním. Jeho vlnová délka a frekvence nemá důvod měnit se jinak než spojitě.

Světlo je z částic

Odpověď nabídl roku 1905 Albert Einstein. Nebyla přijata s nadšením. A opět: zcela jí nevěřil ani sám Einstein, [formuloval ji velmi opatrně](#) jako domněnku. Einstein otočil povahu elektromagnetických vln na hlavu. Prohlásil, že nejde o vlnění, ale o proud částic. Energie této tehdy hypotetické částice, které dnes říkáme foton, by byla nepřímo úměrná její vlnové délce.

To slovo „její“ by vás mělo zastavit ve čtení. Vlnovou délku má vlna! Jak ji může mít částice?

Protože vlnovou délku světla můžeme změřit, řekl Einstein. Protože světlo se nám z jednoho hlediska jeví jako vlnění a z jiného jako částice, a přestože to zní jako nesmysl, experimenty to potvrzují tak jasně, že se s tím asi budeme muset smířit. Tím se také okamžitě vysvětlila Planckova kvanta – skládá-li se elektromagnetické záření z nedělitelných částic, je kvantování energie po balíčcích zcela přirozené.

Všechno je z částic a z vln zároveň

Ještě dál zašel roku 1923 mladý francouzský fyzik Louis de Broglie, když usoudil, že bude důslednější předpokládat „duální“ charakter všeho, nejen elektromagnetického záření. To, co se nám konvenčně jeví jako vlnění, je zároveň hmotou (jak to řekl Einstein o světle) a to, co se jeví jako částice hmoty, je zároveň i vlněním. De Broglie dokonce matematicky vyjádřil vztah mezi částicovým a vlnovým charakterem reality v extrémně stručné rovnici

$$p = h/\lambda$$

kde p je hybnost (vlastnost hmoty – ve fyzice rozumíme hybností součin hmotnosti a rychlosti čehokoli, co se pohybuje, $p = m \times v$), λ je vlnová délka (vlastnost vlnění) a h je tzv. Planckova konstanta. Ta se jako součinitel objevila už v Planckově rovnici záření černého tělesa.

Planckova konstanta je nesmírně malé číslo: $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s, čímž se automaticky vysvětluje, proč de Broglieho „vlny hmoty“ nepozorujeme v makrosvětě, ať už jsou čímkoli. Z jeho vzorce totiž plyne, že $\lambda = h/(m \times v)$, takže pro objekt o hmotnosti 85 kilogramů pohybující se rychlostí 2,8 m/s (to jsem já při běhu) vyjde jeho vlnová délka

$$\lambda = 6,626 \times 10^{-34} / (85 \times 2,8) = 2,78 \times 10^{-36} \text{ m.}$$

Deset na minus třicátou šestou metru (viz [BILION](#)) je ovšem neměřitelně (a nepředstavitelně) malá délka. Průměr atomu se pohybuje od 5×10^{-11} do 5×10^{-10} m podle toho, o jaký prvek jde, průměr jádra atomu je 10^{-15} metru a to je nejmenší vzdálenost, o které ještě můžeme (v současné době) říci, že má nějaký fyzikální význam související se hmotou. Vlnová délka, kterou jsme spočetli, je ještě o jednadvacet (!) desítkových řádů menší, tedy pro všechny praktické účely nulová.

Vibrující pravděpodobnost

Když se začalo mluvit o de Broglieho práci, přemýšleli o ní mimo jiné na technické univerzitě v Curychu, kde přednášel rakouský fyzik Erwin Schrödinger (viz též [SCHRÖDINGER A KOČKA](#)). Ten se pokusil dát de Broglieho vlnám pevnější matematický základ. Výsledkem této snahy byla roku 1926 tzv. Schrödingerova rovnice. Dává číselné výsledky, které jsou experimentálně ověřitelné, v čemž je její zásadní význam. Schrödinger jako první nabídl fyzikům most mezi spekulativními nápady a měřitelnými výsledky.

V dobré [tradici vznikající kvantové fyziky](#) ani on zpočátku nevěděl, jak rozumět své vlastní rovnici. Otázka totiž zněla: jaký fyzikální význam má vlastně de Broglieho vlna? Popisuje vlnění, dobře – ale co se to vlní, co to kmitá? Znamená to, že elektron a proton vypadají jako vibrující kulička? De Broglie na tohle téma neřekl nic, Schrödinger byl zřejmě ochoten z nedostatku lepšího nápadu nějakou takovou mechanickou interpretaci připustit.

S lepším, velmi radikálním řešením přišel [Max Born](#). Kombinací matematiky a intuice odhadl (podle toho, co víme dnes, zcela správně), že vlnová funkce, kterou počítá Schrödingerova rovnice, souvisí s pravděpodobností výskytu částice v konkrétním místě prostoru (přesně vzato, že tato pravděpodobnost číselně odpovídá druhé mocnině [amplitudy](#) vlnové funkce).

Born tedy řekl, že nejde o žádné kmitání v běžném smyslu slova. *Částicová vlna není vlna částic*, částicová vlna udává pravděpodobnost, že částice je v daný okamžik v daném místě. Ona totiž může být hned v následujícím okamžiku, ať je to sebemenší okamžik, kdekoli jinde. Doslova kdekoli, třeba tisíce světelných let daleko (na rychlost světla teď zapomeňte, ta s tím nemá co dělat, nejde totiž o žádný let, fyzické přemístění!). Pravděpodobnost, že bude hodně daleko, je ovšem hodně malá. A naopak.

Vypadá to jako strašlivý nesmysl, nebo ještě hůř – jako černokněžnictví, popírání vědy. Je nemožné to pochopit intuicí, v tom má Feynman naprostou pravdu, a je ještě těžší přijmout to filozoficky. Abyste se s tím smířili, musíte především pochopit, že realita prostě není taková, jak se

nám jeví. Sám Schrödinger tuto interpretaci odmítal (a vymyslel kvůli tomu slavný myšlenkový experiment s kočkou). Ostatně nejen on – trnem v oku byla především Einsteinovi a vyprovokovala ho ke slavné větě: „Ich kann nicht glauben, daß Gott mit dem Weltall Würfel spielt.“ ([Nemohu uvěřit](#), že by Bůh hrál s vesmírem v kostky.)

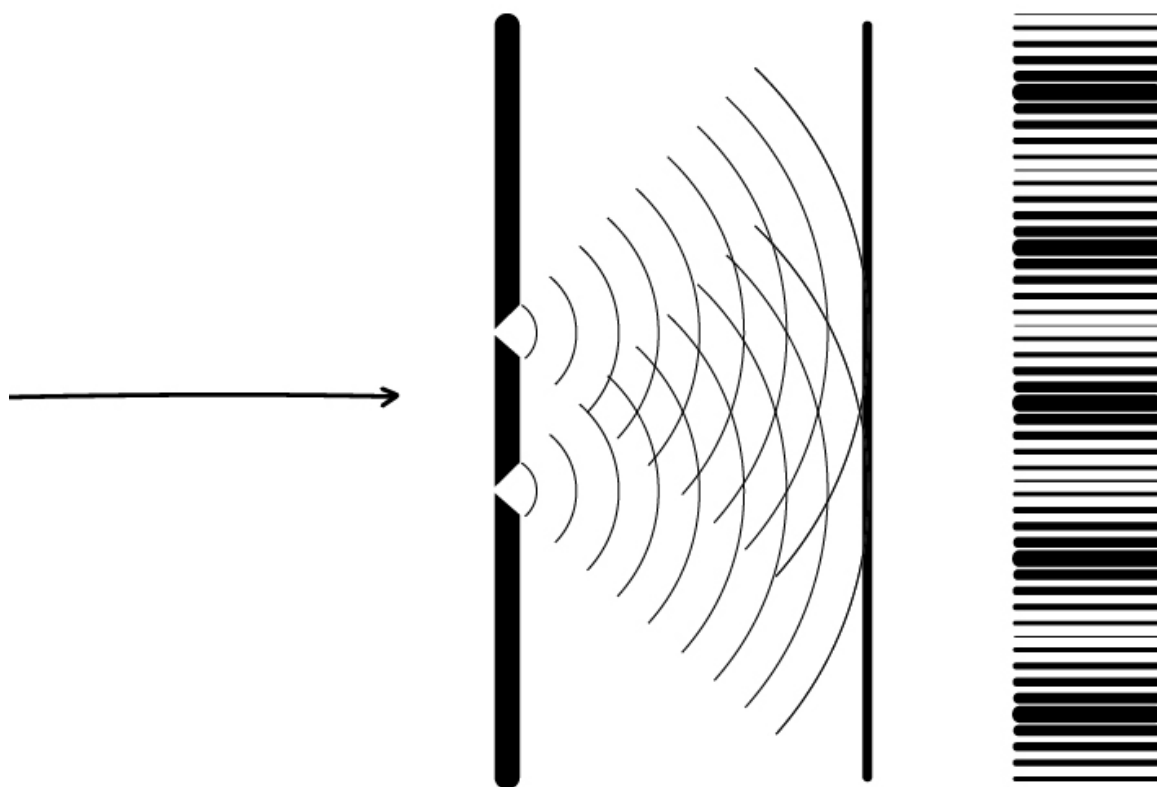
Zatáhnout pravděpodobnost do fyziky, vnímané tradičně jako plně deterministická věda, vypadalo jako nepříjemný krok zpět do mlhavých končin, odkud ji právě Einsteinova generace slavně a pyšně vyvedla.

To nejšílenější: dvouštěrbinový experiment

Tyto výpočty se také, což je vůbec nejdůležitější, podařilo experimentálně potvrdit. Největší význam měl přítom pokus, který se nejprve pokládal za potvrzení existence de Broglieho vln elektronu, dnes je jeho interpretace složitější. Poprvé ho provedli Clinton Davisson a Lester Germer v Bell Labs v roce 1927 a je znám jako dvouštěrbinový experiment.

Ve škole se o něm dodnes dozvíte, že je potvrzením „vlnově korpuskulárního dualismu“, tenhle termín ale před fyziky nepoužívejte, opustili ho už dávno. Kromě toho to není pravda: dvouštěrbinový experiment neprokazuje, že se elektron chová zároveň jako vlna a jako částice; prokazuje, že se nechová ani jako vlna, ani jako částice, ale jako něco úplně jiného. (Jako elektron.) Richard Feynman říkával, že v tomto pokusu je shrnuta celá podstata kvantové fyziky, celá její nepochopitelnost.

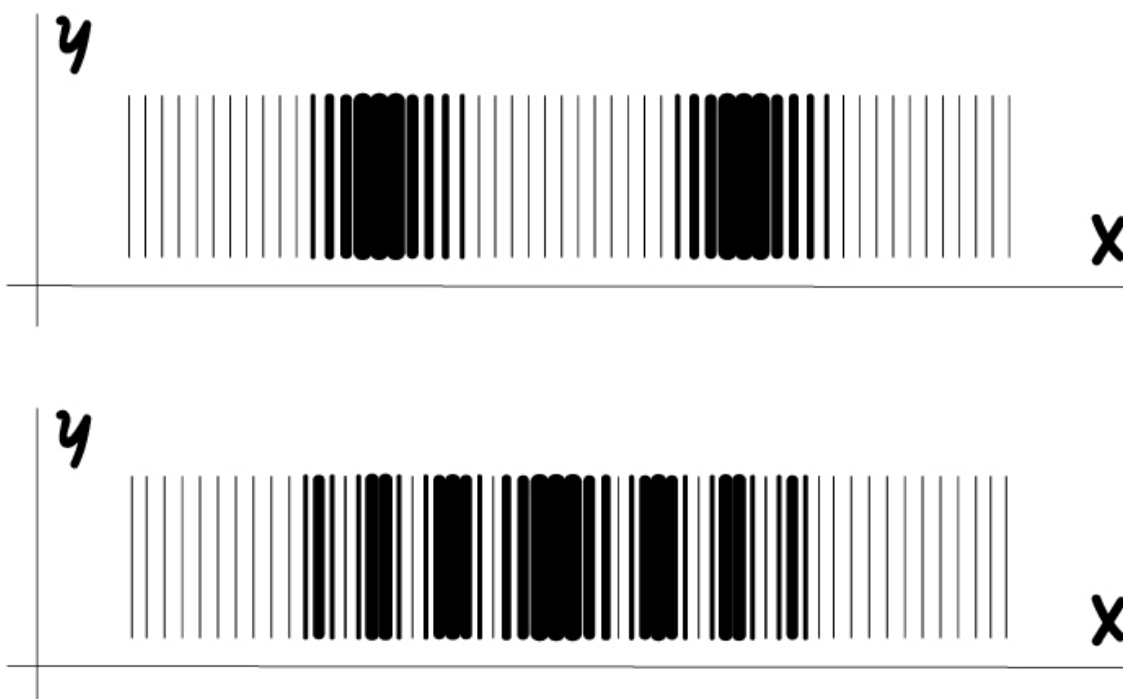
Nejspíš měl pravdu, už jen proto, jak jednoduchý ten pokus je. Davidson a Germer vypouštěli elektrony ze zdroje (z nějaké elektronky, stačila by obyčejná žárovka se žhaveným vláknem) na stínítko schopné zaznamenat jejich dopad. Do cesty mezi zdroj a stínítko umístili desku se dvěma úzkými svislými štěrbinami. Co se stane?



Kdyby byl elektron něco jako hodně malá kulička – hmotná částice řídící se běžnými pravidly makrosvěta –, pak by po nějakém čase na stínítku vznikly dva svislé pruhy odpovídající svou polohou šterbinám. Většina elektronů by se totiž od desky odrazila a ty, které by prošly šterbinou, by vletly do stínítka přímo naproti ní. *Tohle se ale nestane.*

Kdybychom proti stínítku poslali vlnu, třeba vodní, stalo by se něco jiného. Čelo vlny narazí na desku a skrz projde jen maličký úsek vlny šířkou odpovídající šířce šterbiny. Na druhé straně, mezi deskou a stínítkem, se ale začne rozšiřovat, protože to je přirozené chování veškerých vln (představte si symbolickou značku pro wi-fi). O kousek dál do sebe vlny z první a druhé šterbiny narazí. V některých místech se budou zeslabovat, v jiných zesilovat, říká se tomu interference. Na stínítku se nevytvoří dva svislé pruhy, ale hodně svislých pruhů odpovídajících vrcholům a sedlům složeného vlnění. Říká se tomu difrakční (tj. rozptylový) obrazec. A právě *tohle* se s elektrony při dvoušterbinovém experimentu *stane*.

Dobrá: elektrony jsou vlny. To má ale dva háčky. Za prvé, z jiných experimentů existuje spousta důkazů o tom, že elektrony jsou částice. To nemůžeme jen tak zahodit do koše.



Za druhé, je tu jedna daleko horší věc. Zdroj elektronů totiž můžeme seřadit tak, aby je vypouštěl jeden po druhém. Nový elektron nevyletí, dokud ten předchozí nenarazí do stínítka. Tím je zaručeno, že proti štěrbinám a stínítku letí vždy *jen jeden jediný* elektron. Obrazec na stínítku nevznikne najednou, ale postupně, tečku po tečce. Co tečka, to dopad jednoho elektronu. Jedné částice.

A přesto i v tomto případě vznikne difrakční obrazec, stačí jen chvíli počkat, až těch elektronů bude na stínítku dost. To nedává vůbec žádný smysl, protože zároveň prokážeme, že se elektron chová jako částice (po každém průletu vznikne na stínítku nová přesně ohraničená tečka) i jako vlna (z teček se poskládá difrakční obrazec). Neexistuje způsob, jak si něco takového představit názorně. Nejde to. Nic, co odpovídá naší každodenní zkušenosti, se takhle chovat nemůže. Tohle není žádný dualismus (prázdné slovo!), tohle je dočista nová entita, kterou pomocí těch známých nevysvětlíme.

V tom je velikost kvantové fyziky a lidí, kteří ji vynalezli: dokázali si s touto absurditou poradit, překonat omezení dané naprostou nepředstavitelností.

Další vývoj kvantové teorie byl dán hlavně tím, že vyhrála svou revoluci a stala se převládajícím paradigmatem, základem celé fyziky. Řečeno s Bertoltem Brechtem, po obtížích hor přišly obtíže rovin. O těch se dočtete v kapitole [KVARK](#).

Kvark

Atom se skládá z protonů, neutronů a elektronů.
Protony a neutrony se skládají z kvarků.

PROTON



NEUTRON



V polovině třicátých let dvacátého století vypadala fyzika dobře. Měla za sebou neuvěřitelně rychlý a úspěšný vývoj. Ještě v roce 1905 musel Einstein dokazovat, že atomy opravdu existují. V roce 1935 už vědci věděli zcela přesně, z čeho se skládají: jádro je tvořeno protony a neutrony, kolem jádra obíhají elektrony.

Mendělejevova tabulka prvků (viz [ASTAT](#)) tím byla objasněna se všemi detaily: počet protonů v jádru určuje, o který prvek jde, od vodíku s jedním protonem po uran s devadesáti dvěma. Počet neutronů od sebe odlišuje izotopy téhož prvku, což vyřešilo záhadu, proč nejsou relativní atomové hmotnosti celá čísla; je tomu tak proto, že většina prvků se na Zemi vyskytuje jako směs izotopů (viz [IZOTOPY](#)). Elektrony obíhají jádro, je jich stejný počet jako protonů, aby se vyrovnaly elektrické náboje, a vnější vrstva elektronů – nejbližší od jádra – odpovídá za chemické vlastnosti prvku, především za vazby mezi atomy v molekulách. Všechno klapalo jak hodinový strojek.

Fyzikové samozřejmě věděli, že ještě nevědí všechno, ale celkem omluvitelně předpokládali, že ty hlavní věci pochopili správně a teď budou obraz mikrosvěta prohlubovat a zpřesňovat.

Nejdřív věděli skoro všechno

Dost vysoko na seznamu úkolů stála otázka, čím drží pohromadě jádro atomu. Souhlasné elektrické náboje se odpuzují. Co tedy přitahuje kladně nabitě protony k sobě? A co je svazuje s neutrony, které žádný náboj nemají?

Werner Heisenberg (viz též [HEISENBERGŮV PRINCIP NEURČITOSTI](#)) přišel s nápadem, že neutron a proton jsou vlastně dva stavy jediné částice, kterou nazval nukleon. Nukleony podle něj neustále přecházejí z jednoho stavu do druhého. Neutron ze sebe vyše jeden záporně nabitý elektron a promění se tak v proton. Proton přijme tento elektron a změní se v neutron – a tak dále, pořád dokolečka. Neustálá výměna elektronů je silou, která jádro udrží pohromadě.

Byla to elegantní myšlenka, matematicky to zhruba vycházelo a svět by kvůli takovému vysvětlení nebyl složitější. Pořád by vystačil jen se třemi elementárními částicemi.

Jenže sám Heisenberg věděl, že přesně takhle to být nemůže. Vycházela mu sice bilance hmotnosti a elektrického náboje, nefungovalo však účetnictví jiné vlastnosti, takzvaného spinu. (Slovo „spin“ znamená otáčení, rotace, ale pokud tady vůbec o nějakou rotaci jde, pak velmi abstraktní, v myšleném matematickém prostoru, ne v našem třírozměrném. Subatomární částice nejsou rotující kuličky.) Pro spin každopádně platí zákon zachování a Heisenbergovo schéma ho porušovalo.

Pak objevili mezon

Řešení nabídl japonský fyzik Hideki Jukawa. Navrhl hypotetickou částici, která přenáší sílu stejně jako elektron v Heisenbergově schématu, ale má nulový spin, nemůže tudíž jeho bilanci ovlivnit. Jukawa také spočetl, že taková částice by musela mít hmotnost někde mezi lehkým elektronem a těžkým protonem či neutronem. Odtud dostala název: mezon (z řeckého mesos – střední).

V kontextu toho, jaké zvraty se tehdy ve fyzice odehrávaly a jak divoké teorie se vymýšlely – a často prokazovaly –, nebylo zas tak zvláštní postulovat novou částici. [Carl Anderson](#) ostatně našel [mezon](#) pomocí mlžné komory v kosmickém záření takřka na počkání.

Mlžná komora byla tak důležitým nástrojem počátků experimentální částicové fyziky, že si rozhodně zaslouhuje bližší vysvětlení. Je to průhledná vzduchotěsná krabice naplněná podchlazenou párou vhodné látky, zpravidla methanolu. Pára je v nestabilním stavu a stačí jí sebemenší podnět, aby se začala srážet. Takovým podnětem může být prolétající elektron nebo jiná částice. Zanechá za sebou stopu v podobě kapiček, tu lze vyfotografovat a dále zkoumat. Komoru lze například vložit mezi elektrody a pozorovat, co s drahami částic udělá elektromagnetické pole – tak se dá poznat, zda mají kladný, či záporný náboj a také to, jak jsou těžké.

Na konstrukci mlžné komory stačily technologie z počátku dvacátého století (dnes taková zařízení najdete ve školních kabinetech nebo u nadšených amatérů). Modernější a přesnější verzí je bublinková komora, kde se místo podchlazené páry používá přehřátá kapalina, zpravidla kapalný vodík (takže slovo „přehřátá“ je trochu matoucí, bod varu vodíku je $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Pak vymysleli neutrino

K dalším nevyřešeným hádankám patřil takzvaný beta rozpad (viz [RADIOAKTIVITA](#)). Radioaktivní záření beta objevil Rutherford počátkem dvacátého století a správně ho identifikoval jako proud elektronů vycházející z jádra atomu. Protože se tou dobou o jádru nevědělo skoro nic, nevzbudil objev žádnou kontroverzi. Na tu došlo později: kde se v jádru elektrony berou, když tam žádné nejsou?

Částečnou odpověď poskytla zmíněná Heisenbergova domněnka (neutrony se stále mění v protony a naopak), ale opět nevycházela bilance. Vysvětlení odporovalo jak zákonu zachování spinu (přesněji: momentu hybnosti), tak – ještě hůř – zákonu zachování hmotnosti a energie. Oba problémy vyřešila další hypotetická částice, které dal [Fermi](#) název neutrino, „maličký neutronek“. Doplnila bilanci, ale prokázat její existenci se podařilo až roku 1956.

A takhle tedy vypadala částicová fyzika v době, kdy její rozvoj zpomalila válka: vědci znali proton, neutron, elektron (a jeho dvojče s opačným nábojem), mezon a hypotetické neutrino. Pomocí těchto částic dovedli obstojně vysvětlit strukturu hmoty.

Pak zas nevěděli skoro nic

Pak ale přišla rána z čistého nebe, a to doslova. Kosmické záření – proudy částic, jež prolétají vesmírem a neustále bombardují Zemi – začaly další vědecké týmy zkoumat stejným způsobem jako Anderson. Ukázalo se, že částic není šest, ale mnohem víc, s rozmanitými hmotnostmi. S kladnými i zápornými náboji. S tím teorie nepočítala. Nedovedla vysvětlit jejich existenci.

Důkladnější průzkum chování Jukawova mezonu zas odhalil, že nemůže být tou částicí, která drží jádro atomu pohromadě, jakkoli to na papíře vycházelo bezvadně.

Tou dobou začali experimentátoři stavět první urychlovače částic, aby se mohli přírody „zeptat“ i na to, co z kosmického záření nebylo patrné. Urychlovač je stroj, dnes obvykle gigantický (Velký hadronový urychlovač v ženevském CERNu je tvořen kruhem o délce 26,5 kilometru), který umožňuje přesně řídit dráhu letu elementární částice a udělit jí obrovskou rychlost blížící se – je-li to třeba – rychlosti světla. Takto řízenými částicemi lze ostřelovat různé materiály anebo je nechat srážet mezi sebou a pomocí stále důmyslnějších detektorů sledovat, co se stane. Srážky ukazovaly, že elementární částice vůbec nejsou elementární. Mohou se rozpadat a spojovat.

A neutěšeně jich přibývalo. Enrico Fermi, tou dobou v rámci oboru asi nejchytřejší člověk na světě, jednou připustil, že už si ani zdaleka nepamatuje jejich názvy, a vztekle dodal, že kdyby se chtěl zabývat taxonomií, stal by se botanikem, ne fyzikem. Nejspíš přeháněl, byl proslulý nadlidskou pamětí, ale jeho rozladění bylo pochopitelné. Přehledný obraz světa se zas jednou rozpadl a fyzika musela hledat nový.

V téhle situaci jedno zázračné dítě zvažovalo, jakému vědeckému oboru se věnovat.

Prosím, prosím, pane učiteli

„Jestliže vidím dál než ostatní“ je to proto, že jsem obklopen trpaslíky.“ Takhle parafrázovat Newtona, to je pořádná drzost. A dobrý fór. A urážka mnoha lidí jednou stručnou větou. Jinými slovy: Murray Gell-Mann jako vyšitý.

Otec Murraye Gell-Manna [pocházel z rakouské Bukoviny](#), nejvýchodnějšího cípu mocnářství. Ještě před první světovou válkou odešel do Ameriky, kde se oženil s Pauline Reichsteinovou, pro změnu z Haliče. Jmenoval se daleko obyčejněji Gelman, ale byl to muž velkých ambicí a chtěl se odlišit od průměru ve všech směrech, proto si někde ve frontě na doklady na Ellis Islandu přičaroval do jména spojovník. (Jeho staršího syna Bena časem otrávil neustálé hláskování a stal se opět Gelmanem. Mladší Murray byl s otcovým vynálezem spokojen.)

Murray Gell-Mann se narodil roku 1929. V osmnácti letech absolvoval Yale a v jednadvaceti k tomu přidal Ph.D. z Massachusettského technologického institutu. Spolužáci si ho zapamatovali jako šprta z první lavice, který se stále hlásí, nadskakuje napětím, že zná správnou odpověď a může se jí blýsknout, předvést se.

Tohle předvádění mu zůstalo po celý život. Zajímal se o všechno od typů ledniček po archeologii, všechno si pamatoval, vždy byl připraven poučit a zároveň zdůraznit, že vy o tématu nemáte ani ponětí. V čínských restauracích objednával sobě – a svým společníkům, bez nichž by to nemělo smysl – v mandarínštině. Kdekoli v cizině nahlas četl a překládal nápisy a cedule, ať o ty informace lidé kolem něj stáli, či ne. Na každé procházce hlásil druhy ptáků: malý kluk, který nenasytně touží po pochvalě. Vydrželo mu to po celý život.

Zároveň se však hodně naučil. Na MIT byl jeho vedoucím Victor Weisskopf, vynikající rakouský fyzik se zkušenostmi z nejvyšší ligy: studoval u Bohra spolu s Heisenbergem, za války zastával důležité místo v Los Alamos. Od Weisskopfa získal Gell-Mann vzhled do aktuálních fyzikálních problémů. Zároveň svého učitele výrazně předčil v matematice, což bylo tou dobou stále důležitější.

Selský rozum v koncích

Moderní fyzika je pro laiky těžká hlavně proto, že je silně matematizovaná. Nejde o to, že se zapisuje složitými rovnicemi, které bychom vy a já neuměli vypočítat. V tomto smyslu jsou spolehlivě nesrozumitelné už třeba Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole staré 160 let a mnoho jiných fyzikálních zákonů. Rozdíl je ale v tom, že dřív byla k dispozici názorná představa. Abyste se naučili Maxwellovy rovnice použít, potřebujete k tomu důkladnou přípravu; pochopit, co vyjadřují, však není těžké. Dá se to vyložit za pár minut a budete si to umět jak představit, tak propojit s každodenní zkušeností.

Po roce 1900 se však fyzikové pustili do oblastí, kde názorná představa nestačí. Malou ukázkou je výše zmíněný spin: rotace, která žádnou rotací není, ale říká se jí tak, protože se do rovnic dostala jako analogie rotačního momentu z našeho makroskopického světa. Tady se dá pozorovat, jak se vědci pořád ještě konečky prstů drželi známých pojmů, věcí, které si lze představit a nakreslit: elektron jako rotující kulička...

S přibývajícím počtem elementárních částic přestalo fungovat i tohle. Aby se celá ta „zoologická zahrada“, jak sbírku objevů nemilosrdně překřtil Fermi, vůbec dala nějak vysvětlit, bylo potřeba částicím přiřknout další ryze abstraktní vlastnosti. Dostaly názvy jako „barva“ a „podivnost“, což už byl projev šibeničního humoru. Bylo jasné, že jde o nějaké atributy částic, že jim lze přiřadit číselné hodnoty, ale co ty vlastnosti vlastně znamenají, jak „vypadají“, na to se už nikdo neptal. Fyzika, přinejmenším ta její část, která se zabývá subatomárními ději, následovala matematiku: stala se vědou o abstraktních strukturách.

Murray Gell-Mann rád říkal, že se filozofií nezabývá, což byl v jeho kruzích rozšířený postoj: Feynman s vážnou tváří tvrdil, že mu filozofické debaty zakázal jeho lékař, Gell-Mann ho trumfl tím, že si náležitě formulované lékařské doporučení skutečně opatřil. Ve skutečnosti se však filozofii vyhnout nemohli, protože se pohybovali na samé hranici poznání. Otázka, jak moc skutečné je to, čím se zabývají, se nedala obejít.

Mendělejev 2.0

Gell-Mann poznal její naléhavost naplno, když se koncem padesátých let na Kalifornském technologickém institutu (Caltech) začal zabývat svým životním tématem: teorií, která by zavedla do „zoologické zahrady“ pořádek a vysvětlila, proč je subatomárních částic tolik. Velmi zhruba šlo o obdobu situace, v níž byl Mendělejev, když sestavoval tabulku prvků. Konečným vysvětlením periodické tabulky je vnitřní struktura atomů. Co kdyby podobná zákonitost fungovala i uvnitř částic?

Murray Gell-Mann zdaleka nebyl sám, koho napadlo, že „elementární“ částice nejsou elementární, že mají vnitřní strukturu. Byl ale první, kdo navrhl vysvětlení, které bylo v souladu s většinou známých experimentálních výsledků.

Nejprve sestavil klasifikační schéma, které nazval osmidílnou stezkou (Eightfold Way), což je narážka na jeden ze základních konceptů buddhismu, s nímž nemá kvantová fyzika nic společného – ale Gell-Mann by nepřenesl přes srdce, aby si odpustil intelektuální, až mystickou narážku. To byla skutečně analogie Mendělejevovy tabulky: mechanismus příbuznosti částic to nevysvětlovalo, ale bylo zřetelné, že nějaký existovat musí. Za tuhle práci dostal roku 1969 Nobelovu cenu.

Pak pokročil dál, tedy k objasnění mechanismu. Na základě čistě matematických úvah navrhl, že některé z částic, jimž říkáme elementární, například neutron a proton, se ve skutečnosti skládají z částic vpravdě elementárních, takzvaných kvarků. (Název pochází – patrně, Gell-Mann na tohle téma rád mlžil – z Plaček nad Finneganem od Jamese Joyce, tedy z dalšího überintelektuálního zdroje). Vlastnosti kvarků navrhl tak, aby do sebe všechno zapadalo, aby byly těmi správnými ozubenými kolečky vesmíru.

Pochopitelně se ho ptali, zda kvarky opravdu existují, anebo zda jsou matematickou abstrakcí. Murray Gell-Mann se odpovědi vyhýbal, seč mohl, aby se v žádném případě neblamoval – z toho měl celý život hrůzu. Když se přece jen musel vyjádřit, klonil se k druhé možnosti. Šalamounsky: zastával názor, že kvarky drží uvnitř částic nekonečně velká síla, takže je nikdy pozorovat nemůžeme, takže vlastně neexistují, přestože existují...

Tahle klička mu nevyšla. Dnes je existence kvarků prokázána experimentálně. Víme, že jich je šest. Spolu s dalšími jedenácti částicemi tvoří tzv. standardní model částicové fyziky, tu nejlepší subatomární analogii Mendělejevovy tabulky, jakou dnes máme k dispozici. Vychází z Gell-Mannovy osmidílné cesty, je jejím zpřesněním a zdokonalením.

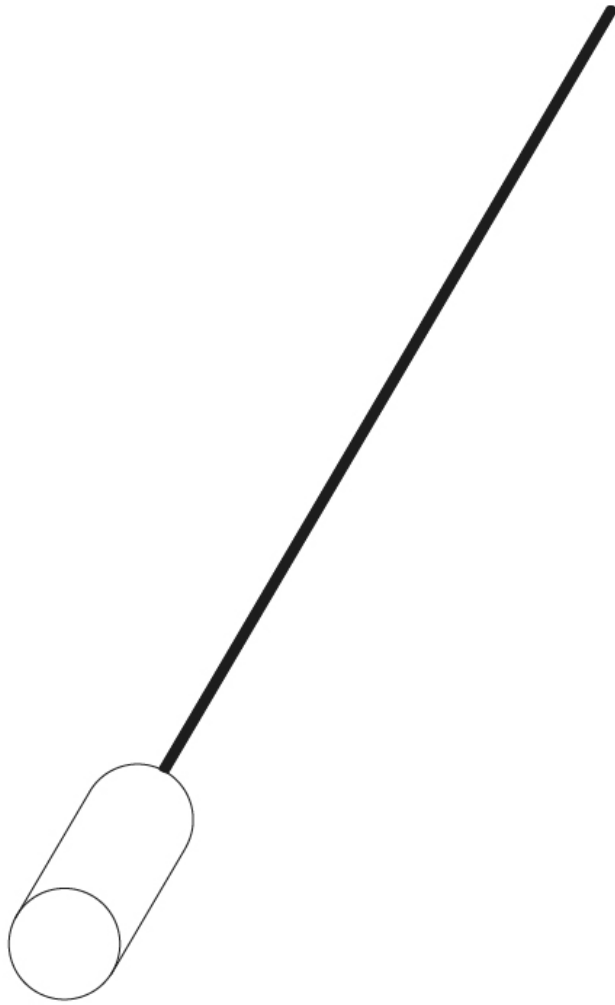
Ústup do Santa Fé

Po Nobelově ceně, kterou získal ve čtyřiceti, se Gell-Mannova kariéra zpomalila. Proslul jako vůbec jediný laureát Nobelovy ceny, který nedodal v písemné podobě svou nobelovskou přednášku. Sliboval, odkládal a nakonec to vzdal. Připravil se tím o nejprestižnější publikaci, jakou může vědec mít. Stejně dopadl s popularizační knížkou Kvark a jaguár, kterou za něj nakonec napsal najatý autor a vyšla v druhořadém vydavatelství, protože Bantam Books ztratily zájem a trpělivost, ne však vyplacenou zálohu, tu jim musel Gell-Mann vrátit.

Roku 1987 se stal jedním ze zakladatelů vědeckého ústavu zvaného Santa Fe Institute, dodnes jednoho z hlavních center interdisciplinárního výzkumu. Vzešly odtamtud některé důležité práce týkající se teorie složitosti a deterministického chaosu (viz [CHAOS](#)), stejně jako mnoho filozofování a přemítání nad osudy lidstva. Stárnoucí Gell-Mann se nadšeně zapojoval do jednoho i druhého, vedle toho si podržel profesuru na Caltechu. Po smrti své ženy Margaret se podruhé oženil, dostal se do průšvihů, protože nakupoval pašované umělecké předměty (pak je do jednoho vrátil do Peru, odkud pocházely, a dostal za to tamní státní vyznamenání), učil se další jazyky, cestoval, poučoval... prostě žil podle svých představ. Zemřel koncem května letošního roku; jeden z posledních mezi těmi, kdo ještě skutečně pracovali s Fermim a Oppenheimerem, kdo se potkávali s Einsteinem. Jeden z těch, kdo otevřeli okno do nepředstavitelna podivnějšího než Alenčina říše divů.

Laser

Světlo se dá v některých látkách nashromáždit a pak vyzářit najednou.



Když narazí foton do atomu a má správnou vlnovou délku, pozvedne jeden elektron do excitovaného stavu. Moment. Foton? Vlnová délka? Excitovaný stav? Jedno po druhém.

Atom rovná se jádro plus elektrony. V základní představě o atomu (viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#)) elektrony obíhají jádro po přesně vymezených drahách. Na každé z drah nese elektron jinou energii: čím dál od jádra, tím větší.

Když dodáte atomu energii zvenčí – například tím, že materiál ohřejete –, pohltí tuto dodávku právě tím, že se elektrony přesunou na vyšší energetické hladiny, do takzvaného excitovaného stavu. V něm nedokážou zůstat dlouho. Téměř okamžitě se vrátí na své původní místo a přitom [se nabyté energie zbaví](#) tím, že vyzáří foton.

Foton je elementární částice totožná s kvantem elektromagnetických vln. Světlo, rádiové vlny a všechny ostatní typy elektromagnetického záření se dají chápat podle okolností (viz [KVANTUM](#)) buď jako proud částic, nebo jako vlna – tj. změna postupující elektromagnetickým polem (viz [ULTRAZVUK](#)).

Když nějakou věc hodně zahřejete, často začne svítit: jako plát kamen rozpálený do červena, roztavená ocel nebo vlákno v žárovce. Jindy svítí, ale my to nevidíme, protože vyzařuje v nějaké části spektra – infračervené či ultrafialové –, na kterou náš zrak není citlivý. Jiné svítící věci, třeba světelná dioda („ledka“, viz [TRANZISTOR](#)) vydávají světlo proto, že dostávají energii jiného druhu, ne tepelnou (LED svítí proto, že elektrony excitované průchodem elektrického proudu se rekombinují s „dírami“ a vzniká jev zvaný elektroluminiscence – opět viz [TRANZISTOR](#)).

Světlo z LEDkové svítilny je směsí obrovského množství dílčích příspěvků – jednotlivých fotonů. Elektrony v atomech světelného zdroje získaly energii navíc a teď ji uvolňují. Nezávisle na sobě, v náhodných okamžicích. Tomu se říká spontánní emise elektronů. Vyzařované elektromagnetické vlny – co foton, to vlna – jsou vůči sobě náhodně posunuty v čase, protože započaly v různých okamžicích. Technicky řečeno, nejsou ve fázi (viz [ULTRAZVUK](#)). Jejich energie se navzájem částečně ruší, vrchol jedné vlny se potkává s nulou či minimem jiné. To, co vidíme, je součet všech dílčích příspěvků. Takhle se chovají všechny přirozené světelné zdroje od svíčky po Slunce.

Pokud navíc zdroj světla obsahuje atomy různých prvků, což platí pro svíčku i Slunce, pak se od sebe liší i velikost energie vyzářené při pádu elektronu na nižší hladinu. Tím pádem vznikají vlny s různou frekvencí – čím vyšší energie, tím vyšší frekvence. U viditelného světla se to projeví změnou barvy. Sluneční světlo se skládá z barev duhy, protože obsahuje fotony různých frekvencí.

Přirozené světlo tedy bývá směsí vln s různými frekvencemi a různým fázovým posunutím. Jinými slovy, není koherentní. Existuje však zařízení, kterým se dá koherentní světlo vytvořit. Vlastnosti takového světla jsou pak docela jiné.

Metastabilní kaštaný

Představte si strom kaštan na podzim. Občas z něj padají zralé kaštaný – vždy jeden nebo několik. Můžeme tomu říkat spontánní emise kaštanů.

Ale můžeme taky se stromem pořádně zatřást, třeba vichřicí. Kaštaný spadnou všechny najednou. To je stimulovaná emise, základ funkce laseru (a písmenka SE v jeho názvu, který je zkratkou: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesilování světa stimulovanou emisí záření).

Napřed musíme dostat kaštaný na strom, tedy elektrony do excitovaného stavu. Jako zdroj energie pro laser se často používá světlo, ale může to být i elektrický výboj, chemická reakce a ledacos jiného. Podstatné je, že aktivní prostředí (v našem přirovnání odpovídá stromu) musí být schopno energii v této formě přijmout.

Atomy aktivního prostředí musí disponovat alespoň třemi energetickými hladinami, s nimiž pracujeme. Nejnížší je základní stabilní hladina. Tam elektrony dlí, dokud laser nezapneme. Nejvyšší je excitovaná hladina: tam se elektrony dostanou, když přijmou energii navíc. Jenže se tam neudrží, spontánně spadnou níž. Kouzlo aktivního prostředí – a důvod, proč jím nemůže být jakákoli látka – spočívá v tom, že elektrony nespadnou až úplně dolů na základní hladinu. Zůstanou někde uprostřed, na hladině, které říkáme metastabilní. A je jich tam hodně, víc než na základní hladině. Fyzikové říkají, že došlo k populační inverzi. Laser je připraven na daný pokyn vyzářit všechnu nashromážděnou energii. Neboli shodit kaštaný na zem.

Existují rozmanitá aktivní prostředí. Záleží na tom, k čemu budeme laser používat a jak hluboko můžeme sáhnout do kapsy. Aktivním prostředím může být polovodičový materiál, jako je tomu u laserových ukazovátek; průhledná pevná látka, zpravidla sklo nebo křišťál s vhodnou příměsí, kterou často bývají vzácné zeminy (viz [YTTERBY](#)); plyn, obvykle některý z vzácných plynů, ale také oxid uhličitý; existují i kapalinové lasery, využívající roztoky organických barviv, kde se změnou koncentrace dají snadno měnit vlastnosti paprsku.

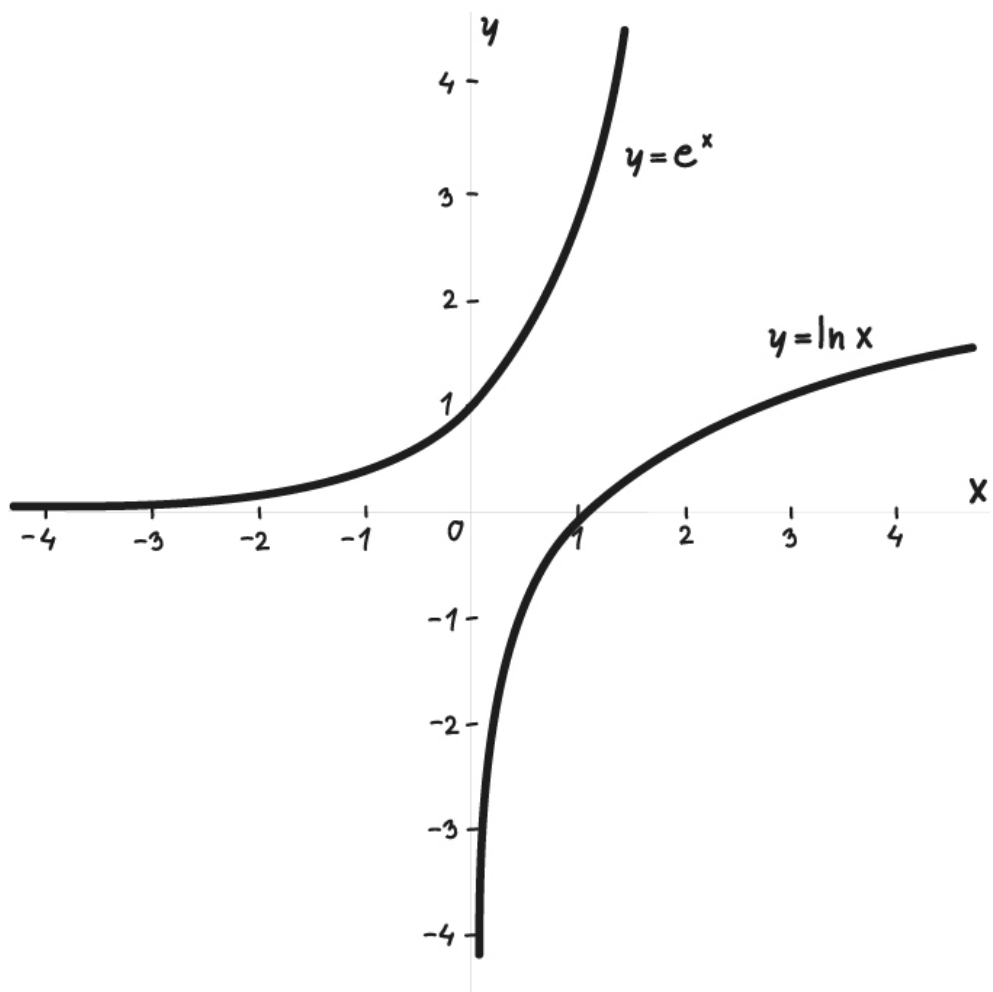
Třetí podstatnou složkou každého laseru – vedle zdroje energie a aktivního prostředí – je rezonátor. Obvykle má podobu duté komory, kde se paprsek generovaný v aktivním prostředí odrazí sem a tam od zrcadel umístěných naproti sobě. Jedno z nich je polopropustné a odtamtud vychází laserový paprsek ven, ke svému cíli.

Existuje obrovské množství typů laserů odlišených podle použití. Na jedné straně máme laserová ukazovátká, na druhé straně se dá laserem řezat kov a svářet. V medicíně se laser používá v vypalování bradavic i k jemným očním operacím, v digitální technice ke skenování čárových kódů a přehrávání optických disků. Existují „laserové radary“ – lidary –, které umožňují přesně a rychle mapovat okolí čidla, což se používá například u samořídících aut. Ve spojení s optickými vlákny se laser používá v telekomunikacích. O vojenských aplikacích se mnoho nemluví –

a ne, paprsky smrti zatím neexistují, ale jistě se na nich tvrdě pracuje. Obrovské využití má laser ve vědě a výzkumu (viz [FÚZE](#)).

Logaritmus

Jak převést násobení na sčítání.



Jak se dělaly numerické výpočty, než se objevily kalkulačky? Pracně. Násobit na papíře jistě dovedete, dělit nejspíš taky, odmocňovat už asi ne (jde to!). U velkých čísel, řekněme desetimístných, je však i násobení nepříjemně zdlouhavé a snadno se udělá chyba. Poptávka po usnadnění výpočtů byla vždy velká.

Průlomem v této oblasti dosáhl John Napier roku 1614. Podle toho, co se o něm dá dočíst, to byl dost svérázný pán – dnes by z něj asi byl typický facebookový troll. Skotský nižší šlechtic, bohatý vlastník pozemků, vášnivý účastník politických sporů i tahanic se sousedy. Žádné matematické vzdělání neměl, byl ale zvědavý, chytrý a prakticky založený. Jeho zásadním vkladem do dějin matematiky – a vlastně i výpočetní techniky – byla pomůcka ve formě tištěných tabulek, která umožnila převést násobení na sčítání a dělení na odčítání. Poté co vymyslel princip, řadu let sám tabulky sestavoval, počítal jejich hodnoty. Ten první čin byl geniální, ten druhý už jen úmorný, bez druhého by však první nebyl k ničemu.

Základní úvaha je jednoduchá (dneska). Spočívá v tom, že násobit mocniny o stejném základu je jednoduché, stačí sečíst exponenty. Například

$$2^2 \times 2^5 = 2^{2+5} = 2^7 = 128.$$

Kdybychom si tedy sestavili podrobnou tabulku mocnin nějakého vhodného základu, dala by se použít k násobení.

Původní Napierův systém vysvětlovat nebudu, protože se od moderních logaritmů v detailech lišil, podíváme se až na úpravu, kterou provedl Napierův současník a profesionální matematik Henry Briggs. Napierův nápad ho nadchl, vylepšil ho a přivedl v podstatě do dnešní školní podoby.

Briggsovy (též dekadické) logaritmy používají jako základ číslo 10 a značí se \log . Platí pro ně, že $y = 10^{\log y}$. Když pak chcete vynásobit čísla $y \times z$, můžete tento součin zapsat jako

$$10^{\log y} \times 10^{\log z} = 10^{\log y + \log z}.$$

To znamená, že

$$\log (y \times z) = \log y + \log z$$

neboli logaritmus součinu se rovná součtu logaritmů. (A také platí, že $\log (y/z) = \log y - \log z$.) Obtížný součin velkých čísel tedy můžeme řešit pomocí tabulek, v nichž je ke každému číslu uveden jeho logaritmus. Logaritmy jsou definovány jen pro kladná čísla, to ale nijak nevádí, protože u násobení nebo dělení si znaménko v případě potřeby snadno doplníme.

Jak spočítáme pomocí logaritmů $113,45 \times 548,75$? Nejprve najdeme v tabulkách logaritmy obou čísel. Zjistíme, že

$$\begin{aligned} \log 113,45 &= 2,0548, \\ \log 548,75 &= 2,7394. \end{aligned}$$

Logaritmy sečteme a dostaneme 4,7942. V tabulkách zjistíme, že tomuto logaritmu odpovídá číslo 62 260. (Přesný výsledek je 62 255,6875.)

Vypadá to strašlivě pracně a archaicky. Ale až ze světa zmizí elektřina, jak to jednou sugestivně popsal Ondřej Neff, pak pevně doufám, že se v nějakém sklepě najde otrhaný výtisk logaritmických tabulek. (Přeháním. Zatím by to nebyl problém, středoškoláci stále ještě mají tabulky ve své sadě učebnic a učí se s nimi pracovat, nadávajíce na zkostnatělé osnovy. Až nám něco či někdo vypne proud navěky, hledejte nejbližší gymnázium.)

Tabulky se také dají nahradit mechanickou pomůckou, což věděl a zkoušel už Napier. První logaritmická pravítka se vyráběla už v půlce 17. století (spolu s jinými přístroji na stejném principu) a používala se jako příruční výpočetní pomůcka přes tři sta let – až kolem roku 1975 přišly dostatečně levné a malé kapesní kalkulačky.

Exponenciála naruby

Ne sice všechny, ale slušné množství matematických funkcí (viz [DERIVACE](#)) má tzv. inverzní funkci. Tu dostaneme, když vyměníme ve funkčním předpisu písmenka. Například k parabole $y = x^2$ dostaneme záměnou proměnných $x = y^2$, a když tuhle rovnici vyřešíme, abychom osamostatnili y , vyjde z toho $y = \sqrt{x}$. Na tomto příkladu je hned také vidět, v čem může být háček (a čemu bychom museli věnovat dlouhý výklad, kdyby tohle byl opravdový kurs matematiky): inverzní funkci má jen pravá polovina paraboly. Levá ne, protože tam je x záporné a inverzí by vznikla odmocnina ze záporného čísla a... a to jsme se ještě neučili (viz [KOMPLEXNÍ ČÍSLO](#)).

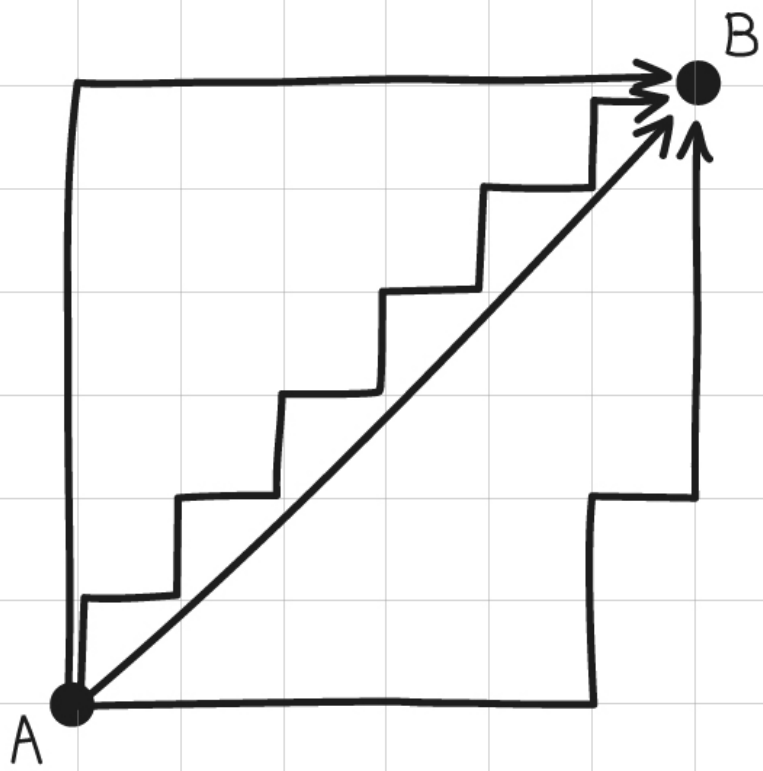
Logaritmus, o kterém tady už nějakou dobu mluvíme, je inverzní funkcí k exponenciále o stejném základu. Když totiž k rovnici $y = \log x$ napíšeme inverzi $x = \log y$ a řešíme ji pro y , můžeme provést úpravu $10^x = 10^{\log y}$, ovšem $10^{\log y}$ je totéž co y , takže inverzní funkce k dekadickému logaritmu je $y = 10^x$.

Úplně stejně se dá zavést (viz [ÚROK](#)) k exponenciále e^x „její“ logaritmus, tj. logaritmus o základu e – a dává to velice dobrý smysl, když uvážíme, jak často se e ve vyšší matematice vyskytuje a jaké výhodné vlastnosti má e^x (opět viz [ÚROK](#)).

Logaritmu o základu e se říká přirozený logaritmus a používá se pro něj většinou označení \ln (logarithmus naturalis – Napier psal latinsky, slovo „logarithmus“ vynalezl on, naproti tomu Briggs psal hlavně anglicky a pro svůj dekadický logaritmus používal výraz „common logarithm“). Matematici ovšem občas píšou „log“ i tam, kde mají na mysli přirozený logaritmus – anebo když chtějí dát najevo, že na základu logaritmu nezáleží.

Metrika

Nejkratší spojnici dvou bodů je přímka –
s výjimkou situací, kdy tomu tak není.



Při letu z Prahy do New Yorku pod sebou uvidíte mimo jiné Irsko, Newfoundland a východní pobřeží Kanady. Stačí vzít glóbus a napnout nit mezi dva zapíchnuté špendlíky. Nejkratší cestou na povrch koule není přímka, ale tzv. hlavní kružnice – taková, jejímž středem je střed koule. Na běžných mapách vypadá jako oblouk, ne jako přímka, proto se nelétá „podle pravítka“. (Letecké trasy se ve skutečnosti drží koridorů a nemusí se přesně shodovat s hlavními kružnicemi, ale to je zas jiná věc.)

Zůstaňme u dopravy. Z pražského Můstku se na Černý Most dostanete za dvacet minut, na mnohem bližší vrch Vítkov, kam musíte jít aspoň kousek pěšky, za pětadvacet. Rozumnou metrikou ve velkoměstě je čas, nikoli geografická vzdálenost. V New Yorku s jeho pravouhloú sítí ulic neměří úhlopříčka čtverce 1,41 bloku (podle Eukleida), ale dva bloky (podle taxikáře). Tohle měření má dokonce zaužívaný matematický název: manhattanská metrika. Používá se například v bioinformatice – dobře se hodí pro některé aspekty analýzy DNA. Tento motiv je důležitý: věci se dají měřit různými způsoby, zdaleka nejen „přirozenými“, volba je vždy na nás.

V třírozměrném prostoru, v němž se cítíme být doma, se dá vzdálenost jakýchkoli dvou bodů spočítat podle Pýthagorovy věty (vzpomeňte si na vzoreček pro úhlopříčku kváдру) a nezáleží pak na tom, kam umístíme počátek souřadné soustavy – nulu, od které měříme. To odpovídá naší názorné představě světa. A také všem fyzikálním modelům až do roku 1905. Tehdy předložil Einstein speciální teorii relativity a ukázal, že reálný fyzikální prostor je jiný, že má naprosto odlišné vlastnosti, které ovšem v každodenním životě nevidíme. Projeví se až při rychlostech blízkých rychlosti světla, pak ovšem zcela zásadně.

Elegantní matematické vyjádření Einsteinova geniálního objevu (viz [RELATIVITA](#)) formuloval o tři roky později Hermann Minkowski. Ke třem prostorovým rozměrům přidal čtvrtou osu, na níž se vynáší čas (kvůli konzistenci jednotek vynásobený rychlostí). To je prostoročas, dosud nejlepší a stále používaný matematický model fyzikálního světa. Einstein jej později prohloubil, když do něj zabudoval gravitaci a od speciální teorie relativity pokročil k tzv. obecné.

Prostoročas

Minkowski nebyl fyzik, ale čistý matematik. K obecné teorii relativity přispěl tím, že – obrazně řečeno – připravil a napnul prázdné plátno, na které pak Einstein namaloval svůj obraz. Oním plátnem je takzvaný prostoročas.

Prostor, ve kterém žijeme a o němž běžně uvažujeme, je třírozměrný. Každý bod v něm je jednoznačně určen třemi prostorovými souřadnicemi, hodnotami na třech vzájemně kolmých osách. Minkowski přidal čtvrtou osu kolmou na všechny tři stávající, časovou osu.

Představit si čtyři vzájemně kolmé přímky není možné, takže se tím příliš netrapte. (Jste-li jednou ze vzácných výjimek – prý existují –, ozvěte se!) Důležité je, že jako abstraktní matematická konstrukce to dává dobrý smysl. Když si chtějí fyzici něco znázornit na tzv. Minkowského diagramech, nakreslí si prostě dvě na sebe kolmé osy – jednu prostorovou a jednu časovou. Zbylé dvě prostorové osy vynechají, s jejich názornou představou se netrápí. Ve výpočtech je ovšem zanedbat nemohou.

Minkowského prostoročas není nezvyklý jen tím, že má čtyři rozměry.

Když se nacházím v Praze na Staroměstském náměstí, mám to do Brna vzdušnou čarou kolem 200 km – stejně jako do Šumperka, do Lince, do Lipska či do polské Legnice. Všechna místa vzdálená ode mne 200 km leží na obvodu kružnice s tímto poloměrem. A kdybych přidal třetí rozměr, přibudou také místa nad zemí a pod zemí. Dohromady pak budou tvořit povrch koule, opět s poloměrem 200 km. To je způsob, jak v našem běžném prostoru uvažujeme o vzdálenostech. Takovému prostoru se říká eukleidovský. Mimo jiné se vyznačuje tím, že součet úhlů jakéhokoli trojúhelníku v něm činí 180 stupňů, a také tím, že v něm platí Pythagorova věta.

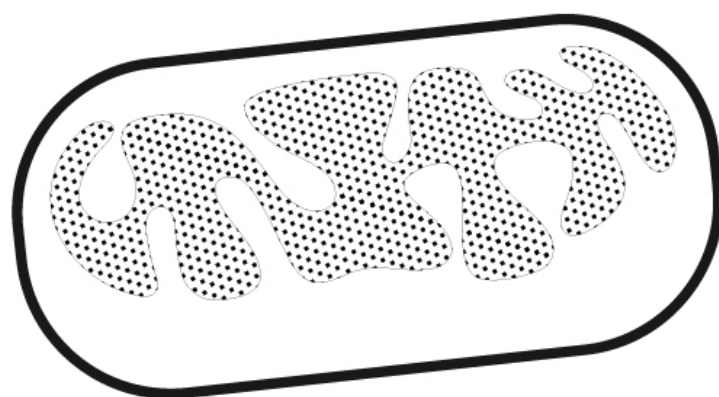
Minkowski ale zjistil, že eukleidovské počítání se nehodí, má-li se prostoročas hodit fyzikům, tedy sloužit dobře k popisu a modelování reality. Víme totiž, že některé věci nejsou v našem světě možné. Následek nesmí časově předcházet příčině, časem se nelze pohybovat nazpátek. Když Minkowski tuto podmínku zavedl, vyšel mu neeukleidovský prostor. Body, které mají od výchozího místa stejnou prostoročasovou vzdálenost, pak neleží na kružnici, ale na hyperbole.

Proto se Minkowského prostoročas nesmí zaměňovat s „normálním“ čtyřrozměrným prostorem. Oba mají čtyři na sebe kolmé (nepředstavitelné) osy, ale tím jejich vzájemná podobnost končí. Vzdálenost dvou bodů v Minkowského prostoročase se nepočítá podle Pythagorovy věty, ale pomocí její modifikace. Při použití Pythagorovy věty ve třech rozměrech sečteme druhé mocniny prostorových souřadnic a spočteme z nich odmocninu. V Minkowského prostoročase musíme přitad časovou souřadnici, její druhou mocninu však ve výrazu pod odmocninou odečítáme. Ukazuje se, že takový matematický model dobře odpovídá tomu, jak doopravdy funguje vesmír.

Čím důmyslnější pravítko zvolíš, tím užitečnější věci naměříš.

Mitochondrie

Zpracování energie v živé buňce mají na starosti bývalé bakterie, které si našly novou práci.



Než budete číst dál, zadržte dech. Máte to? A teď, se zadržným dechem, zkuste odpovědět na otázku, proč vlastně dýcháme. Ze školy si asi vzpomenete: krev se okysličuje v plicích. Kyslík se váže na hemoglobin, červené krevní barvivo. Obíhající krev pak zásobuje kyslíkem celé tělo. Když se krev do plic vrací, je o kyslík ochuzená, a proto má jinou barvu. Klíčovou složkou hemoglobinu je železo, protože umí kyslík jak snadno navázat, tak snadno pustit.

Všechno to je pravda, ale hlavní otázka zůstává: k čemu tělo ten kyslík potřebuje? Dokonce tak naléhavě, že pokud stále ještě zadržujete dech, už se teď cítíte trochu nepříjemně a bude to pořád horší?

Pardon, už se můžete nadechnout.

Kdekoli něco hoří, jde o oxidaci – reakci paliva s okysličovadlem. Funguje tak motor auta, v němž se slučují uhlovodíky obsažené v benzínu či naftě s kyslíkem ze vzduchu (a vedle energie vzniká vodní pára, oxid uhličitý a bohužel také malé množství jiných látek, což je způsobeno nedokonalým spalováním). Funguje tak kosmická raketa, která si musí okysličovadlo vést s sebou a nebývá jím vždy kyslík, často se používá například jako palivo hydrazin a jako okysličovadlo oxid dusičitý.

A funguje tak většina živých věcí na planetě. Palivem živočichů je glukóza získaná chemickým rozkladem potravy. Naším okysličovadlem je kyslík. Cirkulující krev neustále dodává tyto dvě složky všem buňkám. Každá z nich si sama „spaluje“ kyslíkem glukózu v nesmírně složitém chemickém kolotoči a uvolňuje přitom energii. Tento proces se nesmí ani na chvíli zastavit, protože bez neustálého přísunu energie se neobejdeme. Všechno živé funguje velmi daleko od termodynamické rovnováhy a v tomto nestabilním stavu se dá udržet jedině neustálým přísunem energie. Když ten ustane, rychle a navždy se do té rovnováhy dostaneme. Proto má tělo mechanismy, které vás velmi důrazně upozorní, že zadržujete dech už příliš dlouho.

K tomu to celé je – plíce, srdce, krevní oběh, tyhle klíčové systémy našeho těla. K tomu, aby neustále dopravovaly na všechna potřebná místa palivo a okysličovadlo. K tomu, aby se přísun energie pohánějící naše biochemické děje nepřerušil. K tomu, abychom pomalu, kontrolovaně hořeli.

My všichni, kdo nejsme bakterie

Všechno, co je na Zemi živé – nepočítáme-li viry a priony, a ty nejspíš skutečně mezi živé věci počítat nemusíme – se skládá z buněk. Teorie o vzniku první buňky (viz [ŽIVOT](#)) je tak zároveň teorií o vzniku života vůbec. Živé buňky existují ve dvou zásadně odlišných provedeních: prokaryotické a eukaryotické.

Nejsou to zrovna šťastné názvy, a nejen proto, že hrozí zlomením jazyka. Nevyjadřují dost jasně propastný rozdíl mezi nimi. Oba termíny,

odvozené z řečtiny, vyjadřují to, že eukaryotická buňka má jádro, prokaryotická ne tak docela. To je pravda, ale není to hlavní.

Podstatné je, že prokaryotické buňky jsou malé a primitivní, eukaryotické velké a složité. Mezi prokaryotické organismy patří bakterie a vedle nich další, zcela odlišné jednobuněčné organismy zvané archea. Mezi eukaryotické organismy patří zbytek života od prvoků (to jsou jednobuněčné organismy tvořené eukaryotickou buňkou) po houby, rostliny a živočichy včetně člověka.

Bakteriální buňka je něco jako život zjednodušený na svou podstatu. Má poměrně pevnou buněčnou stěnu, která ji odděluje od okolí, pod ní je membrána. Vnitřek buňky vyplňuje tekutá cytoplazma, ve které volně plave jednak molekula DNA, jednak ribozomy – chemické komplexy, na nichž se podle pokynů genetického kódu syntetizují bílkoviny.

Bakteriální buňka nemusí a může mít brvy a bičíky, které jí umožňují pohyb. Možná to vypadá docela solidně, ale proti eukaryotické buňce to není vůbec nic. Ta je především mnohem, mnohem větší – buňky se navzájem velikostmi hodně liší, ale typická složitá (říkejme jí tak) buňka je co do objemu 10 000× větší než typická bakterie. Bakterie zpravidla na délku měří jeden nebo několik mikrometrů (mikrometr je tisícinu milimetru), eukaryotické buňky desetkrát až stokrát více, a když z toho spočítáte objem, dostanete onen faktor 10 000. To znamená, že je v nich na rozdíl od bakterií spousta místa. A to je vyplněno mnoha užitečnými věcmi.

Eukaryotická buňka nemá na rozdíl od bakterií pevnou buněčnou stěnu. Kromě povrchové membrány má ještě řadu vnitřních membrán, které od zbytku buněčného obsahu oddělují jádro obsahující chromozomy (viz [CRISPR](#)) a řadu dalších specializovaných organel, tedy součástí plnicích tu či onu biochemickou funkci. U zelených rostlin k nim patří chloroplasty, kde probíhá fotosyntéza.

A buňky všech eukaryotických organismů (s výjimkou jednoho [výstředního prvoka](#)) obsahují mitochondrie – částičky, v nichž probíhá buněčné dýchání.

Sedm kilo mitochondrií

Lidské tělo obsahuje (podle současných odhadů, které se poslední dobou dost změnilo) asi 40 bilionů buněk (viz [BILION](#)) a zhruba stejný počet bakterií, jež v nás žijí. Protože jsou bakterie mnohem menší, neznamenají mnoho na váhu: vážíte-li 70 kg, představují vaše bakterie jen asi půl kila.

S mitochondriemi je to jiné. V průměrné buňce jsou jich stovky, někdy tisíce – záleží na tom, kolik energie ta která buňka potřebuje. Nejvíce jich bývá ve vajíčku (statisíce), nejméně v kožních buňkách a červených krvinkách (žádné). Celkový počet našich mitochondrií je každopádně

mnohem větší než počet našich buněk – o dva až tři desítkové řády. A udává se, že tvoří asi desetinu hmotnosti našeho těla.

Detailní chemický mechanismus buněčného dýchání pochopili vědci až poměrně nedávno, v druhé polovině dvacátého století, přestože základní schéma – kyslík plus cukr rovná se energie plus oxid uhličitý plus voda – bylo jasné. Proces obsahuje mnoho meziproductů a dílčích mechanismů, kritickou roli v něm hrají vnitřní buněčné membrány oddělující místa s odlišným elektrickým potenciálem (jako dielektrikum v kondenzátoru) a jeho postupné odkrytí bylo vyváženo několika Nobelovými cenami.

Zásadní rozdíl mezi spalovacím motorem a buňkou spočívá v tom, že motor spotřebovává energii okamžitě a na tom místě, kde vzniká (ve válci, kde pohybuje pístem). Buňka potřebuje vyrobenou energii nejprve přemístit z mitochondrie někam jinam a až pak spotřebovat. energii proto dočasně ukládá do molekuly zvané adenosintrifosfát neboli ATP.

Název naznačuje její strukturu: má tři tzv. fosfátové skupiny. Odštěpením jedné z nich vznikne ADP (adenosindifosfát) a uvolní se energie – na tom místě, kam mezitím molekula ATP doputovala, kam energii odvezla. Reakce je vratná, takže mitochondrie vyrábějí z ADP zase ATP, jako kdyby nabíjely miniaturní baterie. Dělat to rychle, za 24 hodin proběhne cyklus nabití a dobití (u člověka) 500–700×. Jinými slovy, za den spotřebujeme asi tolik ATP, kolik sami vážíme.

Tajemství původu

Všechny eukaryotické organismy tedy potřebují nesmírně složitou biochemii, aby mohly fungovat. A ta se musela vyvinout dřív než eukaryotická buňka – aspoň v nějaké primitivnější podobě –, aby složitý život mohl vzniknout. Jak se to stalo? Vznik eukaryotické buňky pokládají biologové za větší vývojový skok, a tím pádem také větší záhadu, než samotný vznik života. Obecně je však přijímaná přibližná představa, se kterou přišla v šedesátých letech [Lynn Margulisová](#) (a málem ji za to tehdy vyobcovali ze slušné vědecké společnosti): předchůdce dnešní eukaryotické buňky vznikl, když jedna bakterie polkla jinou, a ta přesto zůstala naživu, čímž vznikl symbiotický vztah.

Tato představa byla nejprve vášnivě odmítána, pak přijata, pak korigována. Analýzou DNA se mezitím přišlo na to, že některé dnešní bakterie vlastně vůbec nejsou bakterie, ale organismy značně odlišné jak od bakterií, tak od eukaryot. Dostaly označení archea. Patří k nim například metanogeny, organismy žijící v prostředí chudém na kyslík a produkující z vodíku a oxidu uhličitého metan (vděčíme jim za své zásoby zemního plynu). Nejspíš to bylo právě spojení nějakého organismu ze skupiny archeí s nějakou bakterií, co dalo vznik složitějšímu životu – navzájem se tak poskládaly odlišné biochemické dovednosti.

Lynn Margulisová jako první vyslovila teorii, že mitochondrie jsou vlastně bakterie polapené v eukaryotické buňce, které se tomuto způsobu

života přizpůsobily. Tento názor se dnes pokládá za prokázaný. Mitochondrie se uvnitř buňky samostatně množí, mají dokonce svou vlastní DNA, byť v malém množství. Nelze je pěstovat v kultuře mimo mateřskou buňku, protože většinu své genetické informace postupně odevzdaly jádru a to, co jim zbylo, nestačí k samostatnému životu. Mitochondriální DNA je však dobře přístupná a dá se používat k testům totožnosti. Dědí se zásadně po mateřské linii – vajíčkem, nikoli spermií. S tím souvisí poměrně známý pojem „mitochondriální Eva“, analýzou mitochondriální DNA žijících osob lze totiž dost přesně zjistit, kdy asi žila žena, která je společnou prapra... babičkou nás všech: bylo to v Africe před asi 170 000 lety.

Nekonečno

Matematika není věda o číslech, ale
o strukturách.



Některá nekonečna jsou větší než jiná. A některá jsou zas přesně stejně velká, ač je to k neuvěření: například krychle obsahuje přesně stejné množství bodů jako úsečka tvořící její hranu. Přišel na to koncem devatenáctého století německý matematik Georg Cantor. Za své objevy zaplatil valnou částí duševního zdraví. Kráčet v jeho stopách je napínavé i dnes.

Názornou představu nekonečna máme všichni. Jenže špatnou. Intuitivně si myslíme, že nekonečno je prostě hrozně, ale opravdu hrozně moc. („Vesmír je velký. Fakticky velký. To byste nevěřili, jak je hrozně obrovitánsky velký, že z toho zůstává rozum stát. Myslíte si třeba, že drogerie ve vaší ulici je daleko, ale proti vesmíru je to úplný houby...“ napsal Douglas Adams ve Stopařově průvodci po Galaxii.)

To ale není pravda. Nekonečno není nepředstavitelně velké číslo. Nekonečno dokonce vůbec není číslo, ale něco úplně jiného – něco, nač naše představivost nestačí úplně stejně jako na černou díru nebo elektron. Existují triky, jak z něj „něco jako číslo“ pro některé účely udělat (viz hesla [DERIVACE](#), [INTEGRAL](#) a [ŘADA](#)), ale jsou velice zrádné.

Kolik je sudých čísel?

Nejjednodušší je nekonečno přirozených čísel. Přirozenými nazývají matematici čísla 1, 2, 3, ... a ty tři tečky naznačují, že můžete jít libovolně daleko. Děti na to přijdou při jednoduché hře: jaké znáš největší číslo? Ať odpovíte cokoli, soupeř vás vždycky může trumfnout, prostě řekne „tvoje číslo plus jedna“. Nebo tvoje číslo plus dvě, plus milion, plus cokoli. Každé přirozené číslo má svého následníka většího o jedničku. Jdeme pořád dál a cesta nikde nekončí. To si člověk docela dokáže představit, že?

Omyl, nedokáže. Hned vám to předvedu. Kolik čísel je sudých? Samozřejmě každé druhé, tedy polovina z počtu všech přirozených. Od jedničky do desítky máme deset čísel, sudých je z toho pět. Od jedničky do bambilionu je bambilion čísel (ať už bambilion znamená cokoli), sudých je přesně půl bambilionu. Od jedničky do nekonečna... A jsme u toho.

Napište si na papír řadu přirozených čísel: 1, 2, 3 a tak dále. Pod ně si teď napište jejich dvojnásobky: 2, 4, 6 a tak dále. Můžete v obou řadách podle stejného pravidla pokračovat donekonečna? Ano. Budou mít stejný počet členů? Ano. Sudých čísel je tedy stejný počet jako přirozených! Žádná polovina.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20

Matematici o tomhle paradoxu věděli od starověku, vyřešili ho vyhýbavě, ale vlastně správně: rozhodli se, že nekonečno je pojem, kterému lidé zatím dobře nerozumějí, a bude tudíž lépe vyhnout se mu ve vědeckých úvahách, než bude jasnější. Občas někdo zazlobil, třeba Zénón z Eleje, který demagogickým použitím nekonečna „dokázal“, že Achilles nikdy nedohoní želvu (viz [ŘADA](#)). Ale celkem se tohoto konsenzu všichni drželi.

Nekonečno je tady všude

Jejich problémy však narůstaly, protože už všechny starověké civilizace znaly i racionální čísla. Racionální čísla jsou to, čemu jsme ve škole říkali zlomky: v čitateli i ve jmenovateli je celé číslo. (Celá čísla jsou přirozená čísla, k nimž přidáme nulu a přirozená čísla se znaménkem minus.) Dvě třetiny, tři pětiny, dvanáct a sedm osmin – to všechno jsou racionální čísla.

Mezi racionální čísla patří také všechna celá čísla, protože je vždy můžeme napsat (kdybychom po tom zatoužili) v podobě $3/1$, $-12/1$ nebo třeba $0/1$. Říká se jim racionální, protože je tvoří ratio neboli poměr: vyjadřují poměr dvou celých čísel, jsou výsledkem operace dělení.

Zase si zahrajeme hru. Které je nejmenší kladné číslo? Řeknete třeba: jedna tisíciná. A já odpovím: jedna tisíciná děleno dvěma (nebo deseti, nebo čímkoli). Vy řeknete: jedna miliontina. A já odpovím zase stejně: děleno dvěma! Dá se to hrát, samo sebou, donekonečna. Žádné nejmenší kladné číslo neexistuje.

Zamyslete se nad důsledky. S číselnou osou jdoucí do nekonečna: milion, dva, tři, miliarda, sto milionů miliard... se dá jakžtakž smířit. To je to nekonečno, které si umíme představit, byť mylně, jak už o tom byla řeč.

Jenže nekonečno není jen „tam v dálce“, ale také „tady doma“. Mezi nulou a jedničkou je také nekonečně mnoho čísel: kdykoli nějaké řeknete, já ho vydělím dvěma a zas jich bude víc. A nejen mezi nulou a jedničkou: mezi jakýmikoli dvěma racionálními čísly, ať si jsou sebeblíž, je zas nekonečně mnoho racionálních čísel. Jako bychom měli mikroskop, který může zoomovat donekonečna. Na číselné ose nejsou žádné atomy, žádné nejmenší nedělitelné hodnoty. Je nekonečně hustá.

Točí se vám hlava? Měla by, protože tohle už je propast. Ale bude to ještě mnohem horší.

Čím dál tím podivnější

Sčítání, odčítání, násobení, dělení a umocňování pohodlně zvládneme pomocí racionálních čísel (až na známý zákaz dělení nulou). Zdálo by se, že jiná čísla neexistují, že nejsou potřeba.

Jenže existují, jako první na to přišel slavný Pýthagorás (nebo někdo z jeho žáků), když se snažil spočítat délku úhlopříčky jednotkového čtverce neboli odmocninu ze dvou. Když se nad tím problémem pořádně zamysleli, došli k nečekanému a nemilému výsledku: podařilo se jim nezvratně dokázat, že odmocninu ze dvou nelze zapsat jako zlomek.

Neexistují taková dvě celá čísla, jejichž podíl by přesně odpovídal odmocnině ze dvou. Můžeme ji samozřejmě spočítat přibližně (moje kalkulačka říká: 1,4142135624), můžeme si úhlopříčku čtverce změřit, ale nemůžeme odmocninu ze dvou označit za racionální číslo. Je iracionální, podivná, z jiného světa. Nikdo o ni nestál, nikdo ji nechtěl, ale je neodvolatelně tady.

Pýthagorás se ještě mohl utěšovat tím, že jde o nečetné výjimky. Brzy však vyšlo najevo, že to není pravda, že nekonečně mnoho odmocnin – druhých, třetích i vyšších – jsou iracionální čísla. Stejně tak je iracionální číslo π (viz [PÍ](#)).

Když se v desetinném tvaru zapíše racionální číslo, má buď konečný počet míst ($15/8 = 1,875$ přesně; $293/32 = 9,15625$ přesně), anebo periodický rozvoj ($1/3 = 0,33333333\dots$; $22/7 = 3,142857142857\dots$). Když se v desetinném tvaru zapíše iracionální číslo, má nekonečný neperiodický rozvoj: $\pi = 3,1415926535\dots$

Mnoho století po Pýthagorovi se přišlo na to, že jsou dva druhy iracionálních čísel: algebraická a transcendentní. Ta první jsou řešením nějaké algebraické rovnice (matemicky řečeno: kořeny polynomu s racionálními koeficienty), ta druhá ne. Dodnes známe poměrně málo příkladů čísel, na něž můžeme ukázat prstem a říci, že jsou transcendentní: patří k nim právě π , dále základ přirozených logaritmů $e = 2,71828\dots$ (a všechny jeho mocniny), skoro všechny hodnoty funkcí sinus, kosinus, tangens a logaritmus, a pak ještě různé výstřednější konstrukce.

Víme však, že iracionálních čísel (prozatím zůstaneme u toho, že to znamená: algebraických a transcendentních dohromady) je mnohem víc než racionálních.

Mnohem víc? Ale už celých čísel je přece nekonečně mnoho. Racionálních tím spíš. Jak může být něco víc než nekonečné?

Seznamte se: Georg Ferdinand Ludwig Philipp Cantor.

Část stejně velká jako celek

Před chvílí jsem vás přiměl, abyste si představili číselnou osu s racionálními čísly jako nekonečně hustou. Mezi jakákoli dvě čísla na ni dokážeme vložit jiné číslo třeba tím, že spočítáme průměr z těch dvou. Mezi jakákoli dvě racionální čísla dokonce dokážeme vložit ne jedno, ale nekonečně mnoho dalších racionálních čísel. A teď do stejné číselné osy, do nekonečně husté číselné osy, přidáváme jakási iracionální čísla. Kam se tam vejdou?

Před Cantorem to nevěděl nikdo a nikdo se raději ani neptal. Bylo jasné, že tahle část matematiky je hodně vratká a lépe do ní nešťourat. Po Cantorovi to v jistém slova smyslu pořád ještě nevíme – je to stejně jako s tím elektronem nebo černou dírou, názorná představa neexistuje a zřejmě nikdy existovat nebude. Existuje však, a to je mnohem důležitější, konzistentní teorie, pevný základ, na němž lze stavět.

Georg Cantor se narodil v ruském Sankt Petěrburgu roku 1845, většinu života ale prožil v Německu, kam se jeho rodina vrátila, když mu bylo devět let. Byl tak výstřední, jak byste od matematika očekávali, a ještě o dost víc. Spoustu času věnoval zcela nematematickému výzkumu: vehementně se snažil dokázat, že pravým autorem Shakespearova díla je ve skutečnosti Francis Bacon. (To byla jedna z oblíbených teorií spiknutí v devatenáctém století.) Byl hluboce věřící, a když říkám hluboce, myslím to vážně: byl neochvějně přesvědčen, že matematické pravdy mu byly zjeveny Bohem a bylo by tudíž hříšné ustoupit, nebojovat za ně.

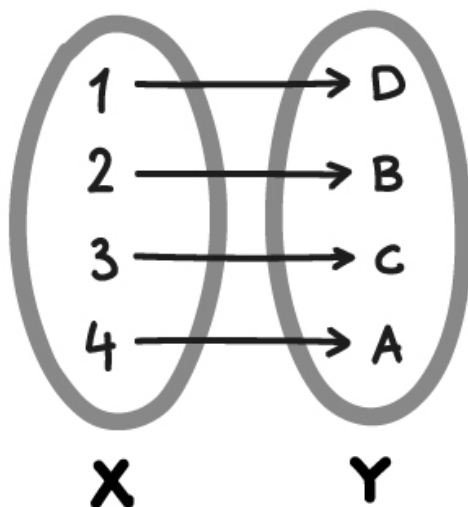
To není příliš dobrá výchozí pozice pro člověka, který má vzhled a zvyky podivína a stojí sám proti vědeckému establishmentu. Cantor byl v mnoha ohledech Martinem Lutherem nové matematiky, velkým kacířem a zároveň velkým reformátorem. Na rozdíl od nezničitelného Luthera na to ale neměl široká ramena a hroší kůži. (Ani žádnou armádu.) A nešlo jen o kritiku okolí. Cantor se sám chvílemi bál toho, co vytvořil. A ano, tušíte správně, zemřel v blázinci. K tomu se ale dostaneme.

Vraťme se na začátek, k jednoduchému schématu, které ukazuje, že sudých čísel je stejně množství jako sudých a lichých dohromady – ač to je proti zdravému rozumu. Cantor se rozhodl, že nebude tenhle paradox vysvětlovat, ale že ho využije jako definici. Nekonečná množina je podle Cantora taková, v níž existuje vzájemně jednoznačné zobrazení mezi celou množinou a její částí. – Tohle je ohromně důležitá věta!

Nebudu vysvětlovat, co to je množina. Každý to zná ze základní školy, a to je dobře, protože formálně správná definice je překvapivě složitá a zamotali bychom se do ní. „Vzájemně jednoznačné zobrazení“ znamená přiřadit každému prvku první množiny právě jeden prvek druhé množiny – a zároveň i naopak. Všechny jsou spárované, žádný nezůstane sám.

Dvě manželské dvojice na výletě představují vzájemně jednoznačné zobrazení mezi množinou přítomných mužů a množinou přítomných žen. Když k nim přidáme třetího muže, přestane být zobrazení vzájemně

jednoznačné, protože jeden prvek zůstává nespárovaný. (A ne, ta vtipná poznámka, která vás napadla, není k věci.)



Vzájemně jednoznačná zobrazení se tedy vyskytují výhradně tam, kde obě propojené množiny mají stejný počet prvků. V našem běžném světě zdravého selského rozumu nemůže existovat vzájemně jednoznačné zobrazení mezi množinou a její částí. Celek je vždycky větší než část.

Vždycky? Vzpomeňme si na názornou ukázkou, že sudých přirozených čísel je stejně množství jako všech přirozených čísel. Přirozená čísla se, jak vidět, zdravým selským rozumem neřídí. A Cantor říká: každá množina, která se chová takto podivně, je nekonečná. A každá, která je nekonečná, se chová takto podivně.

Je to špatně přijatelná úvaha. Člověk by čekal, že mu Cantor tu prapodivnou vlastnost (část stejně velká jako celek) nějak vysvětlí. On ji však místo vysvětlení použije jako definici pojmu. Vypadá to jako trik salonního kouzelníka.

A kdyby zůstalo u té definice, byl by to opravdu jen trik, hra se slovy. Cantor však samozřejmě šel dál. Začal zkoumat, které množiny se dají propojit vzájemně jednoznačným zobrazením s množinou přirozených čísel. Všechny, které se dají, jsou v nějakém smyslu stejně velké jako ona.

Jinými slovy, Cantor začal poměřovat nekonečna. Jsou všechna stejně velká, nebo je některé větší a jiné menší?

Nejmenší nekonečno představují právě přirozená čísla. Jelikož slova „velikost“ nebo „počet prvků“ nejdou s nekonečnem příliš dohromady, zavedli matematici pojem mohutnost. Mohutnost množiny přirozených čísel Cantor pojmenoval symbolem \aleph_0 (čti: alef nula). Množiny o mohutnosti alef nula se nazývají spočetné (jejich prvky lze očíslovat, tj. jednoznačně jim přiřadit přirozená čísla).

Nekonečno pořád ještě není číslo – ale zároveň tak trochu je. S číslem nečíslem \aleph_0 lze provozovat svéráznou aritmetiku, kterou Cantor

zdůvodnil a dokázal. Platí třeba:

$$\aleph_0 + 1 = \aleph_0$$

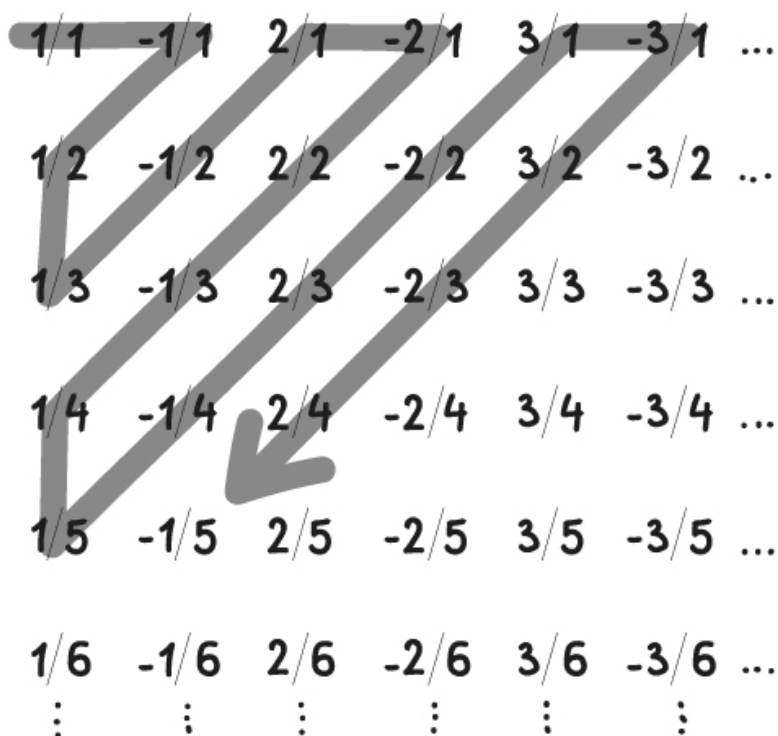
nebo

$$\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$$

a také

$$(\aleph_0)^2 = \aleph_0$$

Přímým důsledkem poslední uvedené rovnice je to, že počet racionálních čísel je také stejný jako počet přirozených. Dá se to ukázat na schématu, kde do prvního řádku napíšeme všechny zlomky s jmenovatelem rovným 1 (řádek bude samosebou nekonečně dlouhý; v čitateli se postupně vystřídají všechna přirozená čísla). V druhém řádku zopakujeme totéž pro jmenovatel 2; a tak dále až do nekonečna. Vznikne čtverec o stranách dlouhých \aleph_0 , obsahuje tudíž $(\aleph_0)^2$ prvků, nu a druhá mocnina nekonečna je zase nekonečno. Pokud byste tomu nevěřili, šipka v obrázku znázorňuje, jak se všechna racionální čísla dají seřadit, tudíž očíslovat, tudíž vzájemně jednoznačně přiřadit k přirozeným číslům. Množina racionálních čísel je spočetná.



V tuto chvíli si začal Cantor lámat hlavu s tím, zda jsou úplně všechna nekonečna stejně velká, protože až dosud to vypadá, že možná ano. Matematická obec si z větší části lámala hlavu s jiným problémem: jak se toho šílence zbavit. [Leopold Kronecker](#), jeho úhlavní akademický nepřítel, dokonce Cantora nařkl, že „kazí mládež“, což je, jak známo, obvinění, které bylo svého času použito proti Sókratovi. Není jasné, zda si to Kronecker

vůbec uvědomil. Asi mu to bylo jedno. Ocitnout se v jednom pytli se Sókratem by zdánlivě mohlo každému jen lichotit, jenže Cantor dobře věděl, že athénskeho filozofa tahle nepřízeň nakonec stála život.

Od roku 1874, kdy s prvním náčrtem své teorie množin vyšel na veřejnost, bojoval Georg Cantor na několika frontách: s nejhlubší podstatou matematiky (a tedy i světa – to ztotožňoval); s nepřízní velké části kolegů; a s postupující duševní chorobou. Po většinu svého tvůrčího života působil v saském městě Halle. Tamní univerzita neměla (a nemá) špatnou pověst, ale Cantor toužil po prestižním místě v Berlíně, které ovšem nikdy nezískal.

Nepřízeň a skepse byly celkem pochopitelné. Po řadě špatných zkušeností dospěla jak matematika, tak filosofie k jasnému rozlišení mezi potenciálním a aktuálním nekonečnem. Potenciální je to, k němuž se můžeme libovolně dlouho přibližovat, ale nikdy ho nedosáhneme, protože nekonečnou cestou přece nejde dojít až na konec. Potenciální nekonečno je to, které jsme použili k sečtení geometrické řady. Stejným způsobem se s nekonečnem pracuje v nesmírně užitečném odvětví matematiky, jemuž se česky říká matematická analýza (anglicky calculus) – to jsou ty známé prostocviky s limitami, derivacemi a integrály, pro většinu technicky zaměřených vysokoškoláků základ a zároveň vrchol jejich matematického vzdělání.

Analýza je extrémně užitečná v inženýrské praxi. V Cantorově době prodělávala bouřlivý teoretický rozvoj, umožněný právě tím, že se podařilo nekonečno zkrotit, zahnat do ohrady. Potenciální nekonečno bylo dobré, hodné, ochočené nekonečno.

Jeho opakem je aktuální nekonečno. Carl Friedrich Gauss, největší z velkých, [řekl roku 1831](#): „Protestuji proti používání nekonečna jako skutečné matematické entity, to se v matematice nikdy nesmí. Nekonečno je pouze způsob mluvy, kdy člověk správně hovoří o limitách, ke kterým se jisté veličiny mohou přiblížit, jakkoli je libo, zatímco jiné mohou růst nade všechny meze.“

Aktuální nekonečno, nekonečno jako číslo, to je zlé, nebezpečné nekonečno. Jeho použitím si zaneseme do uvažování neřešitelné rozpory. Ale právě s tímhle nekonečnem si Cantor začal hrát, a dokonce ho počítá a umocňuje. Ten člověk je blázen!

Co se vám stane, když máte tak jako tak nakřáplou duši; denně si ji dál rozdíráte prací s nejvyššími patry abstrakce, jaká jsou lidskému mozku dostupná; a lidé, jichž si vážíte a na jejichž úsudku jste závislí, vás veřejně ponižují?

Důkaz diagonálou

Otázku, zda existuje větší nekonečno než \aleph_0 , Cantor nakonec zodpověděl kladně. Nejprve se mu podařilo dokázat, že algebraická čísla

(tj. racionální plus některá iracionální) jsou spočetná. (Důkaz se podobá výše uvedenému důkazu o spočetnosti racionálních čísel, jen je trochu techničtější.)

Poté dokázal, že reálných čísel je nespočetně mnoho. Důkaz je velice netradiční, založený na jednoduché úvaze a naprosto odlišný od všeho, nač byla tehdejší matematika zvyklá. Jeho základem je tzv. diagonální argument, Cantorův geniální vynález.

Napřed předpokládejme opak toho, co chceme dokázat – řekněme si tedy, že reálná čísla lze očíslovat. Ne nutně ve vzestupném či sestupném pořadí, prostě jakkoli jednoznačně očíslovat, přiřadit jim přirozená čísla. Dejme tomu, že je takto očíslovaná máme, každé z nich zapsané v nekonečném desetinném rozvoji (víme, že reálné číslo obecně má nekonečný a neperiodický desetinný rozvoj, ty výjimky, které jsou jednodušší, tedy přirozená nebo racionální čísla, vždycky můžeme doplnit koncovými nulami). Dostaneme schéma, které může vypadat nějak takhle:

- 1 ■ 0,237844542...
- 2 ■ 0,888878888...
- 3 ■ 0,000000100...
- 4 ■ 0,000001000...

a tak dále, počet řádků je roven počtu přirozených čísel neboli \aleph_0 , na metodě, kterou jsme k přiřazení použili, vůbec nezáleží. Nezapomeňte hlavně, že zatím předpokládáme, že v tomto seznamu jsou všechna reálná čísla!

A co udělá Cantor teď: začne vytvářet nové reálné číslo podle jednoduchého pravidla. Na prvním desetinném místě v něm bude jiná číslice než v prvním čísle našeho seznamu – cokoli, jen ne dvojka: 0,3...

Na druhé desetinné místo dáme cokoli, co se liší od číslice na téže pozici v druhém čísle seznamu, tedy ne osmičku: 0,39...

A tak dále: 0,3911...

Tímto postupem dostaneme číslo, které se zaručeně bude lišit alespoň v jedné číslici od kteréhokoli čísla v seznamu. Seznam tudíž není úplný. Reálná čísla nelze očíslovat, nejsou spočetná. Mohutnost množiny reálných čísel je větší než alef nula.

(Chybí vám v té úvaze reálná čísla větší nebo rovná jedné? Nemusí. Dá se snadno ukázat, že počet reálných čísel mezi nulou a jedničkou – nebo v libovolném jiném sebemenším intervalu – musí být stejný jako jejich počet na celé číselné ose.)

Víme, že reálná čísla se skládají z algebraických a transcendentních. Víme, že množina algebraických čísel je spočetná, za nespočetnost celku tedy nesou výlučnou odpovědnost transcendentní čísla. Tohle Cantor dokázal, aniž však poskytne návod, jak jedno jediné takové transcendentní číslo sestavit. Což, kromě výše vyjmenovaných speciálních případů, neumíme dodnes.

Co může být ještě dál, ještě za tímto obzorem? Nic moc. Už jen stále častější pobyty v psychiatrické léčebně v Halle, první světová válka a na jejím konci smrt – v chudobě a v blázinci.

Na začátku cesty

Ještě za Cantorova života se jeho teorie množin chopila vlivná a stále rostoucí skupina mladších matematiků – Hilbert, Hurwitz, Frege. Rozvíjeli ji, doplňovali a nakonec v ní odhalili chyby, které bylo třeba opravit. Dnešní axiomatická, tzv. Zermel-Fraenkelova teorie množin má s Cantorovým pojetím mnoho společného (například všechny pojmy uvedené v tomto popularizačním článku). Není známo, zda ho někdo z nich třeba chodil do toho blázince v Halle navštěvovat. Možná si ani neuvědomovali, že jejich guru je ještě naživu...

Otázkou, kterou Cantor za svého života nevyřešil, ač o to velmi usiloval, byla tzv. hypotéza kontinua. Jak jsme si ukázali, existuje mohutnost množiny přirozených čísel \aleph_0 a pak „větší nekonečno“, mohutnost množiny reálných čísel neboli kontinua (termín „kontinuum“ dobře vystihuje nespočetně nekonečnou hustotu číselné osy). Je něco mezi tím? Americký matematik Paul Cohen v šedesátých letech dokázal, že odpověď může být kladná i záporná v závislosti na dodatečně zvolených parametrech použité teorie množin.

S Cantorem skončilo období naivních představ o nekonečnu. Matematici poprvé pohlédli do jeho tváře a spatřili fantasticky bohatou strukturu. Jejich věda tyto objevy od té doby stále zpracovává.

Nula

Dlouho trvalo, než se stala rovnoprávným číslem. K její diskriminaci byly dobré důvody.

$$0! = 1$$

Idea čísla označujícího „nic“ vznikla nadvakrát: poprvé jako takzvaná poziční nula, díky níž můžeme rozlišit mezi 31, 301 a 310. A podruhé jako skutečná nula, kterou lze přičítat, odečítat, násobit. Dělit ji umíme také, dělit jí nikoli. Dnes nám obě tato užití splynula v jedno tak dokonale, že mezi nimi nevidíme rozdíl. To však je poměrně nová myšlenka. A ne tak přirozená, jak by se zdálo.

Nikde jinde než na příkladu nuly není tak jasně vidět rozdíl mezi číslicí jako znakem a číslem jako objektem. Podezíravost našich předků vůči přijetí nuly mezi čísla byla dána její odlišností. Jedna, dvě či patnáct ovcí je nejen kvantitativně, ale i kvalitativně něco jiného než žádná ovce. Nikdo neřekne – ani dnes, ani před několika tisíci lety – „mám nula ovcí“.

Nic je něco dočista jiného než jakýkoli konkrétní počet. A „nic“, prázdnota, absence, se obtížně definuje, vede na tenký filozofický led.

Nicméně rozlišit 31 ovcí od 301 bylo zapotřebí vždy. Znaménko pro poziční nulu používali Babylóňané i Egypťané. Je doloženo nejpozději ve druhém tisíciletí před naším letopočtem. Nikdy však nebylo pokládáno za číslo, jen za pomocnou značku. Nulu, dokonce i poziční, odmítla antika – pomocí římských číslic ji nezapišete, 31 je XXXI, 301 pak CCCL. (Zkuste si je v tom zápisu sečíst. Na dělení se radši ani neptám, i to však Římané uměli.) Když Ptolemaios sestavoval první [trigonometrické tabulky](#), v dějinách, nule se už vyhnout nedokázal a nesystémově ji zařadil.

Plnohodnotné číslo udělali z nuly Indové. V sanskrtském textu z přelomu 5. a 6. století je už nula součástí číselné osy na svém dnešním místě, tedy mezi zápornými a kladnými čísly. Přes arabskou kulturu se nula dostala do Evropy, koncem 12. století se začala používat v účetnictví italských obchodníků a pak postupně ve složitější matematice.

Nula působí zmatky v řadových číslovkách: první, druhý, třetí... dobře. Ale nultý? Když vám někdo poradí, ať vystoupíte na třetí zastávce, není od věci ujistit se, zda počítá i tu, na které právě stojíte, anebo ne – zda ji pokládá na nultou (většina lidí), nebo za první (taky se najdou).

Z podobných důvodů se vedou spory, zda dvacáté století skončilo posledním dnem roku 1999 (kdy jsme to všichni slavili, protože se jednička změnila na dvojku), anebo posledním dnem roku 2000 (což je matematicky správně.) Problém je způsoben tím, že v našem kalendáři chybí rok nula. Římští tvůrci juliánského kalendáře nulu neuznávali, tudíž ji nezařadili. Autoři gregoriánské reformy (roku 1582), tedy tvůrci toho kalendáře, který používáme dnes, ji znali a používali, potřebnou změnu však stejně neprovedli.

Kolik je nula na nultou

Jako podezřelá a anomální se nula v matematice jevila ještě dlouho. Některé početní operace se kvůli ní musely dodefinovat, což se ukázalo jako velmi užitečné. Sem patří například nula jako exponent (cokoli

umocněno na nultou je jedna) a [nula faktoriál](#), který je rovněž roven jedné. Některé se musely prohlásit za nemožné, především dobře známé dělení nulou. Existence zakázané operace není příjemná; vyčnívá ven. Uspokojivě se to vyřešilo až v 19. století díky pokrokům v teorii množin a komplexní analýze.

Mimochodem: je nula kladná, nebo záporná? Ani jedno z toho. Je sudá, nebo lichá? Sudá. (Vážně! Dá se dělit dvojkou beze zbytku.) A kolik je nula na nultou? (Přijde na to, koho se zeptáte. Odpovědi „nula“, „jedna“ a „není definováno“ mohou být všechny správné, záleží na kontextu.)

Laici se občas ptají, zda není „něco děleno nulou“ rovno nekonečnu. Nuže, není. Anebo v jistém smyslu je, ale jen na tzv. Riemannově sféře a to nemá nic společného s každodenním použitím. V něm nemůžeme připustit, že $n/0 = \infty$, protože pak by bylo například $1/0 = \infty$ a také $2/0 = \infty$, tím pádem $1 = 2$ a tam veškerá legrace končí. Ostatně, nekonečno (viz [samostatné heslo](#)) vůbec není číslo, ale objekt jiného druhu, samo použití rovnítka je zde chybné. Hry s nulou jsou jen pro pokročilé.

Ňadra

K důležitým úkolům umělé inteligence patří hledat a zakazovat obnažené bradavky.



Když napíšete na Facebook výzvu, že vámi neoblíbená etnická skupina do jednoho krade a má nižší IQ, dost možná vám to projde, zejména když to napíšete česky. Když tam naproti tomu umístíte fotografii polonahé ženy, smažou vám ji téměř určitě – a hodně brzy. I kdyby měla v náručí dítě a vypadala jak Virgo Lactans, tedy Panna Marie kojící, [oblíbené téma křesťanské ikonografie](#).

Leckdo z toho vyvodí, že Facebooku méně vadí rasismus než cudný náznak nahoty. Je to ale jinak: rozpoznat verbální urážky je pro počítač mnohem [těžší než identifikovat obnažené ňadro](#). Zní to při hlouplé, ale když se trochu zamyslíte, dává to smysl.

Ponechme teď stranou otázku, jakkoli nesmírně důležitou, co všechno má Facebook cenzurovat a zda vůbec něco. Odpověď na ni nemůže být objektivní a nezaujatá, nevyhnutelně musí obsahovat pravidla a preference nějaké skupiny lidí – konkrétní kultury, konkrétního národa či zájmové skupiny. Facebook se poslední dobou snaží neurazit nikoho na celém širém světě, tedy zakázat spíš víc než méně.

Uvědomme si rozsah problému. Facebook má (v červenci 2019) [2,54 miliardy uživatelů](#). Každou minutu se na Facebooku objeví půl milionu nových komentářů, 300 000 nových hlášek (statusů) a 136 000 nových fotografií. Jaká část z tohoto obsahu je jinými uživateli nahlášena jako závadná, to se přesně neví, Facebook udává, že jde o desítky milionů hlášení týdně. To mimochodem znamená, že v průměru každý druhý uživatel aspoň jednou ročně něco nebo někoho nahlásí. Ve skutečnosti však mají na hlášení obsahu, jež pokládají za závadný, velký podíl různé aktivistické skupiny a státní orgány.

Konečným cílem Facebooku je rozpoznat závadný obsah (pro stručnost mu tak řekneme, nezapomeňme však, že jde o problematické označení) hned ve chvíli, kdy se ho uživatel snaží zveřejnit. Tak daleko však zatím není a proto reaguje až ex post, z velké části právě na základě podnětů od uživatelů. K jejich vyhodnocení používá kombinaci lidské práce a umělé inteligence.

Jablka a hrušky

Když nevíte o umělé inteligenci (artificial intelligence, AI) vůbec nic, postačí vám dvě základní informace.

Ta první: umělá inteligence nabývá svých schopností tím, že se učí na příkladech. Čím víc příkladů (v hantýrce: trénovacích dat), tím lepší výkony podává.

A ta druhá: skoro všechno, co umělá inteligence dnes dovede, se dá popsat jako měření podobnosti mezi věcmi.

To je všechno. Nic většího, fantastičtějšího a démoničtějšího si nepředstavujte, přinejmenším ne v dnešních praktických nasazeních.

Naopak by vás mělo zaujmout, co všechno lze ovládnout pomocí tohoto jednoduchého schématu.

Ukažte počítačovému programu několik fotografií hrušek a několik fotografií jablek. Na začátku tato AI neví o hruškách ani jablkách vůbec nic. Proto jí u každé fotky musíme výslovně říci: toto je hruška, toto je jablko. Tomu se říká učení s učitelem (anglicky supervised learning). AI tak postupně poznává, co jsou nejspíš charakteristické rysy toho kterého ovoce. Po pár stovkách nebo tisících obrázků začne klasifikovat sama; často dobře, někdy mylně. Mylné případy opravíme. Můžeme cíleně zařazovat stále těžší fotografie; ve špatném osvětlení, černobíle, z komplikovaných úhlů. Když máte dost obrázků (nejlépe tak miliony) a dost trpělivosti (ta se dá nahradit tím, že obrázky jsou nějak označeny předem), vycvičíte AI velmi kvalitně. Až příště uvidí jakoukoli hrušku, spolehlivě ji rozpozná od jablka.

AI ani po sebedokonalejším učení nechápe, co to je hruška a co to je jablko; vnímá je jako formalizovanou sadu znaků, kterou lze vyjádřit matematicky. Neví nic o tom, že je to ovoce, které se jí. Jinými slovy, nezabývá se skutečným obsahem a významem pojmů. Dost často to tak stačí.

Schopnost rozlišovat hrušky a jablka však nijak nepomůže k tomu, aby AI rozlišovala také chodce od aut, bouřkové mraky od neškodných obláček či nevinné žerty od nenávistných a nezákonných slovních výlevů. Když má umět cokoli z toho, musí se to opět naučit od začátku.

Go stroje pochybí od lidí

Hodně lidí si myslí, že umělá inteligence musí nevyhnutelně být přísně logická, bez emocí a předsudků. Není tomu tak. Do jejího fungování se promítají emoce a předsudky, které tam vnesli její lidští autoři. Nejprve musíte umět hrušky od jablek rozpoznat vy sami, abyste mohli učit stroj. U ovoce to není problém. U lživých zpráv a nenávistných projevů to problém je.

Stejně tak to může být problém u nahoty a sexu – tam se postoje různých skupin lidí výrazně liší. Facebook proto vydal [obsáhlý manuál](#) vysvětlující, jakými pravidly se v této oblasti řídit. Místy je to bizarní čtení (v plném významu toho adjektiva; často se používá nevhodně, ale tady sedí). Pokud jde o ňadra, kterými jsme naše vyprávění začali, nemáte zveřejňovat „odhalené ženské bradavky, pokud se nejedná o kojení, porod a okamžiky po porodu, situace týkající se zdravotního stavu (např. po mastektomii, za účelem zvýšení povědomí o rakovině prsu nebo po operaci za účelem změny pohlaví) a protest“. Kojící žena by tak možná dnes už prošla (po řadě protestů v minulosti), jenže kdoví.

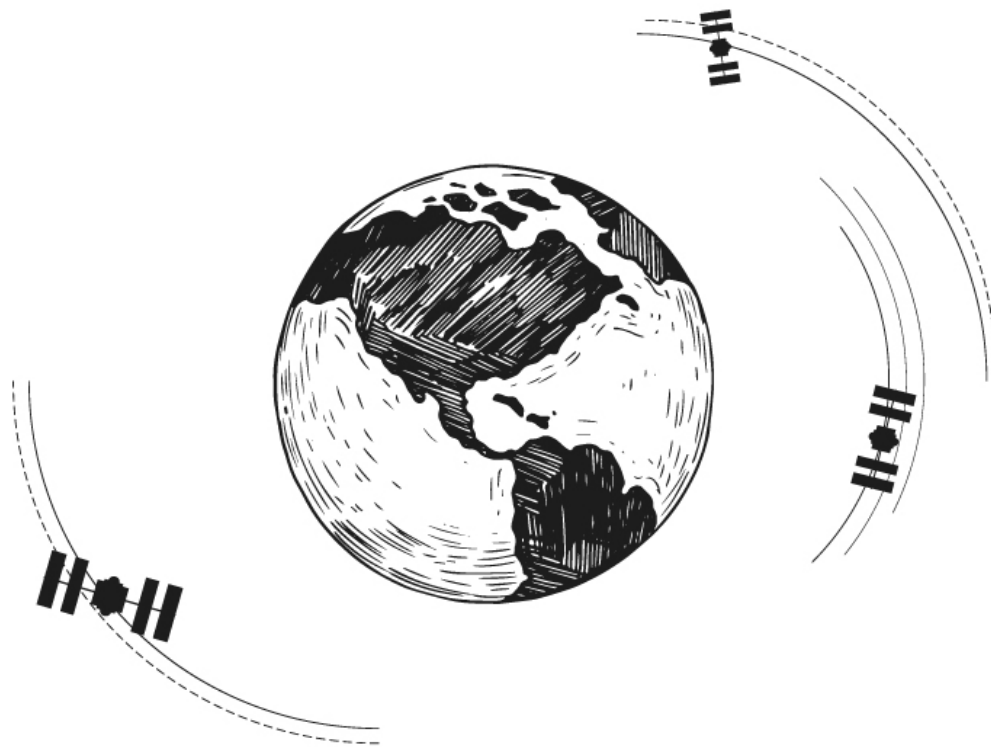
Vzhledem k obrovskému množství obrázků a textů, jež je třeba vyhodnotit, obvykle AI provádí první hrubou kontrolu, aby předtřídila to, čím se pak mají lidé detailněji zabývat. Kontrolorů závadného obsahu má

dnes Facebook nejméně deset tisíc, nejspíš víc. Vždy tedy nakonec záleží na úsudku konkrétního člověka, který pracuje pod tlakem, ve spěchu a dívá se na obrázky, často dost nechutné a v jeho kulturním prostředí nezvyklé, každý celičký den.

Posedlost Facebooku zakazováním zobrazení ženských ňader, se zvláštním přihlédnutím k prsním bradavkám, působí obsesivně a komicky. Otázka regulace obsahu však komická není. Státní orgány leckde po světě se už teď snaží do činnosti Facebooku a jiných sociálních médií zasahovat. Někde neurvale a účinně (Čína), někde spíš zmateně a případ od případu (Západ). Jelikož dvě miliardy lidí již přesunuly do prostředí sociálních médií významnou část svého života, svého styku s ostatními lidmi, bude nakonec nějaká jednotná regulace asi nezbytná. A jestli se něco nezmění, budou v ní nahá prsa nadále klasifikována podobně jako rasismus a terorismus; avšak snáze rozpoznatelná a stíhatelná.

Orbita

Není těžké se na oběžnou dráhu dostat, ale zůstat tam.



Každý si umí představit družici na oběžné dráze Země, ale překvapivě málo lidí by dovedlo bezchybně popsat její fyzikální princip. Je tomu tak proto, že žijeme v podmínkách, které jsou z hlediska nebeské mechaniky velmi atypické (viz [GRAVITACE](#)): na povrchu planety s atmosférou a poměrně silnou gravitací. Tím pádem nikdo z nás neviděl na vlastní oči první Newtonův zákon, zákon setrvačnosti. (A o to víc bychom měli ocenit Newtonovu genialitu, se kterou tři pohybové zákony formuloval.) Ten říká, že těleso setrvává v klidu nebo rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud na něj nepůsobí nějaká síla.

Jinými slovy: když něco uvedete do pohybu po přímé dráze, třeba hodíte míčem, bude se to po ní pohybovat navždy. Na Zemi to samozřejmě neplatí. Pohybující se předmět velmi rychle zastaví odpor vzduchu, tření, valivý odpor nebo nějaká jiná disipativní síla. Zákon setrvačnosti se dá vidět jen ve vakuu.

Druhá kontraintuitivní záležitost, se kterou je třeba se smířit, je skládání pohybů – anebo též všudypřítomnost volného pádu v gravitačním poli. Představte si, že vystřelíte vodorovně z pušky a zároveň upustíte stejnou kulku volně z ruky. Která dopadne dřív? Intuice doslova křičí, že ta volně upuštěná, ale není to pravda, obě dopadnou na zem současně (ta vystřelená pochopitelně o pár set metrů dál). Obě totiž padají volným pádem ze stejné výšky. Vodorovný výstřel ke svislé složce pohybu nepřidá vůbec nic. (Při výstřelu šikmo vzhůru nebo šikmo dolů by to bylo jinak, tam bychom museli vzít v úvahu svislou složku pohybového vektoru.) V tomto případě nezáleží ani na odporu vzduchu, ledaže by dokázal kulku nadnášet vzhůru, což se při jejím tvaru a velikosti patrně nestane.

V gravitačním poli padají všechny předměty stejnou rychlostí, peříčko jako cihla. Ta rychlost je nekonstantní, protože jde o trvalé působení síly, tudíž rovnoměrně zrychlený pohyb. Tato síla směřuje do středu Země, její zrychlení je známé g , jeho průměrná hodnota na povrchu Země je asi $9,81 \text{ m/s}^2$ (na pólech trochu víc, na rovníku trochu méně, pro běžné výpočty klidně počítejme 10).

To znamená, že každý předmět padající poblíž povrchu Země (zanedbáme-li odpor vzduchu a případný aerodynamický vztlak) urazí během první sekundy pádu asi pět metrů směrem dolů a na konci této první sekundy bude padat rychlostí deset metrů za sekundu neboli 36 km/h .

Vraťme se k vystřelené kulce. Za vteřinu se tedy nevyhnutelně propadne o pět metrů. Moderní útočná puška jí udělí počáteční vodorovnou rychlost řekněme 1000 m/s . Kulka letí a spadne.

Jenže co když ji vystřelíme opravdu hodně rychle? Země je kulatá. Pod kulkou letící rovně uhýbá povrch Země směrem dolů, což se na malé vzdálenosti příliš neprojeví, ale na větší ano. Když dosáhneme toho, aby za onu jednu sekundu, po kterou kulka spadne o pět metrů, „uhnula“ Země dolů také o pět metrů, bude kulka ve stále stejné výšce! Jelikož známe velikost zeměkoule, můžeme pomocí trigonometrických vzorců spočítat,

jak rychle by kulka musela letět, aby si při neustálém pádu udržovala stále stejnou vzdálenost od zemského povrchu. Je to 7,8 km/s.

A to se dá zařídit, jen musíme pušku nahradit kosmickou raketou, kulku kosmickou lodí a namísto dráhy těsně při zemi použít mnohem vyšší, abychom se dostali nad atmosféru. Z toho důvodu se nedá doletět na oběžnou dráhu letadlem. Americký experimentální letoun X-15 už v roce 1963 dosáhl výšky 108 km, ale „jen“ při rychlosti 6000 km/h. To je zhruba pětina rychlosti, kterou by potřeboval, aby se ve vesmíru udržel, takzvané první kosmické rychlosti, která činí 7,8 km/s.

Předmět, který jí v blízkosti Země jakýmkoli způsobem dosáhne, bude kolem Země napořád kroužit. Jeho pohyb bude součtem dvou složek: rovnoměrného přímočarého pohybu odpovídajícího počátečnímu impulsu (konstantní rychlost, nulové zrychlení) a volného pádu (rostoucí rychlost, konstantní zrychlení). Předmět se po přímce neustále snaží uletět a zároveň po jiné přímce neustále padá. Výsledkem je pohyb po uzavřené dráze – kružnici nebo elipse.

Při návratu z oběžné dráhy vyvstává opačný problém. Rychlosti, která byla nezbytná pro udržení na orbitě, se musí kosmická loď během přistání zbavit. Do atmosféry vstupuje ve výšce kolem 100 km rychlostí třicet tisíc kilometrů za hodinu. Tak vysoko je sice ovzduší velice řídké, ale stačí na to, aby se stroj začal zahřívat. Směrem dolů sice rychlost klesá, ale také houstne atmosféra. Na povrchu kosmické lodi tak bývá až 1500 stupňů Celsia. To je teplota, při níž ocel teče jako voda. Speciální slitina a keramické kompozity vydrží o hodně víc, jenže i tak stroj při sestupu v podstatě hoří.

Kolem zeměkoule dnes létá asi 5000 družic, z toho kolem dvou tisíc funkčních. Z praktického hlediska se rozlišují tři typy oběžných drah podle vzdálenosti od Země. Nízká oběžná dráha neboli LEO (low Earth orbit) je taková, která se nachází ve výšce 160 až 2000 km. Niž to nejde kvůli atmosféře. Ta ostatně ovlivňuje všechny satelity na LEO; jejich dráha kvůli tření o zbylé molekuly vzduchu stále pomalu klesá a čas od času je potřeba ji korigovat zážehem motorů.

LEO má několik výhod. Je blízko a k dopravě na ni je tudíž potřeba méně energie. Malá vzdálenost od Země ji také předurčuje k satelitnímu snímkování a jiným aplikacím zaměřeným na průzkum zemského povrchu. A konečně, je zemským magnetickým polem poměrně dobře chráněna před kosmickým zářením. Všechny dosavadní lety s lidskou posádkou s výjimkou expedic na Měsíc zůstaly v rozsahu nižších LEO. Největším a nejvýznamnějším satelitem na LEO je Mezinárodní kosmická stanice (ISS), která obíhá Zemi ve výšce 400 km.

V některých případech může být nevýhodou LEO vysoká rychlost vůči zemskému povrchu – typická oběžná doba činí 90 minut. To se nehodí provozovatelům špionážních družic, protože když chtějí prozkoumat nějaké specifické místo, mají na to vždy jen pár vteřin.

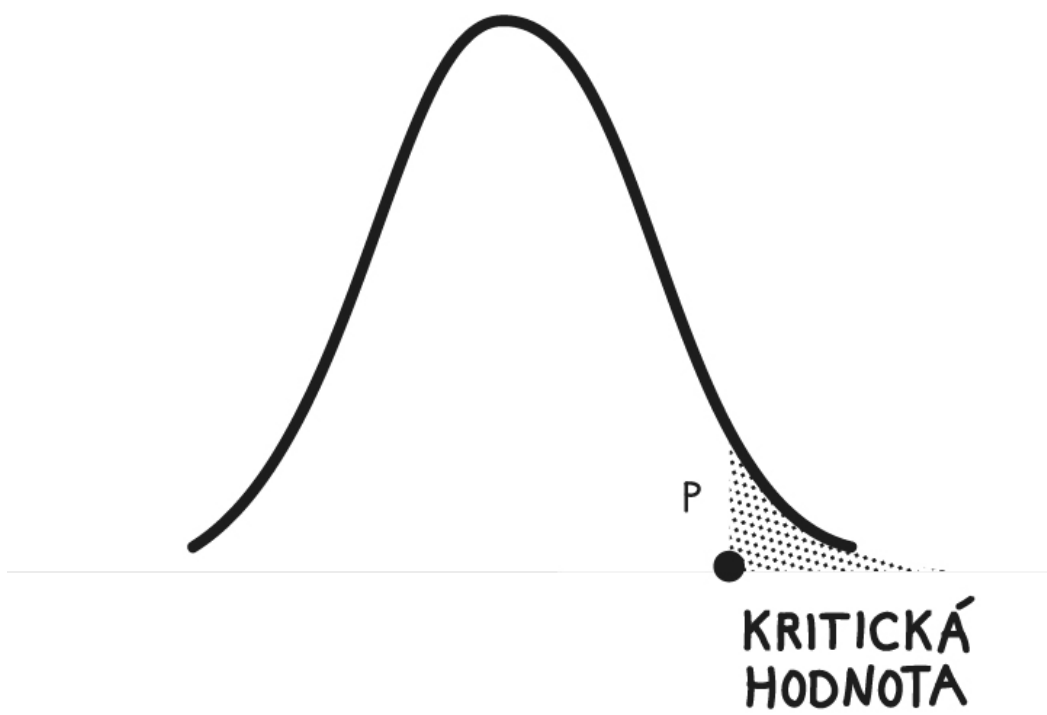
Druhou důležitou oběžnou drahou je geostacionární dráha (GSO, geosynchronous orbit). Nachází se nad rovníkem ve výšce 35 786 km, je tedy tvořena jedním úzkým prstencem. Předmět na GSO má oběžnou

dobu přesně rovnou délce dne, což znamená, že zdánlivě visí nad stále stejným místem zemského povrchu (tj. nad některým bodem rovníku). To je výhodné zejména u telekomunikačních družic, protože pozemní anténu na ně stačí zaměřit jednou provždy.

Mezi GSO a LEO se nacházejí střední oběžné dráhy (MEO, medium Earth orbit). Po nich létají družice tvořící navigační systémy (GPS, Glonass, Galileo) a speciální telekomunikační satelity např. pro pokrytí severního a jižního pólu.

P-hodnota

Statistika se dá používat dobře i špatně.



Na první pohled to vypadá jednoduše. Vědec zformuluje nějakou hypotézu – dejme tomu, že lék A je účinnější než lék B –, pak provede náležité množství pokusů a ty mu ji buď potvrdí, nebo vyvrátí.

Jenže takhle jednoduché to není. Představte si, že máme dvě skupiny po padesáti lidech. Jedné podáváme po předepsanou dobu nový lék A, druhé starý osvědčený lék B. Pak se podíváme, jak jejich příznaky ustoupily – dejme tomu, že půjde o lék na hypertenzi, budeme jim tedy měřit krevní tlak.

Průměrná hodnota v testované skupině A bude nižší než v kontrolní skupině B. Znamená to, [že je lék A opravdu účinnější?](#)

Možná ano, možná ne. Může jít o náhodu, protože každé měření je zatíženo chybou – třeba se nám do skupiny B dostalo víc lidí, kteří jsou při měření tlaku nervózní a vyletí jim vždy vzhůru. Může být, že lidé ve skupině A náhodou jedli po dobu pokusné léčby vhodnější stravu, víc se pohybovali, měli méně stresu. Může být, že opakováním pokusu s týmiž lidmi o měsíc později bychom dostali jiné výsledky. Může být, že u dvou jinak sestavených skupin bychom dostali právě opačný výsledek. Anebo taky ne.

K odlišení průkazných výsledků od neprůkazných slouží v experimentální vědě statistické metody. Nejčastěji používanou je test pomocí tzv. p-hodnoty. Jeho cílem je zjistit, s jakou pravděpodobností se mýlíme, když věříme své hypotéze (například té, že lék A je účinnější než lék B).

Jak to v matematice bývá, neobejdeme se bez trochy terminologie. Hlavním potřebným pojmem je tzv. nulová hypotéza. Tou se rozumí vysvětlení pozorovaného efektu čistě na základě náhody. Při vyhodnocování dat se snažíme nulovou hypotézu dokázat. Pokud se nám to podaří, pokládá se alternativní hypotéza – tedy ta, o kterou nám skutečně jde – za zamítnutou. Pokud se naopak nulovou hypotézu dokázat nepovede, je naše testovaná hypotéza podpořená. (Takto trochu vzhůru nohama je test postaven proto, že se to daleko snáz počítá.)

Před dokazováním nulové hypotézy je třeba stanovit tzv. hladinu významnosti. To je nejvyšší přijatelná pravděpodobnost, se kterou ještě může nulová hypotéza platit, abychom ji přesto pokládali za vyvrácenou. (Pravděpodobnost je vždy číslo mezi nulou a jedničkou, případně mezi nulou procent a sty procenty, což je totéž.) Hladinou významnosti nemůže být nula ani číslo, které k ní má velmi blízko, protože měření není nikdy dokonale přesné. Pro posouzení výsledků většiny přírodovědeckých experimentů se konvenčně používá hladina významnosti 0,05.

Z experimentálních dat se pak vypočte tzv. p-hodnota. Vzorce pro její výpočet se různí podle toho, zda v případě nulové hypotézy (tedy neomezené vlády náhody nad daty) máme právo předpokládat tzv. normální rozdělení (to má tvar známé Gaussovy křivky), anebo nějaké jiné. P-hodnota v každém případě vyjadřuje míru neshody dat s čistě náhodným výsledkem. Čím je větší, tím jsou data dál od náhody a blíží k nějakému systematickému vlivu. Když je p-hodnota větší než hladina významnosti, pokládáme nulovou hypotézu za vyvrácenou.

Pokud tomuto výkladu rozumíte, pak víte vše potřebné o většině statistiky používané v přírodních i sociálních vědách. (Pochopitelně existují vědní oblasti, kde se s daty pracuje mnohem důkladněji; existuje také tzv. explorační statistika, která dělá něco úplně jiného než zde popsaná statistika konfirmační; přesto lze větu před závorkou brát vážně.)

A pokud tomuto výkladu opravdu rozumíte, pak určitě vidíte, že celá věc má několik háčků.

Tak především, po celou dobu jsem si dával pozor, abych nenapsal, že při vyvrácení nulové hypotézy je naše hypotéza dokázaná, místo toho jsem použil slovo „podpořená“. Je to důležitý rozdíl. Vyvrácení nulové hypotézy není totéž jako důkaz hypotézy testované; aby bylo, museli bychom mít jistotu, že nenáhodnost dat má jen jedno jediné možné vysvětlení. Což nikdy není jisté. Vyvrácení nulové hypotézy znamená jen: nějaký systematický efekt tam působí, zkoumejme to dál.

Z hlediska formální logiky zde jde o rozdíl mezi dokladem a důkazem. Přírodověda dost často jednoznačné důkazy neumožňuje, musíme je tedy nahradit dostatečným množstvím dokladů. Rozhodně ne jedním.

Dále, hladina významnosti 0,05 je běžná konvenční volba, ale nemusí být vždy vhodná. Na tom čísle není nic magického a leckdy může být příliš benevolentní.

A konečně, dost možná vás napadlo, že by se dalo trochu švindlovat. Co kdybychom z dat vynechali některá měření, která se nám nehodí, například vyškrtli pár lidí, na které lék nepůsobil? Co kdybychom vůbec zúžili záběr, dejme tomu ex post řekli, že jsme prokázali hypotézu u žen, pokud jde o muže, budeme zkoumat dál? Anebo, pokud vám tohle připadá jako příliš nestoudná manipulace, co takhle zahodit všechny výsledky, provést celý experiment znova a doufat, že vyjde příznivěji? Opakovat to tolikrát, dokud jednou nevyjde příznivě?

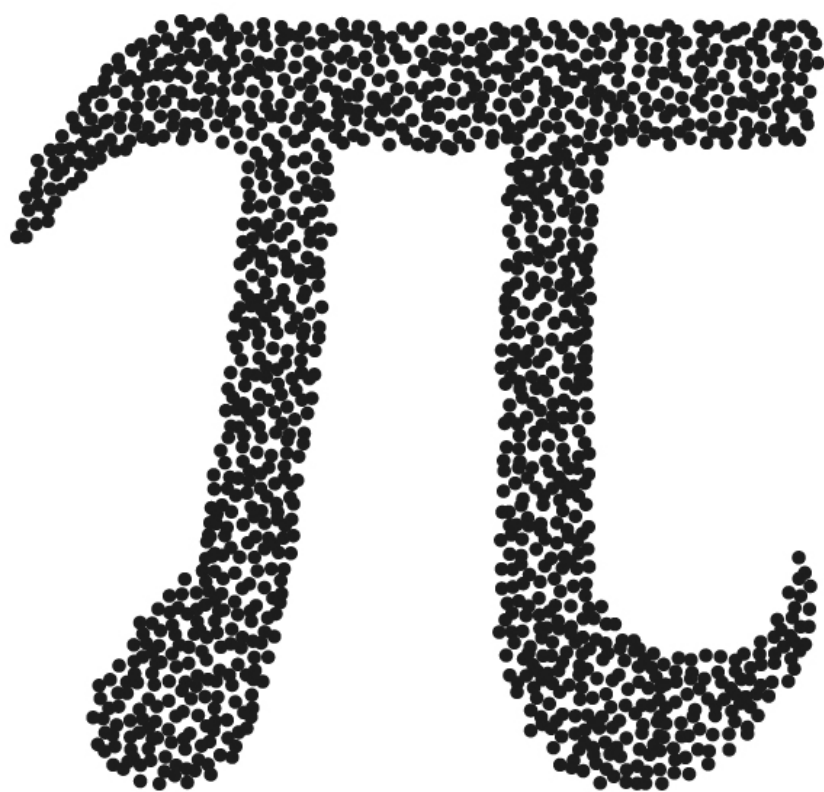
Tady se dostáváme do oblasti vědecké etiky. K ní patří, že by se měly zveřejňovat všechny výsledky, nejen ty, které vycházejí pěkně. Na druhou stranu je samozřejmě a v pořádku zahodit ty výsledky, kde se výzkumníci dopustili zjevné chyby – použili lék, který se nevhodným skladováním mohl zkazit, špatně nastavili měřicí přístroj, popletli vzorky a podobně. Což se stává. Hranice mezi svévolným a odůvodněným škrtáním výsledků měření může být rozmazaná, nebo se na to přinejmenším lze vymlouvat. Ve výzkumu jde často o velké peníze – už jen proto, že ty výzkumné programy, které potenciálně neslibují zisk, stále častěji nemá kdo platit. Motivace podvádět proto není zanedbatelná. Jak velký je skutečný rozsah tohoto problému, kolik naměřených výsledků je upraveno a do jaké míry, to je předmětem četných diskusí, jasné závěry však neexistují.

Mimochodem, dnes platné normy práce s daty se vyvinuly poměrně nedávno, až ve dvacátém století. Dřív nebyly k dispozici potřebné matematické techniky. Tím pádem bývalo běžné, že vědci v dávnější minulosti formulovali hypotézu, pak prováděli experimenty a brali v úvahu jen ty výsledky, které ji podpořily. Dnes by to byl podvod, kdysi to byla běžná a neproblematická pracovní metoda. Například prověření laboratorních deníků G. J. Mendela (viz [CHROMOZOM](#)) ukazuje, že jeho

genetické pokusy vycházely stoprocentně, bez jediné výjimky a chyby, což je samozřejmě nemožné. Mendel z dnešního pohledu švindloval, ze svého se choval korektně. Co nevyšlo správně, to nebral v úvahu, přičetl to prostě své technické chybě. Neměl formální vědecké vzdělání, ale nejspíš by podobně – v souladu se zvyklostmi své doby – postupoval, i kdyby ho měl. Věda, ani přírodní, nežije mimo historii a společnost.

Pí

Kruh, jeden z nejpřirozenějších tvarů, nám vnutil velmi podivné číslo.



Nakreslit kruh je snadné, stačí mít dva klacíky na provázku, jeden zabodnete do středu a druhým, na délku provázku, kolem něj opisujete kružnici. S kruhy si začala hrát každá civilizace, která měla provázky – a která vynalezla kolo.

Tím se nevyhnutelně přiblížila znalosti čísla pí (π), které udává poměr obvodu kruhu k jeho průměru. Znáte ho ze školy jako Ludolfovo číslo nebo 3,14 (a nekonečný počet dalších desetinných míst).

Mimochodem: matematici jsou citliví na rozlišování pojmů kružnice a kruh. Kružnice je ta čára na obvodu, kruh je celá plocha včetně té čáry.

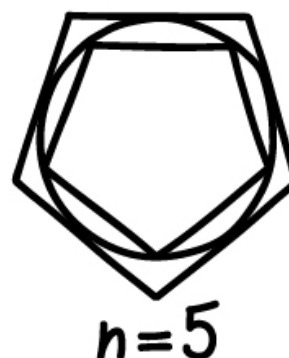
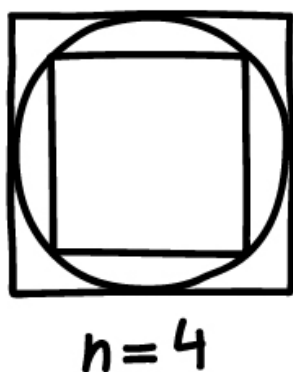
O kolik popojede vůz, když se jeho kolo otočí kolem dokola? Asi tak o trojnásobek průměru kola, což platí pro každé kolo, velké i malé. Obvod každého kruhu je asi trojnásobkem jeho průměru. A dalo by se to spočítat přesněji?

Lidé jsou zvědaví, a i kdyby neměl problém obvodu kruhu praktický význam, stejně by ho začali řešit. Egypťané a Babyloňané již před čtyřmi tisíci lety došli k velmi dobrým odhadům ve formě zlomků. Nejprve našli co nejsprávnější hodnotu měřením a pak hledali výpočetní konstrukci, která by k požadovanému číslu vedla. Z praktického hlediska to byl naprosto postačující přístup. Typicky inženýrský.

Jenže pak se ve Středomoří objevila civilizace, která si víc než inženýrů vážila filozofů.

Ve třetím století před naším letopočtem žil v Syrakusách na Sicílii, tedy v řeckém městě, Archimédes – vynálezce, fyzik a matematik. Jeho jméno máme asi nejsilněji spojené s Archimédovým zákonem („Těleso ponořené do kapaliny...“), vymyslel toho však mnohem víc: šnekové čerpadlo, různé zbraně, vzorce pro objemy těles. A vymyslel také postup pro stanovení čísla pí s libovolnou přesností.

Archimédova úvaha je jednoduchá a velice elegantní. Pí je totéž co délka obvodu kruhu s jednotkovým průměrem. Do kruhu se dá vepsat mnohoúhelník, a taky se mu dá mnohoúhelník opsat. Obvod kruhu bude vždy někde mezi délkou obvodu opsaného (tj. většího) a vepsaného (tj. menšího) mnohoúhelníku.



Začneme pro názornost čtvercem, což Archimédes asi nedělal, to by pro něj bylo příliš snadné. Obvod čtverce opsaného kolem kruhu je 4, protože každá jeho strana je stejně dlouhá jako průměr kruhu, tj. rovna jedné. Jak dlouhý je obvod vepsaného čtverce?

Archimédes znal Pythagorovu větu o pravoúhlém trojúhelníku (Pýthagorás ze Samu žil o tři sta let dříve než on) a snadno spočítal, že strana vepsaného čtverce je rovna odmocnině z $0,5^2 + 0,5^2$, což je asi 0,71, celý obvod je tedy 2,84. Tím máme první odhad čísla π : je menší než 4 a větší než 2,84. Dost hubený výsledek.

Jenže když nahradíme čtverec pětiúhelníkem, pak šestiúhelníkem a tak dále, začnou se odhady zlepšovat. Vtip je v tom, jak spočítat obvod těchto obrazců, a právě na to Archimédes přišel. Vyžaduje to důmysl, ale žádná kouzla, protože na rozdíl od kruhu jsou mnohoúhelníky tvořeny rovnými čarami.

Archimédes došel až k mnohoúhelníku s 96 stranami a stanovil, že π leží někde mezi hodnotami $3 + 10/71$ a $3 + 10/70$. Chyba činí asi 0,03 %. Metoda to je ve své jednoduchosti geniální, a kdyby měl Archimédes k dispozici lepší číselnou notaci než tehdejší (viz kapitola [X](#)), velmi nepohodlnou, dost možná by objevil diferenciální a integrální počet skoro dva tisíce let před Newtonem a Leibnizem. Měl k tomu blížoučko (viz [INTEGRÁL](#)).

Posledním příznivcem Archimédovy metody byl Ludolph van Ceulen, který se pomocí ní dostal roku 1596 – neuvěřitelně pracně – na 35 desetinných míst. V německé literatuře (a starší české) se π nazývá „Ludolfovo číslo“ právě po něm. Na sklonku jeho života však začali matematici objevovat čistě algebraické způsoby výpočtu přibližné hodnoty π pomocí nekonečných řad. Což je technika, která se používá dodnes, jen se příslušné vzorce vylepšují, aby konvergovaly rychleji.

Základem těchto metod je skutečnost, že Archimédovy vzorce se dají dobře aproximovat jinými, jejichž numerický výpočet je snazší. Zásadně k tomu přispělo studium vlastností goniometrických a cyklometrických funkcí – tedy aparátů, které Archimédes neměl k dispozici (jejich první náznaky se objevily v antice asi sto let po jeho smrti, dnešní podobu funkcí jako sinus a kosinus zavedl až Euler v osmnáctém století). Díky tomu a díky stále výkonnějším počítačům známe π na desítky bilionů desetinných míst a postupujeme dál.

Qubit

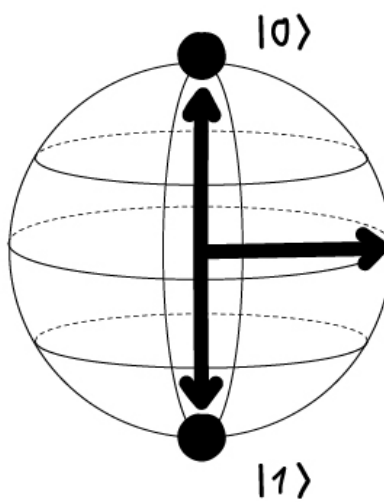
Kvantové počítače už existují.

KLASICKÝ
BIT

● 0

● 1

QUBIT



$$\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

Subatomární částice (viz [KVANTUM](#) a [KVARK](#)) nejsou tak docela hmotné, dají se pokládat za balíčky energie, která se podle okolností občas jako hmota projevuje. A nemůžete na ně ukázat prstem. Jsou rozmazané v prostoru. Na každém jeho místě s jinou pravděpodobností.

To si neumíme představit, ale můžeme to spočítat. Víme, že kvantová mechanika je správná, protože poskytuje předpovědi, které se dají měřením ověřit a které jsou velice přesné. Kvantovou mechaniku tak můžeme využívat v praxi, přestože je na ní stále ještě mnoho nesrozumitelného. Jedním z nejnovějších využití jsou [kvantové počítače](#).

Od počítačů, které známe, se liší ve všem. Začít můžeme způsobem uložení informace. Základním pojmem zde je qubit, slovo složené z „quantum“ a „bit“. Bit je jednotkou informace v normálním počítači: nula, nebo jednička.

Nikdy neuvidíte mezivýsledky

Qubit je něco docela jiného. Občas se někde můžete dočíst, že qubit obsahuje obě hodnoty bitu najednou, že je současně nulou i jedničkou. To je nesmysl, anebo laskavěji: je to popularizace zacházející tak daleko, že nevysvětluje, ale mlží. Vysvětlit, jak to s qubitem je doopravdy, je však dost těžké. (Anebo není – pokud víte, co jsou [KOMPLEXNÍ ČÍSLA](#).) Vedlejším benefitem však je, že alespoň zpovzdálí společně nahlédneme, jak kvantová fyzika doopravdy počítají.

Představte si normální souřadnou soustavu, tedy dvě osy na sebe kolmé. Oproti běžným zvyklostem jim nebudeme říkat x a y ani reálná a imaginární osa. Namísto toho si vodorovnou osu označíme symbolem $|0\rangle$ a svislou osu symbolem $|1\rangle$. Co ty dva podivné zápisy znamenají? Jednoduché kvantové objekty se vyskytují ve dvou různých kvantových stavech. Typickým příkladem je spin (něco jako rotace, ale abstraktní, v matematickém prostoru – do detailů se teď pouštět nebudeme), který obvykle může nabývat dvou různých hodnot. Neříká se jim tak, ale můžete si je představovat jako kvantovou nulu a kvantovou jedničku.

Stav qubitu je směs (fyzik by namísto toho použil slova superpozice, matematik by řekl: lineární kombinace) hodnot $|0\rangle$ a $|1\rangle$ v nějakém poměru. Jeho hodnotu reprezentuje [dvojice čísel](#); ta čísla říkají, „kolik kvantové nuly“ a „kolik kvantové jedničky“ qubit obsahuje. Správný fyzikální termín pro ta dvě čísla zní amplitudy. Aby to bylo zábavnější, amplitudy mohou být komplexní čísla (ale úplně stačí, když si na jejich místě dokážete představit obyčejná, reálná). A musí pro ně platit tzv. normalizační podmínka, což znamená, že součet druhých mocnin amplitud se [musí rovnat jedničce](#).

Teď jste nejspíš nabyli dojmu, že amplitudy můžeme měřit, že se zobrazí někde na displeji – tak jako obsah paměti normálního počítače. Není tomu tak, takhle kvantový svět nefunguje. Když změříte stav qubitu, dostanete vždy buď nulu nebo jedničku žádnou jinou hodnotu vám vaše

měřicí aparatura nikdy neukáže, ať je jakákoli. Pokud byl výchozí stav qubitu dejme tomu $0,8 \times |0\rangle + 0,6 \times |1\rangle$ (přesvědčte se, že platí normalizační podmínka), pak naměříme nulu s pravděpodobností $0,8^2 = 0,64$ a jedničku [s pravděpodobností](#) $0,6^2 = 0,36$.

Kvantová hradla

Základem fungování normálního počítače, toho, co máte doma, jsou logické obvody. Logický obvod (neboli hradlo) si můžete představit jako krabičku, která má vstupy a výstupy: vstupy do ní přivedete, ona s nimi ve svých tajemných útrobách něco provede a nastaví hodnotu výstupu. Počítače pracují se signály o hodnotách 0 a 1. Nejjednodušší logický obvod se jmenuje NOT. Má jeden vstup a jeden výstup. Výstup obvodu NOT má opačnou hodnotu než vstup: když je na vstupu 0, je na výstupu jednička. A naopak.

Dva další užitečné obvody jsou AND a OR. Mají po dvou vstupech a jednom výstupu. AND je logický součin: na výstupu je jednička, jsou-li oba vstupy jedničky, jinak je tam nula. OR je logický součet, na jeho výstupu je jednička, je-li aspoň jeden ze vstupů jednička. Jen v případě obou nulových vstupů je na výstupu OR nula. [Z těchto tří obvodů](#) se dá poskládat libovolně složitá logická funkce, tedy – mimo jiné – [plně funkční počítač](#).

Na kvantový počítač se můžeme dívat jako na analogii počítače „normálního“. Namísto nul a jedniček máme kvantové stavy qubitů (příkladem takového stavu je výše zmíněná hodnota $0,8 \times |0\rangle + 0,6 \times |1\rangle$). A namísto logických obvodů NOT, AND a OR máme kvantová hradla (angl. quantum logic gate).

Kvantových hradel, přinejmenším teoreticky navržených, [existuje větší množství](#). Každé z nich má zas vstupy a výstupy. Výstup je nějakou matematickou funkcí vstupu, většinou však ne tak jednoduchou, jako je to u prostého AND či OR. Kombinací kvantových hradel můžeme poskládat – stejně jako u obyčejného počítače – složité obvody, které jsou ekvivalentem nějakého algoritmu. Co je důležité, existují i univerzální kvantová hradla. Ta jsou říditelná, dají se přinejmenším v principu ovládat programem. Bez nich bychom pro každý algoritmus museli postavit celý specializovaný kvantový počítač.

Takový princip je známý počítačovým pamětníkům: právě takto fungovaly tzv. analogové počítače. Namísto klávesnice a obrazovky měly panel se zdičkami, kam se zapojovaly kabely. Propojením kabelů se nastavila diferenciální rovnice (viz [DERIVAGE](#)), kterou měl počítač řešit. Dnes je nepotřebujeme, protože dovedeme jejich činnost simulovat na obyčejném počítači. Ve své době však byly cennou pomůckou – nejen proto, že digitální počítače nebyly k dispozici, ale také proto, že se na analogovém počítači daly nastavit i rovnice, u nichž se nevědělo (a často neví dodnes), jak je řešit. Analogový počítač nepotřebuje algoritmus, protože je modelem rovnice. Namísto počítání sledujeme iak se model

provoz je modelem rovinné turbulentní proudění, jak se model chová. Je to podobná situace, jako když umístíte model auta do malého větrného tunelu a měříte, jak karosérii obtéká vzduch. Nikdo nikdy by to nedovedl spočítat (viz [CHAOS](#)), ale změřit se to dá celkem snadno.

A hodně podobně tomu je s kvantovým počítačem. Programuje se tak, že jde o kombinaci algoritmu a modelování.

Programy máme, na počítače čekáme

Kvantový počítač byl po dlouhou dobu teoretickou představou. Pak se začaly stavět v laboratořích. Nepoznali byste, že jde o počítač, nejviditelnější částí bylo vždy chlazení. Paměť, kde jsou uloženy qubity a kde probíhá výpočet, musí být důkladně izolována od vlivů okolí, aby se její kvantový stav neměnil; a největším zdrojem rušení je tepelný pohyb molekul a atomů. Ideální kvantový počítač by měl mít tuto svou část vychlazenou až do blízkosti absolutní nuly, což vyžaduje hodně rozměrnou a drahou mašinerii.

Paměť normálního počítače mívá různé fyzikální podoby: jedničku či nulu může reprezentovat stav klopného obvodu (u statické RAM), kapacita kondenzátoru (u dynamické RAM), magnetická orientace malého kousku materiálu (u pevného disku) a mnoho dalších věcí. Stejně tak qubity se dají realizovat různě a optimální řešení se zatím teprve hledá.

Existující kvantové počítače jsou vesměs experimentální zařízení, nejsou určeny k praktickým výpočtům, ale ke zkoumání, jak vlastně tuto nezvyklou technologii dovést do užitečné podoby. To je jedna větev výzkumu: jak ten stroj vlastně postavit.

Druhá větev spočívá v hledání algoritmů. Na té první je kupodivu [zcela nezávislá](#). Programovat lze i zcela hypotetický kvantový počítač, když se předem shodneme na tom, co bude umět. Pozornost budí zejména tzv. Shorův algoritmus publikovaný roku 1994. Jeho autor, americký matematik Peter Shor, v něm navrhuje, jak faktorizovat velká čísla v polynomiálním čase.

Faktorizovat číslo znamená rozložit ho na součin prvočísel. Základní postup spočívá v tom, že zkusíme prostě jedno prvočíslo za druhým: dělí zadané číslo beze zbytku, anebo ne? Doba výpočtu je úměrná mocnině počtu číslic zkoumaného čísla, takže s deseticiferným číslem se budeme mořit zhruba stokrát déle než s tříciferným. Kdyby faktorizace tříciferného čísla trvala pikosekundu (viz [BILION](#)), bude stejný výpočet pro sedmdesaticiferné číslo trvat 37 let, pro stociferné pak 40 miliard let. (Avšak ještě pro padesaticiferné pouhých dvacet minut.)

Na faktorizaci velkých čísel jsou založeny nejbezpečnější šifry (viz [samostatné heslo](#)), jaké známe. Ne proto, že by byly v principu nerozluštitelné, ale prostě proto, že by jejich prolomení trvalo tak dlouho. Luštit bankovní transakci nebo utajenou zprávu desítky let nemá praktický smysl. A kdyby se výkonost počítačů významně zvýšila, stačí prodloužit šifrovací klíč teprve vyžadovat faktorizaci větších čísel

prozkoušet jedno číslo za druhým je naivní přístup, matematici znají

o něco rychlejší postupy faktorizace, žádný z nich však nemění situaci zásadně. Algoritmus pracující v polynomiálním čase by takový vliv ale měl. Zmíněných 37 let by mohl redukovat na minuty, sekundy, nebo dokonce zlomky sekund.

Prozatím jde o akademickou kuriozitu. Shorův algoritmus nikdo nevyzkoušel, především proto, že ještě neexistuje dostatečně velký kvantový počítač. (To se ale může změnit brzy.) I kdyby existoval, práce s takovým zařízením bude zpočátku velice nepružná. A co je nejdůležitější, kryptologové zvedli hozenou rukavici a už rozpracovali post-kvantovou kryptografii, teorii šifer neprolomitelných kvantovými výpočty.

Radioaktivita

Existuje několik druhů neviditelného ionizujícího záření. Všechny jsou poučné a nebezpečné.



Elektrinou se začali vědci zabývat zhruba od roku 1800. Jakmile měli k dispozici zdroj proudu v podobě Voltových sloupů – předchůdců dnešních baterií –, začali zkoumat, co se stane, když se proud pustí do toho či onoho materiálu. Brzy došlo na průchod proudu vakuem, přesněji řečeno plynem zředěným do té míry, jak na to stačily tehdejší vývěvy.

V téže době vznikly indukční cívky – důmyslná elektromechanická zařízení, která dovedou přeměnit slabé stejnosměrné napětí poskytované baterií na pulsy vysokého napětí. A začaly se dít věci! Michael Faraday byl první, kdo zpozoroval světelný oblouk mezi dvěma elektrodami zatavenými do skleněné trubice, z níž byl vyčerpán vzduch. Ještě vyšší napětí vedlo k ještě lepším světelným efektům. Tak se stalo, že přímý předchůdce pozdějších zářivek a neonových trubice byl na světě dřív než Edisonova žárovka – pro každodenní použití ovšem nepraktický. Vedla od něj ovšem cesta nejen k neonovým reklamám a výbojkám, ale také k televizním a počítačovým obrazovkám. Pro jejich zastaralé typy dodnes používáme zkratku CRT neboli cathode ray tube – katodová trubice.

Proč katodová? Dalo se čekat, že čím vyšší vakuum (tj. nižší tlak, méně plynu), tím lépe bude trubice svítit. Jenže se ukázalo, že opak je pravdou. Když se [William Crookes](#) v sedmdesátých letech 19. století dostal na miliontinu atmosférického tlaku, začala mu trubice naopak zhasínat. Nejprve jen v části ležící naproti záporné elektrodě, při ještě vyšším vakuu pak zhasla celá. Namísto toho se však slabě rozzářilo sklo, což bylo vidět nejlépe ve tmě a opět na místě naproti záporné elektrodě. Té se říká katoda (kladná anoda), jev proto dostal název katodové záření.

V listopadu 1895 zjistil [Wilhelm Röntgen](#) víceméně náhodou, že katodové záření dokáže exponovat fotografickou desku, i když je jeho zdroj zakryt neprůhledným stínítkem. Začal tedy zjišťovat, čím vším ještě projde a jak se to projeví na fotocitlivé vrstvě. Výsledek známe a dodnes používáme, jmenuje se po vynálezci. (On sám používal název „paprsky X“, [o popularitu tohoto druhu nestál](#).)

Rodinný podnik

O rok později experimentoval v Paříži [Henri Becquerel](#) se sloučeninami uranu. Působily na fotografickou desku úplně stejně jako Röntgenovy paprsky X, takže se nabízela domněnka, že mají něco společného. Rozdíl byl v tom, že Röntgen musel pro vytvoření svých paprsků dodávat elektrickou energii. Uran zářil sám od sebe.

Becquerelova myšlenka, že uran vydává paprsky X, se ukázala být mylnou, ale otevřela cestu k převratným objevům. [Marie Curie-Sklodovská a její manžel Pierre Curie](#) ukázali, že záření neznámého charakteru vydává nejen uran, ale i některé další prvky. Při této příležitosti objevili dva nové: polonium a radium. Curie-Sklodovská nazvala zkoumaný jev radioaktivitou.

Tou dobou se obecně uznávalo, že hmota je tvořena atomy, ale bylo to jen slovo. Co atomy vlastně jsou, jakou strukturu a vlastnosti mají, to nevěděl nikdo. Po objevech Becquerela a Curieových fyzikové usoudili, že právě radioaktivita by mohla o atomech něco vyzradit.

Postupně rozlišili několik druhů radioaktivního záření – paprsky alfa, beta a gama. Čím vyšší písmeno abecedy, tím jsou pronikavější. Alfa částice jsou nejtěžší a lze je odstínit listem papíru. Beta částice jsou lehčí a k jejich zadržení je zapotřebí něco jako hliníková fólie. Nejlehčí jsou nosiče paprsků gama. Ty zadrží jen něco velmi hmotného, třeba olovený blok. Kromě toho se druhy radioaktivity liší elektrickým nábojem: alfa částice jsou kladné, beta částice záporné a na gama záření elektrický proud nepůsobí, neodkloní je z přímého směru.

Go to tady září

Fyzikové postupně zjistili, o jaké částice u toho kterého záření jde. Alfa částice je shluk dvou protonů a dvou neutronů neboli jádro atomu helia. Beta částice je elektron (později se ukázalo, že existuje i pozitronové záření – pozitron je totéž co elektron, jen kladně nabitý).

Gama paprsky jsou tvořeny proudem fotonů, tedy částic, které jsou nositelem všech elektromagnetických vln včetně viditelného světla. Liší se jen frekvencí (viz [ULTRAZVUK](#)), a tedy také energií: rádiové vlny, které přijímají naše telefony a televizory, mají nejnižší frekvence, následují mikrovlny (radar, mikrovlnná trouba), infračervené záření (u běžných objektů totéž co sálání tepla), viditelné světlo má frekvenci ještě vyšší, nad ním následují ultrafialové paprsky, rentgenové záření a gama záření. Naše oči nevidí za fialovou; kdybychom takovou schopnost měli, viděli bychom i rentgenové a gama záření jako nějakou novou, slovy nevyjádřitelnou barvu.

Naděje, že radioaktivita pomůže pochopit strukturu atomu, se naplnila: právě identifikace alfa a beta částic vedla k Bohrově modelu (viz [samostatný článek](#)).

Všechny tři druhy záření vznikají při rozpadu atomových jader. Některé prvky se rozpadají spontánně (viz [ASTAT](#)) a vystřelují přitom proud malých úlomků, což jsou právě alfa částice. Jiný typ rozpadu dává vzniknout beta částicím, tedy elektronům. V jádru atomu žádné elektrony nejsou, ale mohou vzniknout, když se neutron změní na proton a uvolní přitom elektron. Záření gama vzniká zpravidla jako dodatečný efekt alfa a beta rozpadu, tedy spolu s nimi.

Pomyslete na Černobyl

Když se dnes řekne radioaktivita, nemyslíme většinou na vědu, ale na nebezpečí života. Všechny druhy radioaktivního záření škodí zdraví a mohou zabíjet.

Radioaktivita není „jedovatá“. Útočí hrubou silou; problém s ní v tom je, že záření je z atomů vystřelováno rychlostí světla (gama) nebo jen trochu pomaleji (alfa a beta). Proto nese ohromnou energii. Všechny druhy radioaktivního záření škodí zdraví a mohou zabíjet. O pronikavosti jsme si řekli před chvílí: paprsky gama jde zastavit obtížně, alfu snadno, beta je někde mezi tím. Z toho však nevyplývá nutně, že gama je nejškodlivější. To, co škodí živým organismům, není záření samo o sobě, ale jeho ionizující účinky. Zhruba řečeno, radioaktivní záření ničí atomy v našich tělech; a teprve ty poškozené atomy ničí nás.

Když částice radioaktivního záření narazí do atomu, zpravidla to má za následek odtržení několika elektronů. Normální atom je elektricky neutrální. Když mu vezmete elektrony, získá kladný náboj – pak se mu říká iont, konkrétněji kationt. (Ano, kationt je kladný iont, přestože katoda, jak jste si jistě před chvílí všimli, je záporně nabitá elektroda. Všechna tahle terminologie vznikla dřív, než se o atomech začalo uvažovat dostatečně systematicky. Logika názvu je taková, že kationt je ten iont, který se v roztoku pohybuje směrem ke katodě. Není to šťastné, stejně jako není šťastné, že náboj elektronu byl konvenčně stanoven jako záporný, ale nic s tím už nenaděláme.)

Ionizované atomy působí ve složitých molekulách tvořících naše organismy jako střepiny skla. Řezou je a jinak poškozují. Akutní účinky nemoci z ozáření se zpravidla projeví jako selhání imunitního systému, dlouhodobé – u těch, kdo akutní fázi přežijí – vedou ke vzniku nádorů a k poškození pohlavních buněk. Z týchž důvodů se ionizující záření používá v lékařství při léčbě rakoviny. V onkologii se vždy řeší dilema, jak zabít nádor a zároveň nezabít pacienta: chemoterapeutika jsou vesměs jedy a radiační léčba funguje podobně, jen se dá lépe zacílit – zářič se přiloží tam, kde se nádor nachází.

Částice alfa mají silnější ionizující účinek než beta a ty zase než gama. Zároveň se však dají snadno odstínit. Nejsou proto příliš nebezpečné, působí-li na nás zvenčí. Zastaví je naše oblečení a přinejhorším i pokožka. Jiná věc je, když polkneme nebo vdechneme radioaktivní materiál. Pak jsou nejnebezpečnější právě zářiče emitující paprsky alfa.

Čtyři a půl je příliš mnoho

Účinek radiace na lidský organismus se měří v jednotkách zvaných sievert. Občas se setkáte i se starší jednotkou rem: 1 rem = 0,01 Sv. Počet sievertů je přímo úměrný energii záření a nepřímo úměrný hmotnosti absorbujícího tělesa, což se celé ještě násobí koeficientem, který vyjadřuje účinek toho kterého druhu radiace na lidské tělo. Tím pádem se nemusíme starat o druh záření. Počet sievertů v každém případě udává jeho nebezpečnost. smrtelnost.

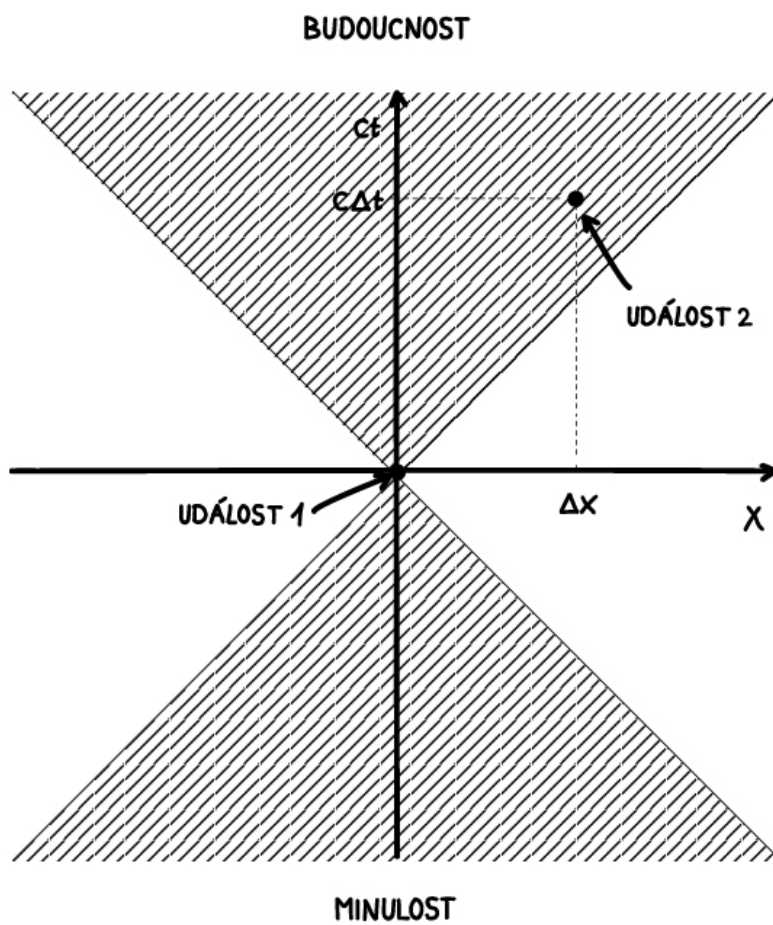
Hodnotou k zapamatování je 4,5 Sv. To je tzv. dávka LD 50/30, kterážto zkratka říká, že vás zabije (LD = lethal dose) s padesátiprocentní pravděpodobností do třiceti dnů. Rentgenové vyšetření u zubaře vás obdaří dávkou 5 až 10 mikrosievertů (mikro- znamená miliontina), CT vyšetření celého těla, což je (kromě onkologické radioterapie) to nejsilnější, co vám může ušetřit medicína, odpovídá 0,01 až 0,03 Sv. Astronaut na Mezinárodní vesmírné stanici za půlroční pobyt dostane do těla 0,08 Sv. Zhruba stejnou dávku dostali lidé z obcí nejbližších fukušimské elektrárně, než byli evakuováni.

K měření slouží přístroje zvané dozimetry. Na displeji zpravidla ukazují počet milisievertů za hodinu – když zůstanete půl hodiny na místě, kde dozimetr ukazuje 500, dostanete dávku 0,25 Sv.

Zdravotní účinky radioaktivity představují velice složitou problematiku. S vysokou dávkou – od několika Sv výše – to je celkem jednoduché: prostě brzy umřete, čím vyšší dávka, tím lépe, protože se nebudete trápit dlouho. Nižší dávky nezabíjejí hned. Buď se brzy zotavíte, nebo ani nepocítíte potíže. Vzroste však pravděpodobnost, že předčasně zemřete na rakovinu. Jelikož nikdo neví, jakou vyhlídku jste na to měli předtím, špatně se vyčísluje i počet smrtí skutečně způsobených například Černobylem. Problém je však v tom, že i malé zvýšení pravděpodobnosti rakoviny v hustě zalidněných oblastech může znamenat smrt mnoha lidí. Proto se taková rizika berou vážně, přinejmenším v zemích, jež pokládají život a zdraví svých občanů za cennou hodnotu. Ještě stojí za zmínku, že radioaktivita není nakažlivá – v blízkosti ozářené osoby či věci nic neriskujete, s výjimkou situace (ovšem dost běžné), že na sobě má radioaktivní prach, který se na vás může přenést. (Druhou možností, značně exotickou, je to, že předmět byl velmi intenzivně ozářen neutrony, ale to by bylo složitější povídání.)

Relativita

Rychlost světla ve vakuu je za všech okolností neměnná. Čtyřrozměrný prostorčas je zprohýbaný, jeho nerovnosti se nám jeví jako gravitace.



Roku 1905 bylo Albertu Einsteinovi dvacet šest let, pracoval v Bernu na patentovém úřadu a publikoval tři vědecké články. Za jeden z nich dostal později Nobelovu cenu (viz [KVANTUM](#)), ve druhém předvedl jednoduchý způsob, jak se názorně přesvědčit, že atomy a molekuly jsou reálné hmotné objekty, což tehdy ještě nebylo jisté. Tomu třetímu, nazvanému O elektrodynamice pohybujících se těles, se dnes říká speciální teorie relativity.

Pochopit základní tvrzení teorie relativity – jak speciální, tak pozdější obecné – není vůbec těžké. Těžké je pochopit, jak na to Einstein přišel. Teorie relativity představuje skok v myšlení, pohled odjinud, z naprosto ne-lidské perspektivy. Jelikož víme celkem bezpečně, že Einstein nebyl mimozemšťan (viz [EINSTEIN](#)), nezbyvá než uznat, že čas od času se vyskytnou géniové mimořádné kategorie, lidé s extrémně silnou schopností prokouknout svět, jaký se jeví, a spatřit kousek z toho, jaký opravdu je. V tomto smyslu byli největšími fyziky všech dob právě Newton a Einstein.

Neměnná rychlost světla

Z mnoha alternativních způsobů, jak stručně popsat speciální teorii relativity, bych jako snadný a užitečný navrhol následující: Existuje jeden velmi zásadní fakt. Spočívá v tom, že [světlo ve vakuu](#) se šíří vždy a vůči všemu přesně stejnou rychlostí. Tato rychlost je mezní, nic se rychleji pohybovat nemůže. Příroda se tohoto faktu drží tak tvrdohlavě, že kdykoli je potřeba přizpůsobit cokoli, aby se neměnnost rychlosti světla zachovala, udělá to. Skutečnost, že takové změny mohou být v rozporu se vším, co jsme až dosud o světě věděli, je bezvýznamná. To je vše.

Sci-fi příběhům se podařilo speciální teorii relativity dost zpopularizovat, takže jeden z jejích důsledků je dobře znám. Říká se mu paradox dvojčat. Mějme dvojčata, z nichž jedno je astronautem. Jeho kosmická loď odletí k nejbližší hvězdě (což je Proxima Centauri, vzdálená zhruba 4 světelné roky) a poté se vrátí zpět. Loď poletí rychlostí $0,8c$, tedy čtyřmi pětina rychlosti světla, což znamená, že cesta tam jí bude trvat pět let, cesta zpět také pět let. Dvojče na Zemi tudíž do bratrova návratu zestárne o deset let.

V kosmické lodi však čas běží pomaleji. Pomocí tzv. Lorentzovy transformace (nebo Lorentz-FitzGeraldovy, jak se jí říká moderněji) lze spočítat, že dvojče v kosmické lodi [zestárne jen o šest let](#). Kdyby loď letěla rychleji, byl by rozdíl ještě výraznější. Co je podstatné, obě dvojčata jsou přesvědčena, že jejich čas je ten správný. Subjektivně vnímala jeho plynutí stejně, astronaut neviděl žádný zpomalený pohyb hodinových ručiček apod.

Tahle divná věc se děje právě proto, že rychlost světla musí zůstat neměnná vůči všemu, tedy i vůči rychle letící kosmické lodi. V našem běžném světě zdravého rozumu se rychlosti jednoduše sčítají. Představte

si silnici rovnoběžnou s železniční tratí. Po té [jede vlak](#) rychlostí 100 km/h. Po silnici jede auto stejným směrem jako vlak rychlostí 90 km/h. Vlak bude auto zvolna předjíždět – rychlostí 10 km/h, protože $100 - 90 = 10$. Když vlak potká jiné auto, které jede opačným směrem, prosvíští kolem něj vzájemnou rychlostí 190 km/h.

Kdyby se světlo chovalo stejně, dala by se tahle situace přenést do vesmíru. Rovnoběžně letící sluneční paprsek by naši kosmickou loď minul rychlostí $0,2c$ (paprsek má rychlost c , loď $0,8c$). Kdyby přilétal z opačné strany, byla by vzájemná rychlost $1,8c$. Jenže právě to se nestane.

Rychlost světla je stejná vždy a vůči všemu, kdyby se kvůli tomu měl vesmír postavit na hlavu.

Což víceméně udělá: aby mohla být neměnná rychlost světla vůči rychlé kosmické lodi zachována, zpomalí se na lodi čas, aniž by to astronauti vnímali. Z jejich pohledu běží hodiny stále stejnou rychlostí. Z pohledu Země však ne. Během minuty pozemského času uběhne na kosmické lodi jen 36 sekund. (To platí v případě rychlosti $0,8c$. Při desetině rychlosti světla by to bylo 57,9 s, při polovině rychlosti světa 52 s. Relativistické efekty se začnou výrazně projevovat, až když jsme rychlosti světla hodně blízko. Kdybychom letěli 99 % rychlosti světla, uplynulo by během pozemské minuty na kosmické lodi jen 8,5 sekundy.)

Když vám běží čas pomaleji, věci okolo vás se jakoby (relativně vůči vám) zrychlí. Zpomalení času na pohybující se kosmické lodi je vždy právě tak velké, aby rovnoběžně letící světelný paprsek měl vůči lodi svou stálou rychlost c .

Osm minut před koncem světa

Co by se stalo, kdyby Slunce náhle přestalo existovat? (Pomiňme, že to je nesmysl. Jde o takzvaný myšlenkový experiment. Pro Einsteina šlo o základní způsob, jak přijít na nové věci. A představme si raději „zmizelo“ než „přestalo existovat“, to druhé sugeruje výbuch nebo něco na ten způsob a ten by sice byl ničivý, ale neměl by efekt, který potřebujeme – hmota Slunce by se sice přemístila jinam, ale nezmizela by. Země by dál obíhala kolem těžiště pozůstatků Slunce, dokud by neshořela, což by jistě dlouho netrvalo.)

Odpověď by měla být jednoduchá. Planety by přestaly být přitahovány k hvězdě a pokračovaly by proto v pohybu po přímce. (Z perspektivy lidstva nic moc.) Zajímavá otázka ovšem je, kdy by se dráha planet změnila do podoby přímky. Okamžitě, nebo až za chvíli? A byla by ta chvíle u všech planet stejná?

Speciální teorie relativity trvá velmi pevně na tom, že nic se nemůže pohybovat větší rychlostí než mezní, tedy rychlostí světla. Ani informace ne. Je-li to pravda, pak se Země nemůže „dozvědět“ o odstranění Slunce dřív než za osm minut, což je doba, jakou potřebuje světlo k překonání těch 150 milionů kilometrů, jež nás od naší hvězdy dělí

A teď mi řekněte, zeptal se sám sebe Einstein, co bude držet Zemi na oběžné dráze těch osm minut, kdy Slunce už je pryč?

Fyzika na počátku dvacátého století na tohle neměla vůbec žádnou odpověď. O rychlosti šíření gravitace – pokud se nad ní vůbec někdo zamyslel – se mlčky předpokládalo, že je nekonečná. Speciální teorie relativity tuto odpověď škrtnla, aniž však nabídla jinou.

Když něco pokazíš, měl bys to napravit. Einsteinovi ta náprava trvala deset let – ne že by po tu dobu nedělal nic jiného, ale jeho hlavní starostí skutečně bylo škrtnout ze speciální teorie relativity ono slovo speciální, které vyjadřuje, že teorie relativity neplatí pro všechny případy a systémy. Přesně vzato, platí v nepřítomnosti gravitace.

To není zas tak velké omezení, jak by se zdálo na první pohled, protože – navzdory naší každodenní zkušenosti – ve vesmíru je gravitace málo a je velice slabá. Ať jste ve vesmíru skoro kdekoli, gravitaci můžete zanedbat. Neplatí to jen v blízkosti velkých těles, jako jsou planety a hvězdy, ale těch je v porovnání s obrovským prázdným prostorem málo. A dokonce i tady na povrchu planety se dá v mnoha fyzikálních úvahách gravitace zanedbat, když ji porovnáme s mnohem silnějším působením elektromagnetického pole a jaderných interakcí.

Jenže vesmír jako celek, a zejména jeho vznik, se bez gravitace vysvětlit nedá.

Obecná relativita

Einstein započal své úvahy o gravitaci nikoli matematicky – což je postup, který by tehdy zvolilo devět z deseti fyziků, dnes devadesát devět ze sta – ale intuicí, tedy myšlenkovým pokusem stejného typu, jako když předtím uhodl, že rychlost světla je za všech okolností konstantní a vesmír se tomu musí chtít nechtě přizpůsobit.

Newton měl jablko padající ze stromu. Einstein si představil padající výtah. Sám pak mluvil o nejšťastnější myšlence svého života, kterou formuloval takto: „Uvědomil jsem si, že jestliže člověk padá volným pádem, necítí svou váhu.“

Hm. To nevypadá jako velká senzace, že ne?

Představme si výtah – i když pád výtahu není zrovna příjemná představa. Ve výtahu, který je v klidu, na vás působí síla odpovídající vaší tíze: $F = m \cdot g$, kde m je vaše hmotnost a g tíhové zrychlení (viz [GRAVITACE](#)). Ve výtahu rozjíždějícím se nahoru se zrychlením a vás bude do podlahy tlačit o něco větší síla: $F = m \cdot g + m \cdot a$. Když se výtah bude rozjíždět dolů, budete si naopak připadat lehčí než normálně: $F = m \cdot g - m \cdot a$. Nu, a pád výtahu je totéž jako jeho rozjezd dolů se zrychlením stejným jako tíhové: $F = m \cdot g - m \cdot g = 0$ neboli stav beztlíže. Co padá, to je ve stavu beztlíže.

Účinek gravitace a zrychlení je tedy vzájemně zaměnitelný. To je užitečný postřeh, protože umožňuje namísto mlhavě definovaného pojmu používat pojem dobře známý, matematicky a fyzikálně jasně definovaný: zrychlení je změna rychlosti v čase. Tím se otevřela cesta, jak zařadit gravitaci do speciální teorie relativity. Byla dlouhá, dlážděná stále obtížnější matematikou a směřovala k matematickému modelu celého vesmíru.

Hyperbolický prostoročas

K pozapomenutým aktérům teorie relativity patří Einsteinův starší kolega a učitel Hermann Minkowski. Pocházel z Kaunasu v dnešní Litvě, vystudoval a nějakou dobu působil v Königsbergu ve Východním Prusku (dnes ruské město Kaliningrad). Pak přesídlil do Švýcarska, kde v Curychu na ETH učil právě Einsteina. Bohužel předčasně zemřel, jinak by se na rozvoji teorie relativity patrně podepsal výrazněji.

Ke třem prostorovým rozměrům přidal Minkowski čtvrtou osu, na níž se vynáší čas (kvůli konzistenci jednotek vynásobený rychlostí). To je prostoročas, dosud nejlepší a stále používaný matematický model fyzikálního světa.

Existence každého objektu se dá popsat jako pohyb prostoročasem (viz [METRIKA](#)). Když těleso setrvává v klidu, pak se posouvá jen podél časové osy. Když se pohybuje prostorem, pak se posouvá obecně kolem všech čtyř os. Čím je pohyb prostorem rychlejší, tím menší podíl posunu připadá na časovou osu. Když jde o rovnoměrný pohyb (tj. stálou rychlostí), pak zakreslíme do prostoročasu dráhu tělesa jako přímku. Pro všechny souřadné soustavy je pak konstantní vzdálenost dvou událostí v prostoročase, zatímco samotná prostorová či samotná časová složka ne. Nejvyšší možné rychlosti, tedy rychlosti světla, odpovídá přímka s nějakým konkrétním sklonem. S jakým, o tom rozhoduje volba měřítek na osách. Když je zvolíme tak, aby rychlost světla byla rovna jedné – což se dá zařídit třeba tak, že čas měříme v rocích a vzdálenost ve světelných rocích – pak má tato mezní přímka sklon 45 stupňů.

Stejného efektu lze dosáhnout jakoukoli jinou volbou jednotek, kde je splněna podmínka, že světlo uletí jednu délkovou jednotku za jednu časovou jednotku. Hodí se např. nanosekundy a délkové úsečky 30 cm.

Zakřivený prostor

Einstein si uvědomil, že Minkowského prostoročas je homogenní – tedy všude stejný. Ale co kdyby nebyl? Co kdyby měl strukturu, byl zprohýbaný?

Pak by některá jeho místa působila jako důlek, do kterého může zapadnout pohybující se kulička, když není dost rychlá nebo je příliš blízko. Lokální zakřivení prostoru by vedlo ke změně pohybu těles prostoročasem. Projevovalo by se tedy úplně stejně jako gravitace. A když se něco projevuje úplně stejně...

... pak to je možná totéž. Zbývalo to ovšem matematicky podložit a zpřesnit, což byla další těžká práce. Skončila roku 1915, kdy šestatřicetiletý Albert Einstein publikoval své vrcholné dílo, nejlepší teorii gravitace, jakou dodnes máme. Podle této teorie lokální zakřivení prostoročasu odpovídá množství hmoty a energie, která se tam nachází. (Zdůrazňuji: prostoročasu, nikoli jen prostoru. V blízkosti velmi hmotných těles se nejen zakřivuje prostor, ale také zpomaluje čas.)

To je ovšem zjednodušená formulace; tzv. polní rovnice gravitace, matematické jádro obecné teorie relativity, obsahuje čtyři členy, z nichž každý je komplikovaným popisem nějakého příspěvku k výsledné celkové gravitaci. Na té se nepodílí jen hmotnost a energie tělesa, ale i subtilnější a hůře popsatelné vlivy.

Einstein tedy na první pohled zcela odstranil gravitaci jako sílu, převedl ji na geometrii. Ve skutečnosti tomu tak ale není, protože geometrie prostoročasu není statická. Neustále se mění. Proto musí existovat mechanismus přenosu těchto změn z místa na místo.

Obecná teorie relativity předpovídá existenci gravitačních vln šířících se rychlostí světla. Ty by měly být pozorovatelným jevem a změřit je by znamenalo obecnou teorii relativity experimentálně potvrdit.

Naštěstí to nebyl jediný způsob, jak provést ověřující experiment, jinak by se Einstein experimentálního důkazu nedožil. Měření gravitačních vln se ukázalo být velice obtížným úkolem (viz [GRAVITACE](#)). Mnohem dříve, už roku 1919, uspěla jednodušší metoda.

Jestliže gravitace zakřivuje prostor, pak musí působit i na světelný paprsek. Projde-li paprsek kolem velmi hmotného tělesa, například hvězdy, odchýlí se z přímé dráhy. Velikost výchylky lze změřit a porovnat s teoretickou předpovědí.

V principu to je poměrně prosté, v praxi méně – především proto, že jedinou hvězdou, kterou máme pro ten účel po ruce, je Slunce a světelný paprsek ze vzdáleného slabšího zdroje procházející blízko Slunce jednoduše není vidět. S výjimkou jediné situace – zatmění Slunce.

Během první světové války nebylo na takové experimenty ani pomyšlení. Za prvním poválečným zatměním vyrazily dvě týmy. Oba se při měřeních potýkaly s potížemi a vyhodnocení dat bylo komplikované. Donedávna se mělo za to, že vedoucí britské výpravy (ta druhá byla francouzská) Arthur Eddington, velký příznivec a propagátor Einsteina, vyřešil situaci bouchnutím do stolu a účelovým výběrem dat (viz [P-HODNOTA](#)). Moderní přeměření tehdejších fotografických desek však Eddingtona očistilo, jeho výprava skutečně pořídila důkaz obecné teorie relativity. Ta byla od té doby potvrzena i mnoha jinými způsoby.

Řada

Nekonečný počet čísel může mít konečný součet.



Želva, nejpomalejší ze všech tvorů, vyzve k běžeckému závodu Achilla, udatného reka. (Ve skutečnosti nevyzve, do soutěžení je oba vmanipuluje zlomyslný Zénón, jak to jasně vysvětlil [Douglas Hofstadter ve své knize Gödel, Escher, Bach](#). Ale pomeňme to.) Achillés, jsa rekem nejen udatným, ale i velkorysým, dá želvě náskok. Zénón mu však (a spolu s ním žasnoucím kruhu posluchačů) ještě před startem vysvětlí, že si nepočíná moudře, [protože takový závod nevyhraje](#).

Jak to Zénón zdůvodnil? Dejme tomu, že Achillés běží rychlostí 10 m/s, želva desetkrát pomaleji, tedy 1 m/s. Želva dostane náskok 100 metrů. Po deseti vteřinách běhu je Achilles na značce 100 m, tedy v místě, odkud startovala želva. Ta je v tu chvíli na 110 metrech. Během další sekundy uběhne Achillés deset metrů, želva je zas o metr dál. Achillés uběhne tento metr, ale želva se mezitím posunula o desetinu metru. Achillés desetinu, želva setinu... to zvíře si pořád zachovává náskok, sice stále menší, ale náskok! A protože vzdálenost můžete takto dělit do nekonečna, Achillés nikdy nedohoní želvu. Tedy podle Zénóna. Zdrčený Achillés odmítá nastoupit na start, želva vítězí kontumačně.

Zénónův paradox není těžké rozlousknout – pravda, pokud k tomu máte matematické nářadí pocházející alespoň ze sedmnáctého století. Což Řekové pochopitelně neměli.

Moderní odpověď může vypadat například takhle: rozebereme si průběh závodu velmi pečlivě. Všechno podstatné se odehraje v jedenácté a dvanácté sekundě. Podívejte, jak se zkracujícími se časovými intervaly klesá želvin náskok:

100 metrů ■ v čase 0 s
10 metrů ■ v čase 10 s
1 metr ■ v čase 11 s
0,1 m ■ v čase 11,1 s
0,01 m ■ v čase 11,11 s
0,001 m ■ v čase 11,111 s
0,0001 m ■ v čase 11,1111 s

a tak dále donekonečna – ano, do nekonečna, protože to je základ Zénónova argumentu.

Dalo by se spočítat, jaký náskok bude tedy želva mít po nekonečném počtu stále menších kroků, jimiž se ji Achillés snaží dohnat? Zkusme ty dílčí náskoky sečíst:

$$100 + 10 + 1 + 0,1 + 0,01 + 0,001 + 0,0001 + \dots = ???$$

Teď jsme v přesně v bodě, přes nějž se Řekové nedostali. Nevěděli, jak sečíst nekonečný počet čísel (schovaný v těch třech tečkách naznačujících, že součet pokračuje dál a dál). Patrně se domnívali – a při jejich možnostech to byla rozumná domněnka – že součet nekonečného množství čísel musí být nekonečný. Dnes víme, že někdy to je pravda a někdy ne (a umíme skoro vždy poznat, který případ je který).

Pomůžeme si učebnicovým trikem. Součet, k němuž se chceme dopracovat, označíme velkým S:

$$S = 100 + 10 + 1 + 0,1 + 0,01 + 0,001 + 0,0001 + \dots$$

Tuhle rovnici rozšíříme deseti, tj. vynásobíme tímto číslem její obě strany, což je aritmeticky povolená úprava, která na platnosti rovnice nic nezmění:

$$10S = 1000 + 100 + 10 + 1 + 0,1 + 0,01 + 0,001 + \dots$$

A teď si všimněte, že až na tu tisícovku navíc se nám na pravé straně nové rovnice přesně opakuje původní součet ze staré rovnice. To ovšem znamená, že místo něj můžeme napsat S: $10S = 1000 + S$. Takže $9S = 1000$ a $S = 1000/9 = 111 \frac{1}{9}$ metru, a to je bod na dráze, v němž Achillés dohoní želvu.

Součtu, jako je tenhle, se říká geometrická řada. Vyznačuje se tím, že dva po sobě jdoucí členy mají stálý poměr – v tomto případě je jím 0,1. Bývá zvykem tento poměr označovat písmenem q (jako kvocient) a platí obecný vzorec:

$$S = a_1 / 1 - q$$

Platí však jen tehdy, když hodnota q je mezi -1 a 1, přičemž jedničky jsou už zakázány. Matematictěji řečeno: když absolutní hodnota q je menší než jedna:

$$|q| < 1$$

Geometrické řady jsou jen jedním z mnoha možných typů nekonečných řad. S většinou dalších si tak snadno neporadíme. Tak třeba

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots$$

se sečíst nedá. Každý její člen je menší než předchozí, mohlo by se tedy zdát, že také musí mít konečný součet, jenže nemá. Téhle řadě se říká harmonická a už ve čtrnáctém století dokázal Nicolae Oresme, že roste nade všechny meze. Správný technický termín zní: diverguje.

Termín, který člověku přijde spontánně na jazyk, ale vyhazuje se za něj od zkoušky, zní: součtem harmonické řady je nekonečno. Vyhazuje se za něj proto, že nekonečno, jak znovu zdůrazňuji, není číslo. A když něco není číslo, nemůže to být součtem čísel, stejně jako tím součtem nemůže být plaňkový plot nebo Venuše.

Zábavné a trochu děsivé je, jak pomalu se k nekonečnu harmonická řada plazí. Keith Devlin v Jazyce matematiky uvádí (byl jsem líný to přepočítávat), že součtem prvního bilionu jejích členů je přibližně 28.

Nekonečno (viz [samostatné heslo](#)) prostě může vypadat všelijak.

Schrödinger a kočka

Podle kodaňské interpretace vzniká fyzikální realita aktem pozorování.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} | \text{cat} \rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} | \text{dog} \rangle$$

Pro citlivější povahy nejprve zdůrazněme, že za celou dobu hrátek se Schrödingerovou kočkou nedošlo újmy ani jedno zvíře. O duševní pohodě zúčastněných vědců se to tvrdit nedá, o vztazích mezi nimi také ne.

Slavná Schrödingerova hádanka vypadá takto: vezmete kočku a zavřete ji do neprodyšné krabice. (Tato část pokusu by při reálném provedení byla ze všech nejtěžší. Ale nezapomeňte, je to všechno jen jako.) Vedle krabice je kus radioaktivní látky vybraný tak, že pravděpodobnost rozpadu jednoho jediného atomu během půl hodiny se rovná jedné polovině. (Obtížné, ale lze skutečně zařídit.) Rozpad atomu hlídá citlivý detektor. (Lze zařídit.) Detektor je spojen s nějakým mechanickým zařízením. Když se atom rozpadne a detektor to zachytí, zařízení vpustí do krabice jedovatý plyn. (Lze zařídit snadno.) Krabici otevřete přesně po půlhodině. Mohou nastat dva výsledky, oba se stejnou pravděpodobností. (Tu stejnou pravděpodobnost jsme zařídili tím, že stejná je pravděpodobnost rozpadu atomu.) Kočka je buď mrtvá; anebo je živá (a velmi nespokojená).

Nic složitějšího v tom není. Jediné, co je vám nejspíš nejasné, je otázka: kde je v tom jaký paradox? Žádný není vidět.

Paradox, přinejmenším z hlediska kvantových fyziků, spočívá v tom, co je s kočkou, dokud je zavřená v krabici. Podle kodaňské interpretace kvantové mechaniky není po tu dobu ani živá, ani mrtvá, ale [v superpozici stavů](#) živá/mrtvá.

Jak se to dělá v Kodani

Kodaňskou interpretaci vymysleli zejména Niels Bohr a Werner Heisenberg jako odpověď na námitku, že kvantová mechanika je v rozporu se zdravým rozumem. A je to ten typ odpovědi, který námitku nevyvrací, ale říká vám, že se takhle vůbec nemáte ptát.

Vznikla spojením myšlenek „klukovských fyziků“ Heisenberga, de Broglieho a Pauliho (viz [KVANTUM](#) a [HEISENBERGŮV PRINCIP NEURČITOSTI](#)), Schrödingerovy rovnice a pravděpodobnostních vln Maxe Borny (tamtéž) s autoritou a kouzlem osobnosti Nielse Bohra.

Dnes je kodaňská interpretace přijímána se stále většími rozpaky. Přezdívá se jí „drž hubu a počítej“, tedy – nelam si hlavu s názornou představou. Pořád by ještě mezi fyziky vyhrála hlasování o nepříjemnější výklad toho, jak to chodí v mikrosvětě, avšak se stále menším náskokem a stále většími rozpaky. Einstein ji nepřijal nikdy, Schrödinger taky ne, právě proto si ostatně vymyslel tu kočku.

Podle kodaňské interpretace jsou kvantové jevy pravděpodobnostní, nikoli deterministické. Elektron se nenachází v danou chvíli na konkrétním místě. Smíme mluvit jen o tom, že pravděpodobnost jeho výskytu není rovnoměrná, tady je větší a tady zas menší. Je v superpozici stavů, tedy jakoby na mnoha místech najednou.

Ted' už by mělo být jasné, v čem je problém s kočkou. Schrödinger to důmyslně zařídil tak, že se „normální“ objekt stal součástí kvantového systému. Je-li v superpozici stavů elektron či atom, pak v ní musí být i kočka, což je [zjevně absurdní](#). K vysvětlení chování makroskopických objektů, mezi něž kočky patří, žádnou superpozici a pravděpodobnost nepotřebujeme.

Superpozici nikdy nevidíme. Uvidíme kočku buď živou, nebo mrtvou, atom rozpadlý, nebo nerozpadlý. Podle kodaňské interpretace je to akt pozorování, co mění pravděpodobnost na jistotu. Pozorováním vzniká realita.

Čím to ale chcete vyvrátit?

Že je podkladem našeho světa, samotným dnem reality, pravděpodobnost a neurčitost, s tím se nějak smířit dá. Že je jím však akt pozorování, to vypadá opravdu šíleně. „Jakého pozorování?“ [ptá se rétoricky fyzik Nicolas Gisin](#), citovaný v časopise New Scientist. „Kdo je pozorovatel? Já, nejspíš. Schrödingerova kočka, možná. Je pozorovatelem komár?“ Pozorovatelem ve smyslu kodaňské interpretace nejspíš musí být někdo obdařený vědomím. Tedy člověk. (Anebo jen schopností vnímat realitu? Tu má v různé míře kočka, komár i bakterie.)

Takový obrázek světa není jen zneklidňující; především působí dojmem, že je nedomyšlený, nesmyslný.

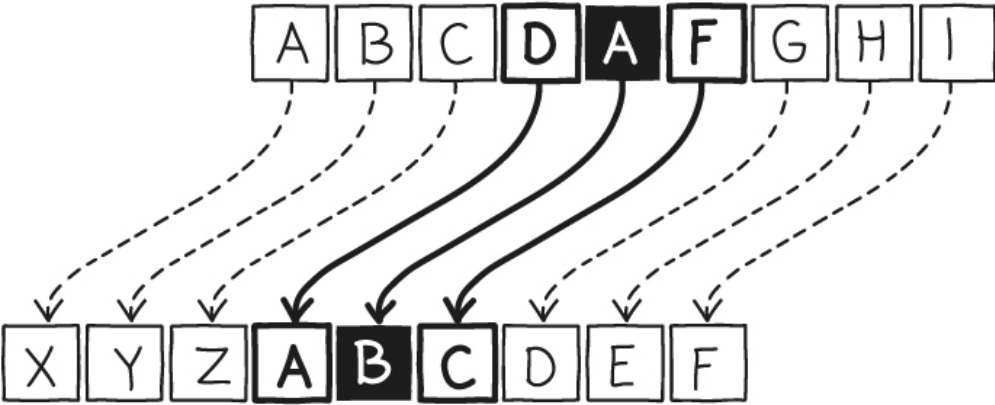
Ke kodaňské interpretaci existují alternativy, ale žádná z nich není uspokojivá. Nejznámější z nich je teorie mnoha světů. Říká, že každé kvantové měření rozvětňuje realitu, že vedle sebe existuje nezměrné množství paralelních světů, navzájem nepozorovatelných a nedosažitelných.

Někteří současní fyzici pokračují v Schrödingerově tradici. Vymýšlejí stále důmyslnější myšlenkové experimenty, jež mají tak či onak zdiskreditovat kodaňskou interpretaci – například tím, že do původního schématu zamontují další pozorovatele, kteří získají částečnou informaci o stavu kočky. Tím se však sami stanou součástí kvantového systému a paradox se neřeší, jen se rozšiřuje. Vypadá absurdněji, to ano, ale k vyvrácení pravděpodobnostní interpretace to nestačí. Máme se skutečně smířit s tím, že když změříme cokoli na kvantové úrovni, změníme realitu? Zakládá to výsadní postavení lidí jako jediných známých bytostí obdařených vědomím? Ale to je přece už čirá mystika, namítá mnoho fyziků a jejich pocity jsou zcela pochopitelné.

Erwin Schrödinger se po válce strašlivě rozhádal se svým dlouholetým přítelem Albertem Einsteinem. Dokonce chtěli jeden druhého žalovat kvůli plagiátorství, což jim společní známí jen tak tak rozmluvili. S kočkou to nemělo nic společného. Ve starším věku se Schrödinger zajímal o psychologii, hinduismus, dědičnost a o fyziku, ovšem výhradně o tu z dob svého mládí.

Šifra

Jinak než technickými prostředky si soukromí nechráníme. Jimi samotnými však také ne.



Svět elektronické komunikace se navždy změnil roku 1976, kdy profesor Martin Hellman a jeho doktorandi Whitfield Diffie a Ralph Merkle na Stanfordově univerzitě vymysleli princip asymetrické kryptografie. Vyřešili tím problém, který do té doby stál v cestě praktickému využití šifer v počítačových aplikacích: distribuci klíčů.

Základními pojmy každého šifrování jsou otevřený text, šifrový text a klíč. Zašifrovat zprávu znamená převést otevřený text na šifrový, při dešifrování je tomu opačně. V obou případech potřebujeme klíč – informaci o způsobu šifrování.

Snad nejjednodušší myslitelná šifra, transpoziční neboli Caesarova, spočívá v abecedním posunu písmen zprávy. Otevřený text ÚTOK převedeme na šifrový text XWRN, klíčem je číslo +3, protože o tolik písmen jsme text posunuli. (Tato šifra je pochopitelně v praxi k ničemu, dá se vyluštit z paměti.) Klíč je jediný, společný pro odesilatele a příjemce, proto se této skupině šifer říká symetrické. Postupně se vyvíjely od naivních po velmi pokročilé. K těm druhým patřila slavná německá Enigma, pokládaná ve své době (mylně) za neprolomitelnou. Do téže skupiny spadá skupina široce používaných algoritmů DES, původně vyvinutých v IBM.

Odesílatel volí klíč, příjemce jej musí nějak získat. To je poměrně jednoduché, dokud je šifrované komunikace málo. Agentovi v cizí zemi doveze klíč kurýr nebo se předem dohodne, které klíče se budou používat který den – pravidelná obměna klíčů je totiž nezbytná, jinak nepřítel dříve či později šifru vyluští. Jenže jak doručit klíč, jde-li třeba o elektronické spojení s bankou?

Alice, Bob a dva visací zámky

Představte si Alici a Boba. To jsou jména, kterými si kryptologové tradičně pomáhají, aby nemuseli pořád psát „odesílatel“ a „příjemce“. Občas se mezi ně plete ještě Eva (evíl = zlo), která je odposlouchává. Alice a Bob žijí v zemi, kde se poště nedá věřit. Jak si pošlou tajnou zprávu?

Jednou z možností je skříňka s dvěma petlicemi na visací zámky. Alice vloží dovnitř zprávu, zamkne skříňku svým klíčem a pošle Bobovi. Bob skříňku otevřít nemůže, vždyť Alicin klíč nemá. Udělá však něco jiného. Zamkne druhou petlici svým zámkem a pošle skříňku zpět. Alice odemkne a sundá svůj zámek a pošle skříňku opět Bobovi. Ten odemkne svůj zámek a je hotovo. Zdlouhavé, ale bezpečné.

Schéma se dá vylepšit. Bob předem pošle Alici svůj visací zámek – odemčený. Alice jím zamkne skříňku a pošle ji Bobovi. Ten ji svým klíčem odemkne. Tento postup si zapamatujte. Odemčenému zámku budeme říkat veřejný klíč, klíčku od něj, který má Bob v kapse, budeme říkat soukromý klíč.

Což je přesně to, co vymysleli Hellman, Diffie a Merkle. Rozdělili šifrovací klíč na dvě části. Veřejný klíč může být volně k dispozici komukoli. Klidně i Evě. Sám o sobě jí bude k ničemu. Soukromý klíč mám naopak u sebe a nikomu jej nikdy nezasílám.

Chcete-li mi poslat zprávu, zašifrujete ji mým veřejným klíčem a já ji rozluštím pomocí soukromého. Až vám budu odepisovat, udělám to stejně: zašifruji vašim veřejným klíčem, vy dešifrujete svým soukromým.

Vysoká hra prvočísel

Aby to fungovalo, je zapotřebí zajistit dvě věci. Soukromý a veřejný klíč do sebe musí zapadat, tvořit celek. A šifrovací metoda musí být mimořádně odolná proti nepřátelské analýze. Obého se dosáhlo použitím takzvaných jednosměrných matematických funkcí. Těch je k dispozici víc, v tomto konkrétním případě se jedná o faktorizaci velkých čísel.

Jednosměrné funkce jsou takové, které lze snadno spočítat v jednom směru, ale udělat opačnou operaci je tak obtížné, že to hraničí s nemožností. Jde o matematický ekvivalent omelety: snadno ji připravíte, ale udělat z ní zpátky vejce nejde.

Faktorizovat číslo znamená rozložit ho na součin prvočísel. Spočítat, že $157 \times 163 = 25\,591$, jde velmi snadno. Zjistit, na která prvočísla se rozloží 25 591, jde naopak jen tím způsobem, že zkusíme postupně dělitelnost. Dvěma? Ne, je liché. Třemi? Ne. Pěti? Ne. Sedmi? Ne... a tak dále, až dojdeme k číslu 157, což je 36. prvočíslu v pořadí.

A to je princip asymetrické kryptografie, jen se pracuje s většími čísly. Minimální doporučená délka klíče pro asymetrickou šifru popsaného typu dnes činí 1024 bitů, což odpovídá 300 číslicím v běžném desítkovém vyjádření (na rozdíl od pěticiferného čísla v našem příkladu).

Tři chytrí mladíci z MIT

Autoři asymetrické kryptografie byli matematici. Zabývali se principem, nikoli použitelným počítačovým kódem. Do praktické podoby převedli jejich myšlenku o dva roky později jiní tři vědci, Ron Rivest, Adi Shamir a Leonard Adleman, všichni z MIT v Bostonu. Podle jejich jmen se výsledný algoritmus jmenuje RSA.

Pro asymetrickou kryptografii jako celek se dnes běžněji používá název kryptografie s veřejným klíčem (PKI, public key infrastructure). Ve struktuře PKI jsou skryta dvě úskalí. První z nich spočívá v tom, že i pro dnešní výkonné počítače jsou příslušné algoritmy velmi náročné. Asymetrická šifra se proto používá hlavně tam, kde je objem přenášených dat malý, zejména pro elektronický podpis.

Slouží také k zasílání klíčů pro běžnou symetrickou šifru, tj. takovou, kde je klíč jen jeden, společný odesilateli a příjemci. Symetrickou šifrou se pak zašifruje celý text zprávy, což je výpočetně mnohem méně náročné, tedy rychlejší.

Druhá obtíž s PKI spočívá v tom, že její užitečnost stojí a padá s důvěrou v klíče. Když Bob pošle Alici zprávu zašifrovanou jejím veřejným klíčem, potřebuje mít napřed jistotu, že ten klíč je opravdu její, že nepatří osobě, která se za Alici vydává. Prvotní zdroj této jistoty nelze opatřit technicky. Musí jím být nějaká vnější autorita (dejme tomu úřad), která Alici její klíče vystaví a přitom ověří její totožnost.

Elektronický podpis

Asymetrickou šifru lze použít také opačným způsobem. Alice vezme dokument a zašifruje ho svým soukromým klíčem. Pak ho pošle Bobovi. Bob dešifruje zprávu Aliciným veřejným klíčem – a když se to povede, má jistotu, že odesílatelem je opravdu Alice, protože jen ona disponuje svým soukromým klíčem.

Tento postup nezaručuje důvěrnost zprávy, protože veřejný klíč odesílatele může použít, a tím pádem zprávu přečíst kdokoli. Zaručuje však identitu odesílatele a ještě něco navíc – slouží také jako důkaz, že podepsaný dokument nebyl pozměněn, protože při dešifrování by to vyšlo najevo. Dále je neodvolatelný, akt podpisu nelze popřít; a kromě toho může být časově vázaný a posloužit tak jako důkaz, kdy přesně byl dokument podepsán.

Elektronický podpis je nástrojem, který umožňuje postavit digitální dokumenty na roveň papírovým, pokud jde o právní sílu. To je zásadně důležité pro skutečně funkční e-government.

Šifry jako byznys

Šifrování je absolutně nezbytnou součástí infrastruktury internetu. A PKI je jeho konečnou instancí, zárukou bezpečnosti.

To neznamená, že asymetrická šifra je neprolomitelná. Může k tomu dojít mnoha způsoby, nejčastěji selháním lidského faktoru: někdo vyzradí hesla nebo s nimi zachází nedbale. Může ji zradit chyba v programu: bezchybný algoritmus nezaručuje, že bude bezchybný i software napsaný podle něj. Nejrůznější „zlé Evy“ mohou uspět také tam, kde je použitý klíč příliš krátký. Zatím hypotetickou možnost představují budoucí kvantové počítače, jež by mohly zrušit rychlostní omezení dnešních strojů (viz [QUBIT](#)).

Ale pro většinu běžných účelů je PKI nesmírně bezpečná. Zajišťuje elektronické bankovníctví, osobní data v databázích i biometrické čipy v osobních dokladech. Také důvěrnou komunikaci mezi jednotlivci a firmami. Bez asymetrické šifry a dalších kryptografických nástrojů by moderní svět nemohl existovat.

Rivest, Shamir a Adleman – svého času mladí postdokové na MIT – dovedli svůj objev do uživatelsky přívětivé podoby. Univerzita na něj získala patent v roce 1983. Dnes existují pro práci s asymetrickým šifrováním lepší algoritmy – lepší zejména v tom, že jsou rychlejší – principiálně však stále z RSA vycházejí.

Trojice autorů založila roku 1982 firmu RSA Data Security. Ta má dnes téměř 3000 zaměstnanců, roční tržby přes miliardu dolarů a po několika vlastnických změnách je součástí velké počítačové společnosti Dell. Firma vyvíjí mnoho dalších produktů souvisejících s počítačovou bezpečností a samotný RSA algoritmus už není centrem jejího zájmu. Bez něj by však neexistovala.

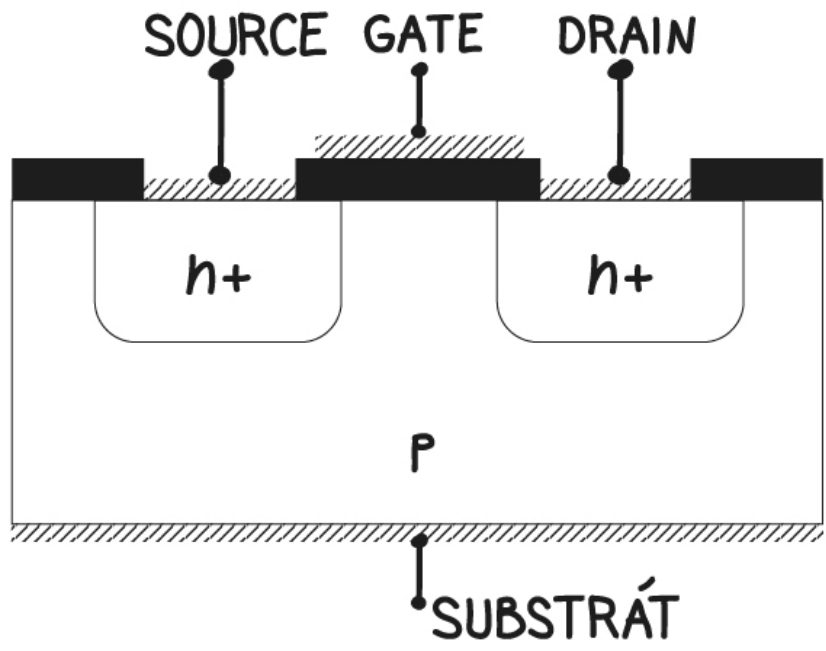
I poctivý člověk má co skrývat

Jednou z kontroverzí kolem šifrovacích systémů je také otázka, zda do nich má mít v demokratických zemích (v nedemokratických se na to nikdo neptá) přístup vláda a policie. Po pravdě řečeno, ani v mnoha demokratických zemích se už nikdo příliš neptá: v posledních letech jsme se hodně dověděli o velkoplošném špiclování amerických občanů. Ne nutně proto, že by USA byly v tomto ohledu nejhorší, ale proto, že právě tam se našli lidé, kteří tajemství vynesli.

Za takových okolností šifry jako RSA pozbývají části své účinnosti. Jejich hlavním účelem bylo udržet míru soukromí na stejné úrovni jako v časech před digitálními technologiemi. Dnes se ukazuje, že to pravděpodobně není možné. Tlak je příliš veliký. Přesto je šifrování nadále důležité. Je úplně jedno, že nemáte co skrývat. Ani pak přece nestojíte o to, aby byl váš život zcela průhledný, otevřený každému a do detailů.

Tranzistor

Polovodičové součástky změnilly svět navždy.



Některé látky vedou elektrický proud, jiné ne. Příkladem první je měděný drát, příkladem druhé jeho izolace z nějakého druhu plastu. Proud je pohyb nosičů náboje, v pevných látkách vždy elektronů. Elektrony jsou ve veškeré hmotě, vodiče se od nevodičů liší tím, že v nich se elektrony pohybovat mohou, v nevodičích ne, jsou pevně přivázaný na své místo.

Třetí kategorií látek jsou polovodiče, tedy „něco mezi“. V zásadě jsou nevodivé, dá se jim však různými způsoby pomoci, aby si to rozmyslely a proud vedly. Jedním z takových způsobů je teplota. Když připojíte kus křemíku nebo germania, což jsou nejběžnější polovodiče, ke zdroji proudu, nic se dít nebude. Když polovodičový krystal zahřejete, proud začne procházet.

Hra s chybějící židlí

To by mohlo být občas užitečné samo o sobě, skutečné kouzlo polovodičů však spočívá v jejich dotování příměsemi. Za elektrickou vodivost látek odpovídají tzv. valenční elektrony – ty, které jsou ve vnější vrstvě elektronového obalu atomu. (Odpovídají také za chemické vazby a obecně za velkou část vlastností látek. Viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#).)

Atom křemíku má čtrnáct elektronů, z toho čtyři valenční. Když do krystalu čistého křemíku přidáme malé množství fosforu, nastane v něm přebytek elektronů. Atom fosforu se atomu křemíku hodně podobá, oba prvky spolu sousedí v periodické tabulce, valenčních elektronů má však fosfor pět.

Atom fosforu se zařadí do krystalové mřížky, ale elektron mu bude přebývat. Nebude mít své místo – jako při té společenské hře, kdy je v místnosti o jednu osobu víc než židlí. A právě jako při té hře se přebytečný elektron pokusí zaujmout některé z obsazených míst. Tím vyhodí ze struktury – ze „židle“ – jiný elektron. A tak dále. Malé množství přebytečných elektronů způsobí, že se jich hodně dá do pohybu. Polovodič začne vést proud i za normální teploty.

Dá se to zařídit také opačně. Do křemíku se přidá některý prvek s třemi valenčními elektrony, třeba bór nebo gallium (nabízela by se hliník, ale ten se v praxi používá jen málokdy). V naší hře pak máme víc židlí než osob. Když si budou hráči přesedat, bude to vypadat, jako by se místností sama pohybovala ona prázdná židle – každou chvíli je jinde, přestože ve skutečnosti židlemi nepohneme, mění se jen jejich obsazení. Přesně totéž se děje v krystalu křemíku dotovaném prvkem se třemi valenčními elektrony.

Prázdnému místu po elektronu, které se takto zdánlivě pohybuje, se říká elektronová díra (nebo jen díra). Dá se pokládat za nosič kladného náboje, protože elektron je nosičem náboje záporného. Když zapojíme k polovodiči zdroj napětí, budou se elektrony pohybovat ke kladnému pólu zdroje dírů k zápornému

elektrony z oblasti P, jež má větší energii, mohou se k nim připojit, což způsobí přes NP přechod. Ten je nevodivý, ale úzký. Zpočátku se nestane nic, ale se zvyšováním napětí (u běžných součástek, z nichž si staví svá zapojení amatéři, je to asi 0,6 V) je síla zdroje dost velká, aby elektrony nevodivou oblastí prošly, jako když pod tlakem vody praskne hráz. Totéž se z druhé strany stane s dírami. Nevodivá oblast přestane existovat, je zaplavena nosiči náboje, stejně jako celý krystal. A proud může procházet tak dlouho, dokud jeho zdroj neodpojíme.

Polovodičová dioda se používá jako součást mnoha složitějších zapojení, například jako usměrňovač střídavého proudu (projde jen v jednom směru). Všichni známe „ledky“ – LED (Light-Emitting Diode) využívá toho, že některé polovodičové materiály vyzařují při průchodu proudu světlo na principu tzv. elektroluminiscence. Barvu světla lze ovlivnit volbou použitého materiálu (žlutá, oranžová, červená, zelená, nejnověji modrá – jen bílou ledku nemůžete mít, bílá není barvou spektra a složené barvy elektroluminiscence neumí).

Základ moderního světa

Z dotovaných polovodičů se dají skládat složitější struktury. Když je seřadíte do uspořádání PNP anebo NPN a vhodně zapojíte proud, dostanete tranzistor – součástku, která dala vzniknout moderní elektronice.

Tranzistor vynalezli John Bardeen, Walter Brattain a William Shockley v Bellových laboratořích roku 1947. Zde je nutno podotknout, že celý náš výklad o polovodičích vypadá dost jednoduše, ale to jen proto, že extrémně zjednodušený skutečně je. Ve skutečnosti jde o kvantové jevy, jejichž pochopení vyžaduje i dnes hodně těžké fyziky a matematiky. Celá trojice za svůj objev po právu obdržela Nobelovu cenu.

Činnost tranzistoru si vysvětlíme na jeho moderní podobě, které se říká FET. Neznamena to nic horšího než Field-Effect Transistor, tranzistor řízený (elektrickým) polem. Principem (ne provedením) je jednodušší než dioda. Je tvořen polovodičem typu N se dvěma vývody. Nazývají se S a D (source a drain, tedy přítok a odtok, v korektní terminologii emitor a kolektor). Proud teče od S k D. Mezi nimi je kovová destička, která se polovodiče nedotýká, je od něj izolována, jen se nachází v jeho blízkosti. Té se říká G (gate, česky hradlo). Napětí na G můžeme řídit. Tím odsajeme nebo naopak přidáme pohyblivé nosiče náboje do polovodiče a řídíme tak procházející proud. Tranzistor FET se velmi často používá jen jako dvoustavový spínač: signálem na G buď proud mezi S a D pustíme, nebo zavřeme.

To nevypadá nijak impozantně, takže dodejme pár dalších věcí. Zaprvé, spínání je bleskurychlé, měří se v nanosekundách (viz [BILION](#)). Zadruhé, z takto ovládaných jedniček a nul – stavů zapnuto/vypnuto – se dají skládat složité logické obvody. Zatřetí, dnešní technologie umožňují na destičku 3 × 3 cm umístit dvacet miliard takových tranzistorů (aniž řekly

poslední slovo). Zkrátka a dobře, mluvíme zde o současných digitálních technologiích a o Mooreově zákonu.

Spojení více polovodičových součástek do jediného celku – tedy integrovaný obvod – vynalezl Jack Kilby ve firmě Texas Instruments roku 1958, do větší dokonalosti dotáhl tento proces Robert Noyce a jeho spolupracovníci ve společnosti Fairchild Semiconductor. Tento tým roku 1968 opustil Fairchild a založil novou společnost nazvanou Intel. A ta pak jako první vyrobila celý procesor počítače na jediné destičce – na jediném čipu, jak se běžně říká. Výroba počítačů a všech dalších elektronických zařízení se tím ohromně zlevnila a zrychlila, vznikl vlastně celý náš moderní svět, do nějž patří mobilní telefony, internet, GPS a digitalizace úplně všeho. Malému kousku Kalifornie, kde je koncentrace digitálních firem největší, se od té doby říká Křemíkové údolí, Silicon Valley. Intel v něm stále patří k nejmocnějším.

Už na začátku polovodičového boomu si Gordon Moore, jeden ze zakladatelů Intelu, povšiml zákonitosti: počet tranzistorů na čipu (a tím výkonnost polovodičových součástek) se zdvojnásobí každých osmáct měsíců při nezměněných výrobních nákladech. To znamená deset zdvojnásobení za patnáct let. Deset zdvojnásobení je zhruba totéž co tisícínásobek (viz [ÚROK](#)). Od této předpovědi uběhlo zhruba padesát let, tedy třikrát patnáct a něco. Dnešní součástky, z nich stavíme počítače, jsou tedy $1000 \times 1000 \times 1000 \times$ něco výkonnější než tehdejší – to znamená, že přinejmenším miliardkrát. Velká část toho zdokonalení se ztratí kvůli faktorům, jež tak rychle nerostou (kapacita baterií, lidská schopnost psát software a především schopnost počítače efektivně využít), přesto je pokrok v digitálních technologiích závratný a z větší části jej lze vysvětlit právě Mooreovým zákonem. Ten nemůže platit navždy. Nepřehlédněme, že nejde o žádný přírodní zákon. Říká vlastně dvě věci: že se investorům vyplácí investovat do stále lepších způsobů výroby polovodičových součástek a že jejich zdokonalování víceméně konstantním tempem je stále možné. Úzkým místem je to druhé, ne to první. A to skoro doslova, jde totiž o šířku oddělených struktur na čipu. Dnešní tranzistor zabírá na čipu plochu kolem tisíce čtverečních nanometrů. Atomy křemíku jsou v krystalové mřížce srovnány tak, že (nezměnitelná) vzdálenost mezi nimi činí 0,54 nanometru. Šířka tranzistoru je pak v nejlepším případě 60 atomů. Je zjevné, že se blížíme ke konci možností.

Nemusí to znamenat konec Mooreova zákona, mohou přijít počítače na jiných principech (viz [QUBIT](#)), mohou přijít třídimenzionální polovodičové struktury anebo něco docela jiného. Bláznivý let digitálních technologií se ovšem také může zpomalit. Jasně by v tom mělo být tak za dvacet let, možná dřív.

Ťuhýk

Česká terminologie přírodních věd je z větší části dílem jediného muže.



O české vlastenecké společnosti v první polovině devatenáctého století se dá říci ledacos, především však byla malá. Tvořili ji ti lidé, o kterých se učíme ve škole (Jungmann, Palacký, Havlíček, Němcová...) plus pár set dalších. Český jazyk a česká kultura byly pro většinu z nich hobby projekt. Nebyli bohatí, museli si denně vydělávat na živobytí, zpravidla v nějaké intelektuální či úřednické profesi – a v němčině. Vlastenectvím se zabývali po práci a v neděli.

Sami přitom příliš česky neuměli; podmínkou vstupu do vlastenecké společnosti bylo naučit se tomu přežívajícímu, ale pozapomenutému jazyku. Česky se mluvilo na venkově, tam však zas nebyli vlastenci, přinejmenším ne v tom smyslu, jak na sebe hleděla společnost kolem Jungmanna.

Pro aktivní obrozence byla čeština láskou (tak to aspoň hlasitě a denně deklarovali) a předmětem amatérského experimentování, nikoli žitou každodenností. To jsou charakteristiky, jimiž by se dalo popsat i leccos jiného, třeba sexuální život teenagerů. Výsledky tomu občas odpovídaly.

K hlavním cílům obrozenců patřilo prokázat, že je čeština ve všech ohledech rovnocenná s ostatními jazyky (říkali „ostatní jazyky“, ale měli na mysli téměř výhradně němčinu, mnozí z nich ostatně žádné další jazyky neznali, němčinu zato důvěrně, všichni byli buď bilingvní, nebo němčinu ovládali lépe než češtinu).

A němčina právě tou dobou vytlačovala latinu z pozice univerzálního světového jazyka vědy, především díky skvělému rozvoji německých a vídeňských univerzit a německého přírodovědného výzkumu. „Dlouhé devatenácté století“ – od Francouzské revoluce po první světovou válku – bylo, pokud jde o vědu, stoletím převážně německým, přesněji německojazyčným. Česká inteligence měla k tomuto vydatnému prameni vcelku snadný přístup, její část o to víc toužila po emancipaci.

Za těchto okolností vznikala i česká odborná terminologie přírodních věd, kterou používáme dodnes. Její tvůrci měli volné pole působnosti (příslušné termíny v lidové češtině neexistovaly); neměli mnoho jazykového citu (pracovali s jazykem, který pro ně byl v podstatě cizí); měli kolem sebe přátele, kteří jim pochválili víceméně cokoli. Když se tohle všechno vezme v úvahu, nutno uznat, že to dopadlo až nečekaně dobře. Stalo se tak ze dvou důvodů: zaprvé díky výjimečné osobnosti Jana Svatopluka Presla, přírodovědce a politika v jedné osobě, který byl zdaleka nejvlivnějším mezi autory českého názvosloví. Zadruhé proto, že jazyk je živý organismus, nikoli hračka. Výstřednější nápady jednoduše odvrhl. A že jich bylo!

Presl vymyslel a zavedl do češtiny obrovské množství jmen zvířat a rostlin. Občas si pomohl jiným slovanským jazykem, zpravidla ruštinou (tuleň, bobr, mrož, dikobraz) či polštinou (náprstník, prvosenka). Častěji prostě vymyslel úplně nové slovo (hroch, klokan, lachtan, vorvaň, šťovík, kukuřice, kopretina a mnoho, přemnoho dalších). Některé se nevžily, většina ano.

Preslovým dílem je i slovo tuhýk. Tento nevelký stěhovavý pták, trochu větší než vrabec, je v Čechách znám odedávna, ve středověku se mu prý

říkalo strakopud. Tohle jméno Presl použít nemohl, protože se v průběhu století přeneslo v podobě strakapoud na docela jiného ptáka. Sáhí tedy po tuhýkovi, což není neologismus, ale zastaralý a pozapomenutý středověký název malé sovy, již dnes říkáme sýček obecný. Jméno zvolil, protože prý připomíná zvuk, jež tuhýk vydává.

Tuhýkovi (latinsky Lanius) se v němčině, kterou Presl samozřejmě znal stejně dobře jako češtinu, říká Neuntöter, „devítivrah“, a to na základě pověry, že napřed musí zabít devět kusů kořisti, než začne jíst. Jak to s lidovými pověrami bývá, ani této nechybí reálný základ. Tuhýk je dravec. Živí se sice hlavně hmyzem, ale když může, útočí na drobné hlodavce, na žáby a na jiné ptáky. Kořist často napichuje na trny jako do příruční spižírny. Což pozornosti venkovského člověka nemohlo ujít. Dnes se toto chování samečků tuhýka považuje za signalizaci zdatnosti směrem k potenciální partnerce. Ostatně, na tu napíchanou kořist dost často ani nedojde a zůstane tam, kde ji tuhýk nechal.

Devítivrah by bylo pěkné jméno, pro Presla však nepoužitelné. Svě vlastenectví signalizoval tím, že se za každou cenu vyhýbal doslovným překladům – kalkům – z němčiny.

Velmi zásadně se Jan Svatopluk Presl vepsal do českého chemického názvosloví. Valenční koncovky – ný, natý, itý, ičitý a tak dále – jsme se všichni učili stejně jako vyjmenovaná slova a pro hodně lidí je to jediné, co si ze školní chemie zapamatovali. Čeština (a slovenština, která to z češtiny převzala) je v tomto ohledu unikátní. [Žádný jiný jazyk](#) nemá speciální tvar adjektiva pro každé z osmi možných mocenství. To se obvykle interpretuje jako výhoda, protože z českého názvu anorganické sloučeniny lze jednoznačně zapsat její přesný vzorec, znáte-li příslušná pravidla.

Snad je to i pravda, snad se kyselina dusitá a dusičná skutečně studentům pletou méně než Salpetrige Säure a Salpetersäure, nitrous acid a nitric acid. Chemie ovšem není jen názvosloví a celá ta záležitost mocenských koncovek se nejspíš přeceňuje. Pokud dnes nevíte, jak se kyselina dusičná řekne anglicky, stejně si ve vědě ani neškrtnete. Presl (a Vojtěch Šafařík, který jeho práci na valenčních koncovkách dokončil) měl proti tvůrcům polské a ruské terminologie tu výhodu, že začal na zelené louce a mohl si vymyslet, co chtěl. Jeho kyselina dusitá jasně říká, že dusík je v ní trojmocný (-itá), zatímco v HNO_3 je pětimocný (-ičná).

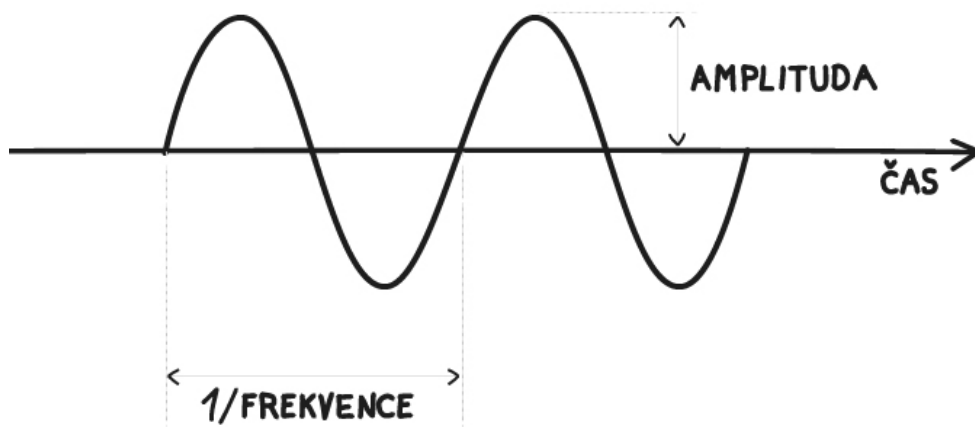
Další pěknou oblastí jsou názvy chemických prvků. Zde si ani Presl vždy neprosadil svou. Ujal se jeho vodík, uhlík, kyslík, sodík, hořčík, hliník, křemík, draslík, vápník – a dost. Zapomenut (a těžko nedodat: naštěstí) je bořík (bór), tekutík (fluor), ďasík (kobalt), pochvistík (nikl) i nebesník (uran), stejně jako ještě podivnější nápady Karla Slavoje Amerlinga jako japík (lithium), švábel (selen) či župeľ (tellur). Mimochodem, tipněte si, které jednoduché sloučenině říkal Amerling smrtvodka (ne, methanol to nebyl).

U osmia se nemohli obrozenci shodnout, zda by pro ně byl lepší název voník či smrdík, nakonec to raději nechali tak a my jsme jim za to vděčni; stejně jako za to, že nakonec zanechali snah odvodit od vlasteneckých názvů prvků i jejich vlastenecké značky. Takže spolu s celým světem níšeme H (hydrogenium) ač to čteme vodík. Nejsme v tom sami i Němci

prvky si (Hydrogenium), ac to chemie vodík. Nejsme v tom sám, i kromě mají svůj Wasserstoff (vodík), Sauerstoff (kyslík), Kohlenstoff (uhlík) a Stickstoff (dusík), u jiných prvků se do vlastní tvořivosti nepustili – s výjimkou těch známých před vznikem chemie, jež má každý jazyk pojmenován po svém: zlato, stříbro, železo, měď, rtuť, síra... V češtině vedle toho ovšem nechybí ani křemík, hliník a tuhýk.

Ultrazvuk

Všude kolem nás je spousta signálů, které nevidíme a neslyšíme.



Když se něco dokolečka opakuje, říkáme tomu periodický děj. Periodické děje mají periodu (jak dlouho trvá jedno opakování) a frekvenci (kolikrát za jednotku času, například za sekundu, se děj zopakuje). Frekvence je převrácenou hodnotou periody. Příkladem periodického děje je pohyb po kružnici: velká ručička obíhá ciferník hodin s periodou 3600 sekund a frekvencí $1/3600$ sekund na minus prvou neboli hertzů (Hertz se značí Hz a je to jednotka, v níž se měří frekvence – převrácená hodnota sekundy). Jiným příkladem je pohyb oscilátoru, třeba pružiny, na které je závaží, kyvadla a podobně.

Když se něco opakuje dokolečka a přitom se to pohybuje, šíří prostorem, mluvíme o vlnění. Někdy můžeme takovou vlnu vidět – třeba na vodní hladině.

Vlny podélné, příčné a mexické

Existují [různé druhy vlnění](#). Z jednoho hlediska rozlišujeme příčné a podélné vlnění. Příkladem příčného vlnění je mexická vlna na stadionu. Diváci neopouštějí svá místa, jen na nich vstávají a sedají si podle toho, jak se k nim blíží příslušný pokyn. U příčné vlny necestují prostorem kmitající částice, ale vzruch, pokyn, informace, která částicím velí něco provést. V užším slova smyslu se říkává, že příčné vlnění je kolmé na směr pohybu vlny (když divák vstává a sedá si, pohybuje se nahoru a dolů, zatímco viditelná vlna se šíří stadionem zleva doprava).

U podélné vlny se kmitající částice pohybují v jejím směru (a nutně taky zpátky). Vlna se zas, dejme tomu, šíří zleva doprava, každá částice vlničího se materiálu se pohybuje taky zleva doprava a pak zas zpět kolem své rovnovážné polohy. Neputuje tedy s vlnou dál a dál (stejně jako ten divák na stadionu). To, co doopravdy postupuje vpřed, je dočasné zhuštění materiálu. To je hřebenem vlny. Tímhle způsobem se šíří vlnění ve stlačitelných látkách. Vidět se dá třeba na zavěšené pružině, kterou zatížíme závažím. To se začne houpat nahoru dolů a pružinou přitom probíhají vlny zhuštění a zředění mezi jejími smyčkami.

Hodně přírodních dějů – zemětřesení, vlny na vodě – je kombinací podélného a příčného vlnění. Výsledný pohyb je jejich součtem a může být velmi složitý. Běžným příkladem složeného vlnění jsou vlny na vodě. Proto je taky špatný nápad používat je pro vysvětlování vlnění začátečníkům. Každý je sice viděl, ale z hlediska fyzikální analýzy jsou obtížné.

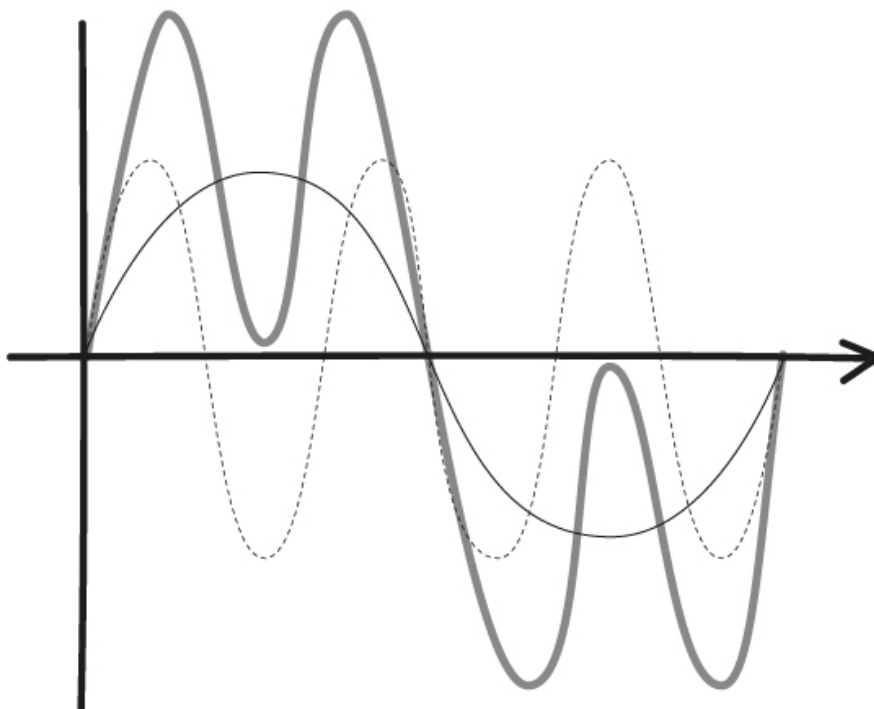
Podle jiného kritéria rozlišujeme vlnění postupné a stojaté. Postupné vlny jsou ty, o nichž jsme mluvili dosud – jejich maxima a minima postupují z místa na místo. U stojaté vlny zůstávají její maxima a minima stále na stejném místě, příkladem je struna na kytáře. Aby mohla vzniknout, potřebuje právě ten pevný konec (jeden nebo oba). Postupná vlna přenáší energii z místa na místo, stojatá ne.

Vraťme se k mexické vlně na stadionu. Někde o pár sedaček dál sedí člověk, který si stoupá a sedá přesně ve stejné chvíli jako vy. Tomu se říká, že jste spolu ve fázi. Vzdálenosti – počtu sedaček – mezi vámi se říká vlnová délka.

Když se podíváte na hodinky, zjistíte, že vstanete a sednete si desetkrát za minutu. To znamená, že frekvence vlny je $10 \text{ min}^{-1} = 10/60 \text{ s}^{-1}$ neboli $1/6 \text{ Hz}$.

Z těchto dvou hodnot se dá vypočítat rychlost postupu vlny neboli fázová rychlost: potřebujete k tomu vynásobit vlnovou délku frekvencí. Dejme tomu, že onen nejbližší člověk, který je s vámi ve fázi, sedí na dvanácté sedačce od vás. Vlnová délka je tedy 12 sedaček. Rychlost postupu vlny je tím pádem $12/6 = 2$ sedačky za sekundu. Má-li stadion kolem dokola 200 sedaček, oběhne jej celá vlna za $200/2 = 100$ sekund, necelé dvě minuty. (Mimo jiné je z toho vidět, že rychlost kmitů jedné částice – vás – a rychlost šíření vlny jsou dvě zcela odlišné věci.)

V případě mexické vlny si můžeme vlnovou délku a frekvenci nastavit nezávisle na sobě. Mohli bychom například zvýšit frekvenci (Sednout! Vstát! Sednout! Vstát!) a vlna by se šířila rychleji. Téhož efektu bychom dosáhli zvětšením vlnové délky.



Jak se vlní světlo

Existuje jeden speciální druh vlnění, kde tohle nejde. Jsou to elektromagnetické vlny. Jejich rychlost je stálá a vždy stejná (pokud se šíří ve vakuu nebo podobném prostředí), je to známá rychlost světla, tj. 300 000 km/s (viz [RELATIVITA](#)). U elektromagnetických vln můžeme volit buď frekvenci, nebo vlnovou délku: druhá z těchto veličin je tou první vždy pevně dána tak, aby jejich součin představoval rychlost světla.

U mexické vlny jsou vlnícím se médiem lidé. U zvuku to je vzduch nebo jiné hmotné prostředí (musí být hmotné, ve vakuu se zvuk nešíří). Co však jsou elektromagnetické vlny? Jde o periodické změny šířící se elektromagnetickým polem.

Pole je ve fyzice důležitý pojem – jeden z těch základních, které odborníci pokládají za samozřejmé, a proto je nedovedou dobře vysvětlit laikům. (Ryba by vám taky špatně vysvětlovala, co to je voda.)

Představte si meteorologickou mapu – takovou, jakou vám ukáže skoro každá mobilní aplikace s předpovědí počasí. Mohou na ní být vyznačeny teploty: v Brně 18 stupňů, v Ostravě 16, v Olomouci 17, v Ústí 21, v Praze 20... Anebo pravděpodobnost deště: v Ústí a Praze 0 %, v Brně 20 %, v Ostravě 40 %... To jsou příklady pole – jednou pole teplot, podruhé trochu složitější veličiny: ne toho, zda prší, ale toho, s jakou pravděpodobností pršet bude. Můžeme mít také měření větru: v každém bodě mapy bude zanesena jeho rychlost a směr. První dvě pole by fyzici označili za skalární (popsané jedním číslem), to s větrem pak za vektorové (směr šipky a její délka). Za pole ve fyzikálním smyslu můžeme prohlásit cokoli, co má v každém bodě prostoru nějakou číselnou hodnotu. Je jasné, že takové pole nemusí zůstat neměnné (počasí se mění pořád) a že jím mohou probíhat vlny.

Hodnotu elektromagnetického pole v každém bodě prostoru udává šest čísel uspořádaných do matematické struktury zvané tenzor. Je to o hodně složitější než mapa se směrem a rychlostí větru, ale jen výpočetně – princip zůstává stejný.

Elektromagnetické vlny se šíří prostorem jako příčné vlnění. Světlo, wi-fi, televizní vysílání, mikrovlny v troubě, radar, rentgenové paprsky, to jsou všechno elektromagnetické vlny, jež se navzájem liší jedinou věcí – frekvencí (a z ní odvozenou vlnovou délkou).

Nicméně, vraťme se ke zvuku.

Co slyší netopýr

Dobrým příkladem podélné vlny je šíření zvukových vln ve vzduchu nebo v jiném materiálu. Jejich zdrojem je vibrace nějakého předmětu – tím může být membrána reproduktoru, hlasivky mluvícího člověka, vibrace sloupce vzduchu v duté části saxofonu, chvění kusu kovu, do kterého něco udeřilo, a podobně. Zvukové vlny se pak šíří jakýmkoli pružným prostředím. Ve vzduchu se projevují jako střídavé změny tlaku.

Jak zvuk vnímáme? V uchu máme velmi citlivý snímač – bubínek, což je membrána silná asi 0,1 mm. Na změny tlaku vzduchu reaguje rozkmitáním. Pohyb bubínku se předává dál do ucha a pak do mozku, nejprve mechanicky, nakonec elektrochemicky.

Jak nám zvuk zní, to záleží na frekvenci zvukových vln. Normální zdravý člověk slyší frekvence od 20 do 20 000 Hz, ve stáří méně. Pro většinu účelů bychom si vystačili s mnohem menším rozsahem, asi tak od 100 do 4000 Hz. Stejně jako u mnoha jiných forem vlnění i u zvuku se obvykle nešíří jedna jednoduchá vlna, ale vlna složená z mnoha dílčích o různých frekvencích. Když z hudební nahrávky odstraníme vyšší frekvence, budeme ji slyšet dál skoro stejně, jen s malým posunem v tom, čemu se říká barva tónu. Tu ovlivňují právě vysoké frekvence, často samy o sobě slabé, překryté nízkými. Rozdíl je podobný jako u digitální fotografie s vyšším a nižším rozlišením. Důvody, proč frekvence ořezávat, jsou také stejné: ekonomické. Čím vyšší frekvence má zvuková nahrávka obsahovat, tím dokonalejší nahrávací a přehrávací zařízení potřebujete a tím větší objem dat musíte uložit.

Zvuk o frekvencích nižších, než můžeme slyšet, se označuje jako infrazvuk, vyšší než slyšitelné frekvence naopak patří ultrazvuku. Oba pojmy vycházejí z fyziologie člověka. Mnohá zvířata slyší a dovedou vydávat ultrazvuk (netopýři, kteří jej používají k mapování prostoru kolem sebe – echolokaci – až do frekvencí 200 kHz). Některá, například velryby nebo sloni, používají ke komunikaci infrazvuk.

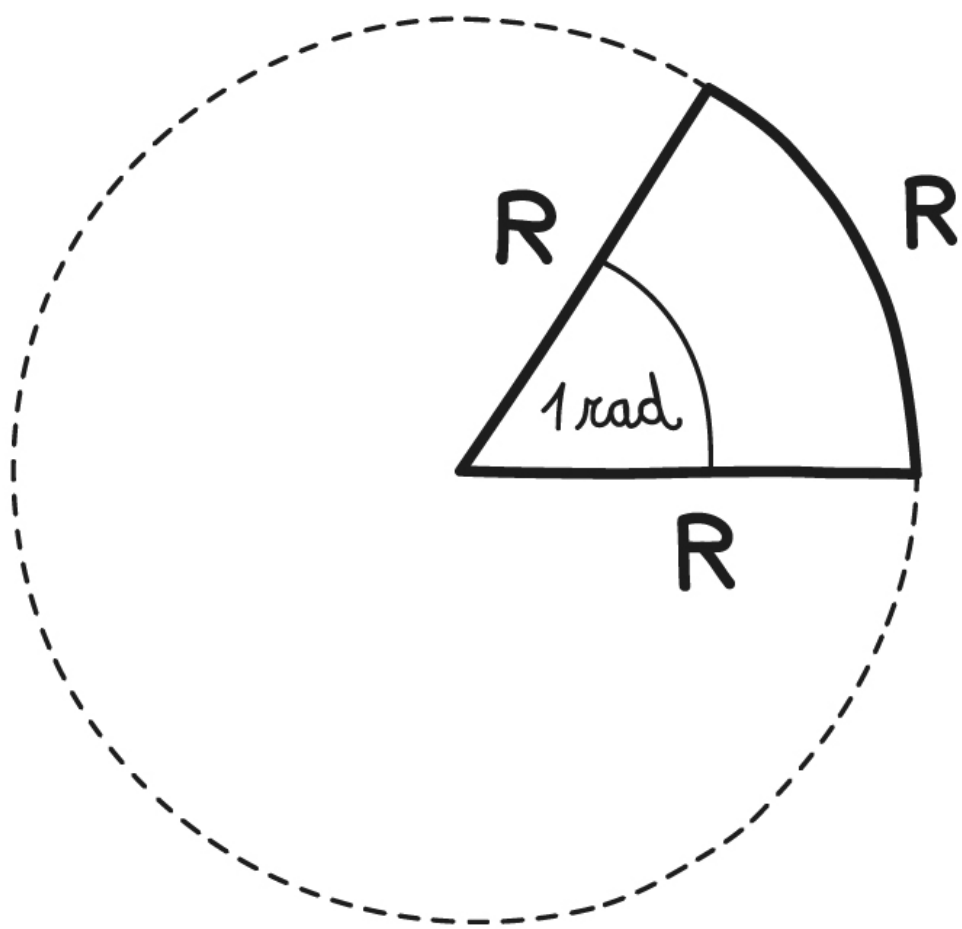
Fyziologické účinky infrazvuku jsou poněkud záhadná záležitost. I když ho neslyšíme, patrně ho nějak přece jen vnímáme, přinejmenším někteří. A nedělá nám dobře – podle některých pokusů může navodit úzkostné stavy, poruchy spánku a iluze nadpřirozených úkazů. Ke zdrojům infrazvuku patří přírodní děje jako zemětřesení, laviny, oceánské vlny. K častým umělým zdrojům se počítají některé diesellové motory, lopatky větrných elektráren či podzemní výbuchy. Vlnění o nízkých frekvencích (a tím pádem velkých vlnových délkách) se dovede šířit na velké vzdálenosti, protože v podstatě ignoruje hmotné překážky, takže účinky infrazvuku se mohou projevit daleko od zdroje.

Ultrazvuk se naproti tomu od překážek odráží. Díky tomu mohou netopýři, delfini a posádky ponorek (nejnověji i samořídících aut) používat sonar, akustickou obdobu radaru. Ultrazvuková vlna vyslaná sonarem se odrazí od překážky a vrátí se zpět. Z odrazu se dá spočítat poloha, velikost a pohyb předmětů v okolí, obvykle v dosahu několika set metrů. Mozek netopýřů nebo třeba kytovců to zvládá sám, lidé, kteří tento smyslový orgán nemají, si musí pomáhat přístroji.

Na principu sonaru funguje i lékařská sonografie. Ta používá zvukové vlny o mimořádně vysokých frekvencích (jednotky až desítky megahertzů) ke snímkování vnitřních orgánů, protože každý typ tkáně vede zvuk trochu jinak.

Úhel

Babyloňané mohou za to, že obvod kruhu dělíme na tři sta šedesát dílků. Není to úplně praktické.



Otočil se na místě o sto osmdesát stupňů. Pravý úhel má devadesát stupňů. Sjezdovka se sklonem pětadvacet. Člověk nemusí být matematik, aby měl dobrou představu o měření úhlů ve stupních. Přitom je to vlastně velmi podivný nápad.

Přemýšleli jste někdy nad tím, proč je celý kruh rozdělen právě do tří set šedesáti stupňů? To číslo připomíná počet dnů v roce, což není náhodou. Když žijete někde, kde je dobře vidět na noční oblohu – třeba před třemi tisíci lety mezi Eufratem a Tigridem – pak si povšimnete, že se souhvězdí na nebi nejen během noci otáčejí, ale také den za dnem pootáčejí. Začínají a končí své dráhy vždy o kousek dál. Za rok se ocitnou na původním místě.

Dnes víme, že to je důsledek oběhu Země kolem Slunce (lepší popis vlastně je, že nehybnou hvězdnou oblohou putuje Slunce). Denní pootočení je téměř přesně jednou třistašedesátinou celé kružnice. Babyloňané věděli, že rok má 365 dní, jenže 360 je mnohem příhodnější číslo, protože má spoustu dělitelů. Snaha lidstva o praktický a přitom početně elegantní kalendář ostatně není naplněna dodnes.

Úhlový stupeň je tedy míra odvozená z přírody stejně jako stopa, loket či palec, tedy nepraktické měrné jednotky, jež většina světa již opustila. Matematici znají lepší způsob, jak měřit úhly. Jejich oblíbená jednotka se jmenuje radián. Bohužel a zbytečně je tradičním postrachem školní výuky. Přitom je to prostá věc (viz [PI](#)).

Radián je délka oblouku dělená poloměrem (a proto bezrozměrné číslo: délku dělíme délkou).

Obvod celé kružnice měří $2\pi r$, a proto úhel 360° – celá kružnice – je totéž co $2\pi r/r = 2\pi$ radiánů. Pravý úhel neboli čtvrtina kružnice je pak $2\pi/4 = \pi/2$ radiánů. Jakýkoli úhel měří tolik radiánů, kolik metrů musíme ujít po oblouku kružnice s poloměrem jeden metr. To znamená, že jeden radián je totéž co $360/2\pi = 57,3^\circ$ (zhruba), a to je kámen úrazu – kdo tohle podivné nezaokrouhlené číslo uvidí, ten se zděšeně přidrží starých dobrých stupňů.

Může za to π . Kružnice je prostě taková, že poměr jejího obvodu k poloměru vyjadřuje číslo, které do našeho intuitivního obrazu světa tak docela nepatří. Škoda, ale aspoň si člověk lépe uvědomí, proč se Američani tak křečovitě drží svých stop, liber a galonů.

Mimochodem, ještě jinak měří úhly lyžaři a železničáři. Strmost svahu často udávají v procentech: kolik výškových metrů připadá na jeden délkový. Sjezdovka, která na kilometru délky klesne o 300 m, má strmost $300/1000 = 30\%$. To se dá přepočítat na úhlové stupně: výška sjezdovky dělena vodorovnou délkou je protilehlá odvěsna ku přilehlé neboli tangens. Když $\text{tg } \alpha = 300/1000 = 0,3$, kalkulačka nám řekne, že $\alpha = 16,7^\circ$.

(Neboli 0,29 radiánu – pro malé úhly má tangens a sinus skoro stejnou číselnou hodnotu jako úhel v radiánech.) Když však po té sjezdovce jedete, určitě byste odhadli, že je strmější než sedmnáct stupňů! To je známá optická iluze – a další důkaz, že úhlové stupně nejsou tak přirozené, jak by si člověk myslel.

Zajímavým využitím úhlů jsou zeměpisné souřadnice. Možná jste si to nikdy neuvědomili, ale zeměpisná délka (anglicky latitude – udává polohu sever–jih) i šířka (anglicky longitude – udává polohu východ–západ) jsou úhly. Praha leží skoro přesně na padesátém stupni severní šířky. Představte si, že spojíme Prahu rovnou čarou se středem Země. Úhel, který tato čára bude svírat s rovinou rovníku, je právě padesát stupňů, zeměpisná šířka Prahy. Místa na rovníku mají šířku nula stupňů, severní pól má devadesát stupňů.

Zeměpisná délka je zas úhel mezi plochou, kterou dostanete, když spojíte Prahu se severním pólem a plochou vymezenou podobným řezem procházejícím Královskou observatoří v Greenwichi, sídlem nultého poledníku. Zní to zbytečně složitě, ale pomůže vám to uvědomit si, že opravdu jde o úhlovou míru. Přitom jsme zvyklí uvažovat o zeměpisné šířce i délce spíš jako o pravoúhlých souřadnicích v rovině (mapy) než jako o úhlech na kouli. Můžeme si to dovolit, protože Země je velká.

Dokud máme v ruce turistickou mapu. Letci, námořníci a inženýři projektující družicové navigační systémy si to rozhodně dovolit nemohou.

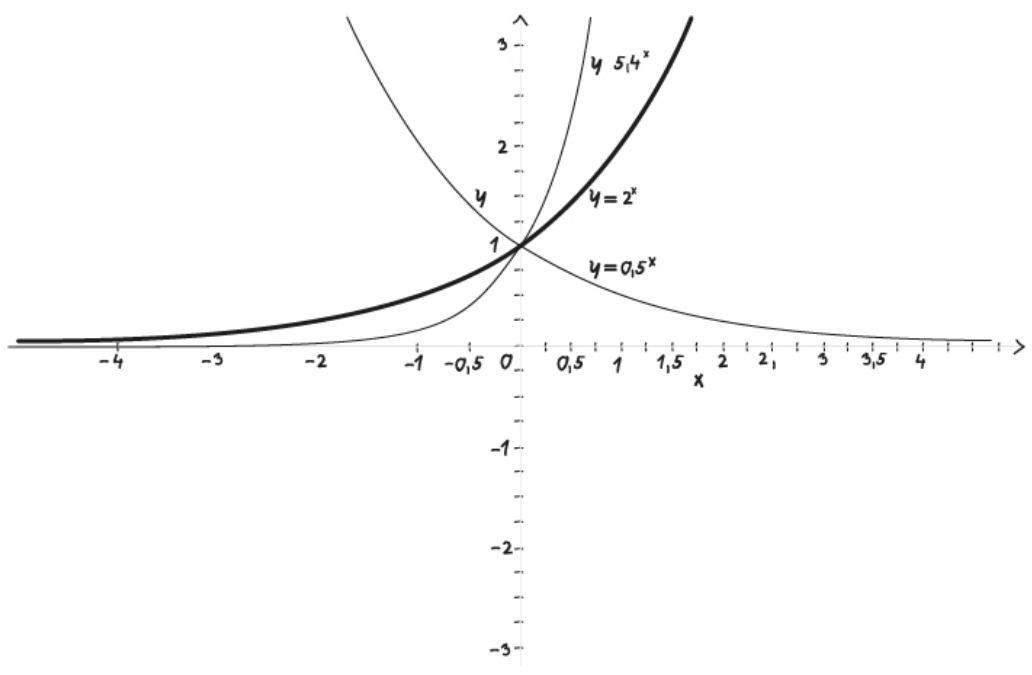
Vzdálenost mezi dvěma stupni zeměpisné délky je tím menší, čím jsme blíže k pólu. Na rovníku měří jeden stupeň 111,32 km. Na pólu pochopitelně neměří nic. V Praze měří 71,7 km. Vzdálenost mezi dvěma stupni zeměpisné šířky je všude stejná – tedy byla by, kdyby byla Země přesně kulatá, což není. Je trochu šišatá, důstojněji řečeno, má tvar elipsoidu, a proto v rozsahu stovek metrů kolísá i délka jednoho stupně zeměpisné šířky (a není stejná jako stupeň zeměpisné délky na rovníku, což by u přesné koule byla). Zpravidla měří asi 111,5 km.

Úhlový stupeň se dělí na 60 minut a délka jedné úhlové minuty v severojižním směru definuje jednu námořní míli, což je 1852 metrů (na rozdíl od tzv. geografické míle, která měří 1855,3 m, a na rozdíl od docela obyčejné míle, která měří 1609,34 m). Námořní míle se používá v námořní a letecké dopravě, obyčejná míle se používá v anglosaském světě pro všechna běžná délková měření, geografická míle se nepoužívá skoro nikde.

Pro přesná měření zeměpisné polohy byly zavedeny matematicky výhodnější, ale méně názorné systémy UTM a UPS – a spolu s nimi několik dalších, například americký vojenský MGRS. Navigační přístroje založené na GPS se dají přepínat mezi různými souřadnými soustavami.

Úrok

2,71828... je nejdůležitější číselnou konstantou v celé matematice.



O některých zásadních číslech se ví tisíce let, protože se nám jaksí vnutila, a to převážně geometricky. Odmocnina ze dvou byla na světě, jakmile někdo nakreslil úhlopříčku čtverce a zamyslel se, jak je asi dlouhá. Číslo π zas udává poměr mezi délkou obvodu kruhu a jeho průměrem, což je úloha jednak praktická, jednak dráždivá – to by přece mělo vycházet jako nějaké pěkně zaokrouhlené číslo nebo jít snadno sestrojít pravítkem a kružítkem, ne? (Nevychází a nejde.) Zlatý řez je také snadno pochopitelný: rozdělíme úsečku na dva díly tak, aby delší část k celku byla ve stejném poměru jako kratší část k delší, což jde jen jedním způsobem a navíc to vypadá hezky, příjemněji než jiná dělení, rezonuje to v nás esteticky.

Všechna tahle čísla jsou „divná“ (tím mám na mysli prozatím hlavně to, že jsou iracionální, mají nekonečný desetinný rozvoj, nedají se zapsat celočíselným zlomkem) a napětí vzniká právě z nesouladu mezi názornou geometrickou srozumitelností a podivnou algebraickou složitostí. Nemožnost přesně stanovit délku něčeho tak prostého jako úhlopříčka čtverce je až ponižující. Vypořádat se s tím dá jediným způsobem, že si totiž ten nesoulad zasadíte do širšího rámce, rozšíříte svůj pohled na svět, což lidstvu trvalo strašně dlouho, zhruba od Pýthagora k Weierstrassovi a Cantorovi, tedy nějakých 2350 let. (viz též [NEKONEČNO](#) a [PÍ](#).)

S číslem e je to ještě jinak. Žádnou jednoduchou geometrickou interpretaci nemá, je tedy daleko abstraktnější a Řekové na něj přijít nemohli – jejich matematika k tomu neměla nástroje. Chyběly jim arabské číslice, desetinný zápis a nula, chyběla jim algebraická notace. Neměli jazyk algebry. Přemýšlet dovedeme jen o těch pojmech, které v našem jazyce existují.

Číslo e asi neobjevili lichváři, ale rozhodně ho objevit mohli. Pojdme si chvíli povídat o půjčkách a úroku.

Franta Naivka jde do banky

Úrok je součástí evropské civilizace od renesance. Dříve byl pokládán za nemorální, což ovšem souviselo s charakterem půjček: člověk si půjčoval téměř výhradně v dočasné nouzi, typicky za neúrody, a účtovat úrok znamenalo zneužít dlužníkovy tísně. (Což neznamená, že by se na úrok nepůjčovalo! Šlo koneckonců o výnosný hřích a takový vždy někdo spáchá.) Korán to tak ostatně předepisuje dodnes, takže aby měly banky v islámských zemích z čeho žít, musí být dost tvořivé: půjčka se tam často formálně chápe jako investice a banka se s dlužníkem dělí o „investiční výnos“. Bez motivace ovšem chyběla nabídka kapitálu, což přestalo fungovat, když se objevily podnikatelské příležitosti a spolu s nimi nutnost (a zároveň lákavá možnost) financovat je.

Složené úročení začalo být v Evropě legální počátkem 17. století, do té doby se bralo jako obzvlášť podlá lichva a bylo trestné. Dnes jeho podstatu chápe snad každý kromě Franty Naivky, toho, co si půjčil sto tisíc na

dvanáct let při úrokové sazbě 5 % ročně (na odloženou jednorázovou splátku). Spočetl si, že bance po dvanácti letech vrátí $100\,000 + 12 \times 5\,000 = 160\,000$, jenže to se samozřejmě spletl. K jistině – oněm sto tisícům – se totiž připisuje úrok ročně, jak koneckonců samo to slovo zřetelně naznačuje. (Většina evropských jazyků tuhle užitečnou nápovědu dlužníkovi neposkytuje, vycházejí z latinského interest, což je jaksi pohled z opačné strany – říká, že úrokem je dán zájem věřitele půjčku poskytnout.)

Po roce tedy Franta dluží $100\,000 \times (1 + 5\%) = 105\,000$, po dvou letech $105\,000 \times (1 + 5\%) = 110\,250$, nikoli jen 110 000, jak by si představoval. Rozdíl 250 Kč je zatím zanedbatelný, jenže složený úrok je potvora: roste rychleji a rychleji.

Povšimněte si, že si pro zjednodušení zápisu složeného úročení můžeme pomoci mocninou. Po prvním roce Franta dluží $100\,000 \times (1 + 5/100)^1$, po druhém $100\,000 \times (1 + 5/100)^2$, obecně po n-tém tedy $100\,000 \times (1 + 5/100)^n$. Za dvanáct let to tedy dělá $100\,000 \times 1,7959$, což je 179 590 Kč, o dvacet tisíc víc, než Franta čekal. Kdyby splácel dluh až po dvaceti letech, zaplatil by 265 330 Kč; po třiceti 432 190 Kč. A to jsme mu půjčili na velmi solidní úrok! Je z toho pěkně vidět, proč je zapotřebí dávat pozor na staré zapomenuté dluhy. Když se o ně věřitel přihlásí po dlouhých letech, může být zle.

Z tohoto příběhu si odnesme také dvě ryze matematická ponaučení: za prvé, při složeném úročení roste dluh napřed velmi pomalu, pak čím dál tím rychleji. To „napřed pomalu, pak čím dál rychleji“ si rozhodně zapamatujte, je to jeden z hlavních motivů našeho vyprávění. A za druhé, obecný vzorec složeného úročení (přičemž n je počet časových období, po němž se připisuje úrok) se dá zapsat ve tvaru

$$\text{dlužná částka} = \text{počáteční jistina} \times \left(1 + \frac{\text{úroková sazba}}{100} \right)^n$$

Zatím jsme se zabývali jen obdobím trvajícím rok, ale to není jediná možnost. Co kdyby se úrok připisoval čtvrtletně? Takže znovu Franta, znovu sto tisíc na pět procent ročně, ale úrok se připisuje čtyřikrát do roka. Po prvním čtvrtletí Franta dluží $100\,000 \times (1 + 5\%/4) = 101\,250$ Kč. Proč dělíme pět procent čtyřmi? Protože 5 % je roční úroková sazba (per annum, zkratkou p. a.), tudíž čtvrtletní je čtyřikrát menší, měsíční dvanáctkrát menší atd.

Po roce tedy Franta dluží $100\,000 \times (1 + 5\%/4)^4 = 105\,094$ Kč, o něco víc než při ročním připisování. To je pochopitelné: když úrok, byť menší, připočtete k jistině dřív, začnou tyto připsané peníze od té chvíle „samy

vydělávat". Po dvanácti letech dluží Franta $100\,000 \times (1 + 5\%/4)^{48}$, tedy 181 535 Kč, o 1945 korun více než při roční obrátce.

Zkusme, co si můžeme na Frantu dovolit. Co připisování měsíčně? Dostáváme $100\,000 \times (1 + 5\%/12)^{12 \times 12}$, což je 181 984 Kč. Dlužná částka zas vzrostla, ale stojí za povšimnutí, že o něco méně než při přechodu od roční obrátky k čtvrtletní.

Půjdeme ad absurdum: připisování úroku každou minutu. To je $100\,000 \times (1 + 5\%/(365 \times 24 \times 60))^{12 \times 365 \times 24 \times 60}$. Na tom už zavaříte většinu kalkulaček, ale s pomocí algebraického triku z osmé třídy ZŠ nakonec přece jen spočtete výsledek 182 212 Kč.

Zcela nejrychlejší připisování „úroku“ by bylo plynulé, odehrávající se okamžitě. Dá se pro něj však spočítat dlužná částka? Jestliže připisujeme plynule, musíme rok rozdělit na „nekonečný“ počet období „nulové“ délky – obě přídavná jména dáme raději do uvozovek, protože zatím není jasné, co vlastně v tomto případě znamenají. (Takhle se musí s nekonečnem v matematice zacházet vždy – jako s třaskavinou.) Náš vzorec pro Frantovu dvanáctiletou půjčku by nabył podoby, která není pěkná. Co s tím?

$$\text{dlužná částka} = \text{počáteční jistina} \times \left(1 + \frac{\text{roční úroková sazba}}{\text{„něco jako nekonečno“}} \right)^{12 \times \text{„něco jako nekonečno“}}$$

Plynulý růst

V přírodě i technice se vyskytuje dost věcí, jejichž množství se za daný časový interval zdvojnásobí. Jejich tempo růstu – „úroková míra“ – je tedy 100 % neboli 1. Příkladem může být třeba stéblo trávy, které vyroste na dvojnásobek předchozí výšky za 14 dní, nebo Mooreův zákon (viz [TRANZISTOR](#)), podle nějž se výkonnost polovodičových součástek zdvojnásobí jednou za 18 měsíců. Příkladem ovšem může být i lichvář, který půjčuje na stoprocentní roční úrok, což se zejména u krátkodobých půjček pošetilejším osobám (nebo těm, kdo už opravdu nemají na vybranou) klidně může stát.

Zdvojnásobení je speciální případ růstu, s nímž se snadno počítá. Budeme se mu proto chvíli věnovat a k obecnějším případům se vrátíme později. Ještě nastavíme čísla tak, aby nám vycházela opravdu pěkně, takže Franta si teď půjčí jednu korunu na stoprocentní roční úrok na dobu jednoho roku. Ten složitý vzorec uvedený o něco výše se zjednoduší na

$$\text{dlužná částka} = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

protože počáteční jistina je 1 Kč a úroková sazba 100 % neboli jednička. A teď se podíváme, co se bude dít, když n zvětšujeme – neboli přecházíme od skokových přírůstků k plynulým.

n ■ dlužná částka

1 (ročně) ■ 2

4 (čtvrtletně) ■ 2,441...

12 (měsíčně) ■ 2,613...

365 (denně) ■ 2,715...

8760 (každou hodinu) ■ 2,718127...

525 600 (každou minutu) ■ 2,718279...

1 000 000 ■ 2,718280...

Jak vidíte, dospěli jsme k číslu 2,718... Uvědomme si, že tohle je mez; žádný růst (při pevně daném „úroku“) nemůže být rychlejší než plynulý, protože žádný časový interval nemůže být menší než nula. 2,718... je v tomto smyslu něco jako rychlost světla: absolutní hranice. A ano, právě tohle je slavné číslo e též známé jako Eulerovo číslo či základ přirozených logaritmů.

Pro hodně velké n se výraz $(1 + 1/n)^n$ blíží jedinému konkrétnímu číslu a tohle číslo se Leonhard Euler kolem roku 1750 rozhodl pojmenovat e . Exaktně se to zapíše jako

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

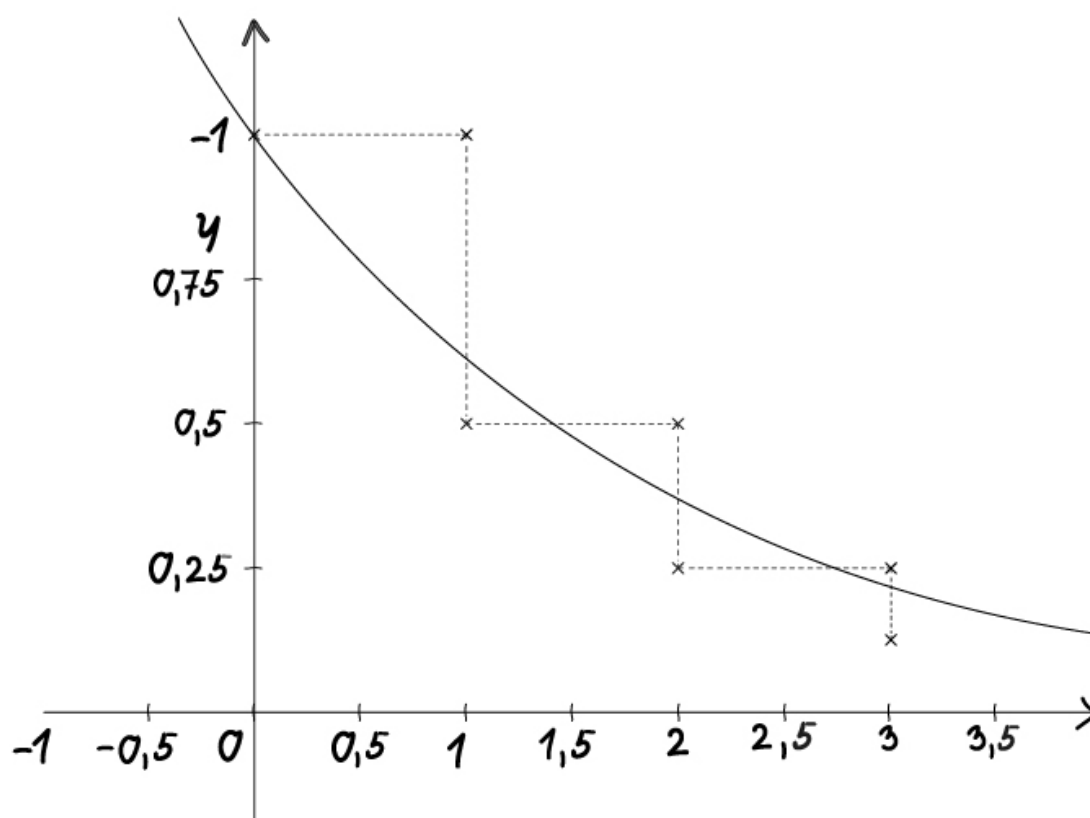
Každý pravidelný spojitý růst lze vyjádřit pomocí mocniny e . Faktor, kterým je třeba vynásobit výchozí stav, abychom dostali cílový, je jednoduše e^{rt} , kde r je procento přírůstku za období (neboli úroková míra) a t počet období.

Tak například pro Frantovu půjčku na 12 let při pětiprocentní úrokové míře dostaneme $100\ 000\ \text{Kč} \times e^{12 \times 5\%} = 182\ 212\ \text{Kč}$, totéž číslo, ke kterému jsme se před chvílí dostali pracnějším cestou. Pro Mooreův zákon je $r = 100\%$ neboli jedna, t si dáme třeba 10 (a víme, že délka období je 18 měsíců, $t = 10$ tedy znamená 15 let), výkon procesorů se tedy za tuto dobu zvýší e^{10} násobně, což je něco přes 22 000.

Varování: tohle opravdu platí jen a výhradně tam, kde je růst spojitý, kontinuální. Velmi typické to je u přírodních dějů, málo typické v bankovníctví (příklad s Frantou těžko převeďte do života v plném rozsahu). Mooreův zákon snad můžeme pokládat za víceméně kontinuálně působící. Nespojité růst, kde se úrok připisuje až na konci období, je – jak jsme již viděli – vždy pomalejší než spojitý. Exponenciála je krajní mezí možností.

A doplněk: pokles je taky druh růstu. Mějme kilogram radioaktivního izotopu (viz [RADIOAKTIVITA](#) a [IZOTOPY](#)), o němž víme, že za rok se rozpadne – přestane zářit – 50 % jeho atomů. (Než řeknete „poločás rozpadu“, počkejte chvíli – tohle není poločás rozpadu!) Vzhledem k obrovskému počtu atomů v kilu pevné látky můžeme rozpad klidně pokládat za kontinuální. Kolik radioaktivity zbude v tom kilu za tři roky? Vzorec je stejný, e^{rt} , r je ovšem záporné: $-50\% = -0,5$. Máme tedy $1\ \text{kg} \times e^{-0,5 \times 3} = 0,223\ \text{kg}$.

Tady si můžeme ukázat jednu typickou chybu v uvažování. Hodně lidí by řeklo: „Za rok bude toho izotopu polovina, za dva roky polovina ze zbylé poloviny neboli čtvrtina, za tři roky osmina – tedy 0,125 kg.“ Zejména programátoři mají rádi mocniny dvou! Příroda však takhle nefunguje – to je právě rozdíl mezi spojitým a nespojitém růstem či poklesem.



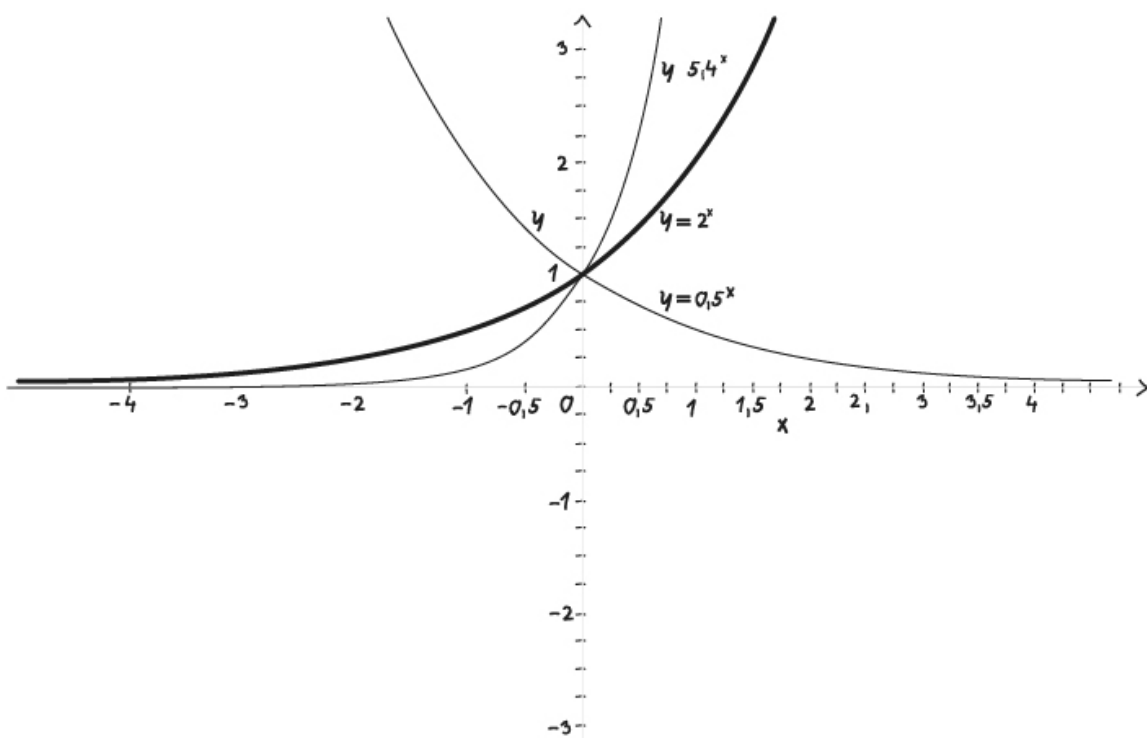
Mimoходом, z grafu je pěkně vidět, jak je to s tím poločasem rozpadu. To je doba, za kterou se rozpadne polovina atomů. Lze odečíst, že to je 1,4 roku. Proč to není rok, když se za rok rozpadne 50 %? Protože čím méně radioaktivní látky máme, tím pomaleji se rozpadá. Pořád je to 50 % ročně, ale z klesajícího množství. Zase složené úrokování, jen naopak.

Exponenciální křivka

Exponenciála je funkce definovaná vztahem $y = a^x$, kde a je tzv. základ – číslo, které musí být kladné a nesmí se rovnat jedné. (Jednička umocněná na cokoli je zase jednička, takže při základu 1 bychom dostali funkci, která není exponenciála: vodorovnou přímkou ve výšce 1.

Nula umocněná na kladné číslo je vždy nula, tedy podobný případ. Nula na nultou, stejně jako nula na záporné číslo, nemá definovanou hodnotu, byť důvody jsou u těchto dvou případů mírně odlišné. A co se děje s exponenciálou při záporném základu, to raději ani [nechtějte vědět](#).

Pro každé platné a dostaneme trochu jinou exponenciálu. Nakresleme si tři typické a podívejme se na ně.



Na grafu exponenciály si povšimněme především toho, co všechno nemá. Nemá maximum ani minimum. Nemá žádný průsečík s osou x , a tudíž se nikdy nerovná nule. Bez ohledu na to, jaký je základ a , exponenciála vždy protíná svislou osu v hodnotě 1 (protože jakékoli číslo umocněné na nultou se rovná jedničce). Nemá periodická a její hodnoty se nikdy neopakují, ke každému x patří jednoznačně jediné y . Nemá žádný inflexní bod, tedy takové místo, kde se mění křivost z konkávní na konvexní (neboli tečna protíná křivku).

Čím je $a > 1$ větší, tím exponenciála roste strměji. Pro a menší než 1 exponenciála neroste, ale klesá.

S exponenciálou se obvykle spojuje překotný růst – je víceméně synonymem pro cokoli, čeho přibývá obzvlášť rychle. To je i není správná představa. Většinou odpovídá realitě: exponenciální růst míří vysoko. Klasickou ilustrací je dobře známá anekdota o vynálezci šachové hry, který požádal vladaře o zdánlivě skromnou odměnu: jedno rýžové (nebo pšeničné, podle toho, kde se to vypráví) zrnko za první políčko šachovnice a za každé další dvakrát tolik než za předchozí. Počet zrnků na každém políčku je tedy dán výrazem 2^x , políčka očíslovujeme od 0 do 63. Za první řádek šachovnice dostal vynálezce $1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 32 + 64 + 128 = 255$ zrnků. Potíže začnou při vstupu do druhé poloviny šachovnice, kdy množství rýže na jednom políčku poprvé překročí sto tun (počítáme-li asi 40 000 zrnků na jeden kilogram). Mezi 54. a 55. políčkem přesáhneme celou současnou roční světovou produkci rýže, což je kolem 500 miliard tun, a to nás pořád ještě čeká osm zdvojnásobení, čili vladař by musel mít k dispozici 256 zeměkouli. (V pověsti to ovšem vyřešil jeden jediný

popravčí meč. Tolik k obtížnosti převádění matematických konceptů do reality všedního dne.)

Na druhou stranu existují poměrně jednoduché matematické konstrukce rostoucí rychleji než exponenciála, například faktoriál, což je součin všech celých čísel až do daného čísla včetně, tak třeba faktoriál šesti (matematici ovšem říkají „šest faktoriál“ a značí to $6!$) je $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 = 720$. Faktoriál nakonec předběhne exponenciálu o jakémkoli základu, přestože graf několika prvních hodnot nám může mylně napovídat opak.

Kromě toho je dobré uvědomit si, že při malém kladném základu trvá exponenciále dost dlouho, než nabere dech a začne růst k nebesům, takže si ji např. při vyhodnocování experimentálních dat snadno spleteme s přímkou.

Exponenciální funkce je zajímavá tím, že její derivace je velmi podobná jí samotné. Což nebývá zvykem. Tak třeba derivace funkce kosinus je $-\sin x$. Derivace paraboly je přímka: $dx^2/dx = 2x$. Derivace přirozeného logaritmu je hyperbola: $d(\ln x)/dx = 1/x$. Ve všech těchto případech jde o funkci, která vypadá dost odlišně od té původní. Naproti tomu derivace exponenciály je zas exponenciála, jen vynásobená jakousi konstantou: $da^x/dx = k \times a^x$.

Funkce s takovou vlastností je bezvadná věc, protože když se vyskytne ve výše zmíněných diferenciálních rovnicích, znamenitě je zjednodušuje. A ještě lepší by bylo, kdyby se derivace exponenciály přesně rovnala jí samotné, tedy kdyby $k = 1$. Konstanta k závisí na základu a , je tedy potřeba najít takové a , pro které $k = 1$. Například pro $a = 2$ se k rovná $0,693$. Pro $a = 0,5$ je $k = -0,693$. (Zajímavé, že?) Pro $a = 100$ je $k = 4,605$.

Zkrátka, nebudu vás napínat, stejně jste to už uhodli. Konstanta $k = 1$ tehdy a jen tehdy, když

$$a = e = 2,718281828459045235360287471353\dots$$

Číslo e je základem výjimečné, speciální funkce, jejíž derivace se rovná jí samotné. A je to v celé matematice jediná funkce s takovou vlastností.

K číslu e jsme teď dorazili úplně jinou cestou. V předchozím případě se nám v souvislosti s úrokem objevilo jako limita jakéhosi výrazu, kde proměnná roste do nekonečna. Teď jsme ho objevili jako základ exponenciální funkce, která je v důležitém ohledu jiná než všechny ostatní. Mezi oběma pohledy neexistuje žádná zjevná souvislost.

Tím to ovšem teprve začíná. Mohl bych vám ukázat e jako součet rozmanitých nekonečných řad. Jako hodnotu řetězového zlomku. Mohli bychom si předvést jeho souvislost s číslem π . Mohli bychom se podívat na roli, kterou e hraje v teorii prvočísel. Mohli bychom dlouho hovořit o jeho roli ve statistice, například v normálním rozdělení. Mohli bychom zkoumat nejrůznější křivky ve sférických souřadnicích, třeba slavnou logaritmickou spirálu, a dívat se, kde se e vyskytuje ve vztazích, kterými jsou tyto křivky popsány. Odtud vede cesta k přírodním jevům, protože právě logaritmickou spirálu najdeme v ulitách měkkýšů i ve květu

slunečnice, v Mandelbrotově množině i ve tvaru ramen spirálních galaxií, také však ve zlatém řezu, a tedy v estetice.

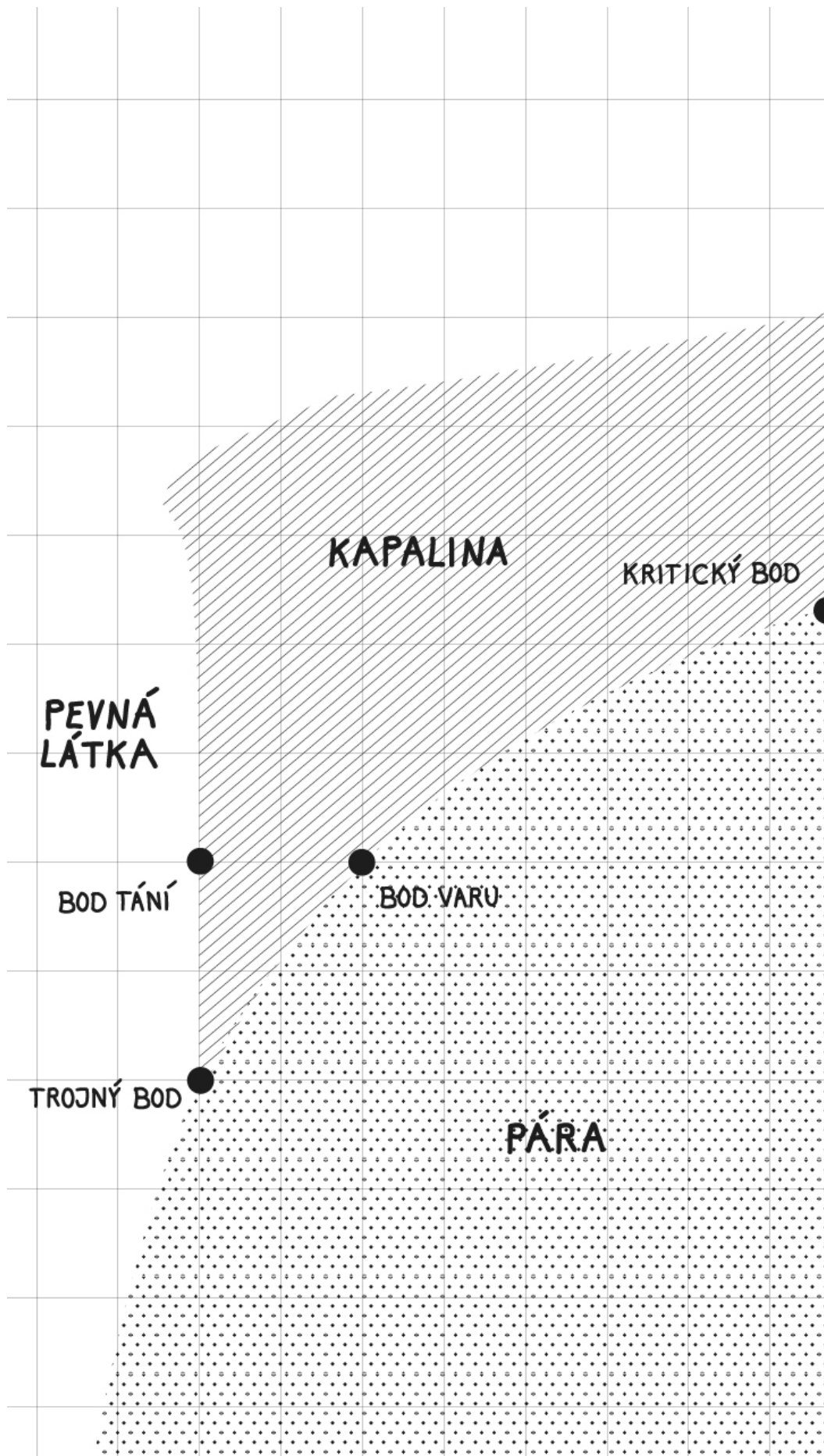
Stejně jako π je číslem kruhových věcí a dějů, e je číslem růstu. Číslo π je extrémně koncentrovaná informace o kružnici, kruhu a také o kouli, o rotaci, o všem, co se pravidelně opakuje a je tudíž periodické. Číslo e je podobně koncentrovaná informace o změně, její rychlosti a její hnací síle. V přírodních i společenských vědách se na tisících míst vyskytuje jednoduchá diferenciální rovnice (vlastně ta nejjednodušší myslitelná), kterou lze slovy vyjádřit takto: rychlost změny nějaké veličiny je úměrná množství této veličiny (s konstantou úměrnosti A).

$$\frac{dy}{dx} = Ay$$

Popisuje radioaktivní rozpad stejně jako plynulé úrokování (oba příklady jsme zde rozebrali), definuje, jak rychle chladne horký kov ve studené vodě. Řešením této rovnice je exponenciála $y = Ce^{rx}$, kde konstanta C zastupuje počáteční podmínku – říká, v jakém stavu byl zkoumaný systém na začátku. Tento jednoduchý vztah může vstupovat do dalších souvislostí, být součástí složitějších výrazů a je tak jedním z hlavních stavebních kamenů matematického modelování veškerého reálného světa. Exponenciály a a e jsou všude kolem nás. Celý svět kolem nás si neustále buď půjčuje na úrok, nebo ho od někoho či něčeho vybírá.

Voda

Nejpodivnější kapalina na světě



Kolem nás je spousta chemických látek. Anorganických i organických, prvků i komplikovaných sloučenin. Většinu z nich jsme zvyklí vidat v jednom jediném skupenství. Kovy, plastické hmoty, cukr a sůl jsou vždy pevné látky. Kyslík a oxid uhličitý jsou vždy plyny. Rtuť je vždy kapalná.

V extrémních podmínkách se to dá změnit. Můžete se zajít podívat k vysoké peci, jak vypadá tekuté železo; na rockový koncert, jak vypadá tuhý oxid uhličitý; do chemické laboratoře či leckam jinam na tlakové láhve s tekutým dusíkem a jinými plyny.

Existuje však jedna jediná látka, kterou můžete za běžných podmínek vidět ve všech třech skupenstvích. S kapalnou vodou, vodní párou a zpravidla i s ledem se potkáváme denně. To je jen jedna z mnoha vlastností, jimiž je voda výjimečná.

Dobře známá je takzvaná teplotní anomálie vody. Když běžnou kapalinu ochladíte pod její bod tání, začne tuhnout v nádobě odspoda. Stane se to s roztaveným plastem, kovem a čímkoli dalším. Voda však zamrzá, jak dobře víme, shora. Pokrývá se vrstvou ledu, který pak postupně tloustne směrem dolů. Proč? Protože led má menší hustotu než kapalná voda, plave na ní. Rozehříváním ledu se naopak objem zmenšuje a hustota roste, a to až do teploty 3,98 °C (za normálního atmosférického tlaku). Pak se teprve začne voda chovat jako všechny ostatní kapaliny a s teplotou zvětšovat objem.

Důsledkem je, že když mrzne, ke dnu klesne nejhustší – nejtěžší – voda a zachová si teplotu 3,98 °C. Shora ji kryje led. V této vodě u dna mohou přežívat organismy. To však není jediný důsledek této anomálie. Důležité je i to, že led zvětšováním svého objemu trhá skály a urychluje jejich zvětrávání, že kypří půdu a podobně. Celé to vypadá, jako kdyby někdo vodu pečlivě nadesignoval pro účely života, což je z hlediska filozofie vědy poněkud znepokojivé.

Svět jako dělaný pro nás

Antropický princip se vyskytuje ve dvou variantách. Silná verze říká, že celý vesmír je nastaven tak, aby v něm zákonitě musel vzniknout život. Zastánce silného antropického principu na vás pak mrkne a naznačí: ty parametry musel někdo nastavit, já samozřejmě nikoho nejmenuji, ale oba víme, kdo to asi tak mohl být... Silný antropický princip je nedokazatelný, nevyvratitelný a nepoužitelný jako praktické vysvětlení čehokoli. Je věcí filozofického pohledu na svět (viz [DÁBEL](#)) a náboženského přesvědčení.

Slabá verze antropického principu je zajímavější. Spočívá v požadavku, že každý vědecký pohled na svět musí obsahovat vysvětlení existence myslících bytostí – tedy přinejmenším nás. Kdyby náš svět životadárné vlastnosti neměl, pak bychom tu prostě nebyli a danou otázkou by se neměl kdo zabývat. To je úvaha, na které se dá stavět, pokud ji doplníme zobecněným konerníkovským názorem že nežijeme na žádném

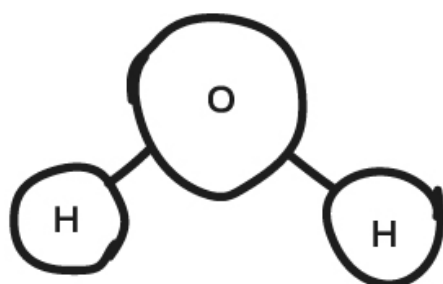
výjimečném místě vesmíru. Pak je totiž třeba, aby vědecké teorie obsahovaly naše místo k životu (planetu obíhající v přiměřené vzdálenosti od hvězdy, kapalnou vodu, dost času ve stabilních podmínkách, aby se život mohl evolucí vyvinout) jako velmi pravděpodobnou situaci, ne jako okrajovou výjimku.

Přesto je vyladění parametrů světa pozoruhodným fenoménem. Nejde zdaleka jen o teplotní anomálii vody. Fyzikové si daleko víc lámou hlavu s čísly, jako je poměr hmotnosti protonu ke hmotnosti elektronu, účinné průřezy jaderných reakcí (řada čísel pěkně sladěných tak, aby ve hvězdách mohly vznikat těžké prvky – viz [ČERNÁ DÍRA](#) a [FÚZE](#)) a leccos dalšího. Kdyby se byť jediná z těchto konstant změnila, vesmír by pořád existoval, my v něm však zaručeně ne.

Mimochodem, jedním ze způsobů, jak smést antropický princip ze stolu, je vysvětlit ho pomocí tzv. systematické chyby přeživších (survivorship bias). Ten patří mezi klasické omyly v uvažování. Pokládáme za normu víceméně úspěšné firmy, protože o těch, které zkrachovaly, se nedozvíme. Potkáme na univerzitě deset dobrých studentů z jedné střední školy a prohlásíme ji za vynikající – protože si neuvědomíme, že je jen velká a že většina jejích absolventů nijak neuspěla. Zkrátka, ztotožňujeme část souboru, který prošel nějakým výběrem, se souborem jako celkem. Aplikovat na vesmír se to dá za předpokladu, že existuje mnoho (například nekonečno) jiných vesmírů, kde to vypadá jinak, jenže tam my nežijeme. Filozoficky je teorie multiverza uspokojivá. Zda se dá převést na fyzikální rovinu a nějak ji testovat, to je docela jiná otázka. Zároveň je nutno připomenout, co by v této knize mělo správně být na každé straně: neumíme si vůbec představit, co nového zjistí přírodní vědy už za deset let. Natožpak třeba za tři sta.

Vodík a kyslík: podivné přátelství

Chemický vzorec vody je patrně jediný, na který si vzpomene úplně každý: H_2O . Mohlo by se jí říkat „oxid vodný“ (proč ne, když N_2O je oxid dusný), ale zní to komicky; ve všech jazycích se i v tom sebevědečtější kontextu používá běžné slovo pro vodu, nikoli něco jako dihydrogen monoxide.



Vodík je vůbec nejrozšířenější prvek ve vesmíru, kyslík je na třetím místě. Slučují se velice ochotně, takže voda nevyhnutelně musí být také velice běžná látka. Všude ve vesmíru ji zatím také nacházíme, na planetách, v asteroidech a kometách. Je na Měsíci i na Marsu. Co se však najít zatím nedaří a po čem se usilovně pátrá, to je voda v kapalném skupenství, protože jen ta by mohla být sídlem mimozemského života.

Zde se dostáváme k další anomálii vody. To, že je za běžných podmínek kapalná, není žádná samozřejmost. Látkou, která je vodě co do chemické struktury nejpodobnější, je sirovodík (H_2S , dnes už se mu správněji má říkat sulfan) – síra je v periodické tabulce přímo pod kyslíkem, což znamená, že jejich vlastnosti musí být podobné. Jenže sirovodík má bod varu $-60\text{ }^\circ\text{C}$, takže v kapalně podobě ho jen tak nevidíte.

Příčinou rozdílu je jedna speciální vlastnost kyslíku. Má mimořádně velkou schopnost přitahovat elektrony neboli elektronegativitu – jinými slovy, dokáže si k sobě v rámci molekuly stáhnout víc záporného náboje, než by mu příslušelo. Molekula vody má podobu trojúhelníka, úhel u kyslíku je trochu větší než pravý: měří $104,45$ stupně. Už sama přesnost, s níž se toto číslo udává, naznačuje, že molekula je tuhá. Částečný záporný náboj na kyslíku a kladné náboje na obou vodíkových atomech s ní ani nepohnou. (Na rozdíl od složitých organických molekul, jako jsou bílkoviny nebo DNA, kde vodíkové můstky často odpovídají za jejich prostorový tvar.)

Mají však jiný účinek. Molekuly vody se díky asymetrii náboje přitahují k sobě navzájem, vodík z jedné molekuly ke kyslíku z jiné. Vazba je o hodně slabší než ta, která drží pohromadě molekulu vody, avšak dost silná na to, aby zásadně ovlivnila vlastnosti jako bod tání, bod varu, hustota či viskozita. Molekuly vody prostě drží pohromadě. A díky tomu je na Zemi voda kapalná, zatímco sirovodík plynný: mezi elektronegativitou vodíku a síry je jen malý rozdíl, molekula proto není polarizovaná a vodíkové můstky nevzniknou.

Další důležitou vlastností vody, která je opět důsledkem vodíkových můstků, je její mimořádně velká tepelná kapacita. Abyste ji ohřáli, nebo dokonce přivedli k varu, musíte do ní vložit hodně energie. A naopak, chladnout bude pomalu – „drží teplo“. Etanol či benzín ohřejete dvakrát snáz než vodu (ale nedělejte to, rozhodně ne nad otevřeným ohněm!), kovy s výjimkou hliníku desetkrát snáz. Existuje však poměrně běžná látka, která má měrnou tepelnou kapacitu ještě o něco větší. Je to

amoniak, jedna z mála hypotetických biochemických alternativ k vodě. Možnost života (viz [ŽIVOT](#)) na bázi čpavku na chladných planetách je vysoce spekulativní, ale kdybyste nějakého méně upjatého biochemika opili nebo ho jinak vyvedli ze soustředění, možná by na chvílku připustil, že třeba nějak takhle by to být mohlo. Pak by to odvolal a hodně by se na vás zlobil.

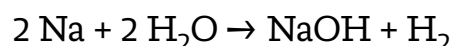
Díky velké tepelné kapacitě si oceány udržují dost stálou teplotu (na to má ovšem vliv také jejich obrovský objem a hmotnost). Teplota vzduchu, jehož tepelná kapacita je pětkrát menší, kolísá podstatně víc. Voda nám stabilizuje klima.

Voda má velké povrchové napětí a vykazuje kapilární efekt – opět za to mohou vodíkové můstky. Znamená to, že hodně tenkou trubičkou voda vzlíná vzhůru. Dělá to díky tomu, že její polarizované molekuly přilnou ke stěně trubičky a tím se vytvoří prohnutí hladiny – u stěny trubičky je hladina výš než uprostřed trubičky. Pod takto zvednutou hladinou je nižší tlak, což má za následek, že celý sloupec kapaliny vystoupí o něco výše. Efekt je tím výraznější, čím je trubička tenčí (protože tím menší hmotnost kapaliny se musí zvedat proti gravitaci). Díky kapilární elevaci nasávají rostliny vodu z půdy. Kromě toho se uplatní tehdy, když hadrem nebo houbou vysoušíte louži vody – čím je v materiálu víc pórů a čím jsou užší, tím lépe.

I destilovaná, tedy chemicky čistá voda trochu vede elektrický proud. Jakmile v ní však rozpustíte jakoukoli látku, která disociuje na ionty, například obyčejnou sůl, její vodivost prudce vzroste. To také souvisí s polárním charakterem molekuly vody.

Díky němu je voda také výborným rozpouštědlem, což má opět životadárné důsledky. Rozpouští všechny anorganické soli, rozpouští plyny, což má velký biologický význam hlavně v případě kyslíku a oxidu uhličitého. A také rozpouští ty organické látky, jejichž molekula je polarizovaná – jako bílkoviny, nukleové kyseliny, sacharidy či etanol. Naopak nerozpouští tuky a většinu uhlovodíků. Některé organické molekuly mají hydrofilní a hydrofobní část, takže voda je dokáže uspořádat do jednotné orientace. Takhle funguje mýdlo, saponáty a jiná odmašťovadla. Jejich hydrofobní konec na sebe naváže nečistotu, hydrofilní se připojí k molekule vody a nečistotu tak odnese pryč. A co je mnohem důležitější, fungují tak buněčné membrány.

Chemicky je voda hodně stálá, odtrhnout vodík od kyslíku je obtížné, ale existují výjimky. Možná jste při školní výuce chemie zažili efektní (a trochu nebezpečný – doma to nedělejte) pokus, při němž se do vody vhodí malý kousek sodíku. Sodík je lehký a hořlavý kov, který se ke kyslíku váže ještě ochotněji než vodík. Proběhne reakce:



Sodík prská, žíravý hydroxid stříká, vodík bublá ven, uvolňující se teplo lokálně přivádí vodu do varu a celá směs může díky přístupu vzdušného kyslíku začít hořet, nebo rovnou vybuchnout. Třeba experimentátorovi do očí – vážně to nedělejte. (Mimochodem, tenhle banální, až pubertální školní pokus má zajímavý a donedávna neznámý vnitřní mechanismus,

který před čtyřmi lety odhalil víceméně ve volném čase tým Pavla Jungwirtha z pražského ÚOCHB.) Stejně jako sodík se v takové situaci chovají i některé další kovy a polokovy – lithium, vápník, draslík. K průmyslové výrobě vodíku se používá vysokotlaká reakce zemního plynu s vodní parou (viz [YPRES](#)).

Bod tání a bod varu vody závisí na tlaku. To platí pro všechny látky, u každé z nich je však konkrétní podoba těchto závislostí jiná, často velmi složitá, což se vyjadřuje tzv. fázovým diagramem. Z fázového diagramu vody lze například vyčíst, že:

- při tlaku, jaký panuje na vrcholku Mount Everestu, vře při 68 °C, na vyšší teplotu tam kapalnou vodu nikdy neohřejete;
- při tlaku, jaký panuje na mořském dně, se může vyskytovat kapalná voda několik set stupňů teplá (viz [ŽIVOT](#)).

Nejnižší tlak, při kterém ještě může existovat kapalná voda bez ohledu na teplotu, je asi 600 Pa, tedy 0,6 % normálního atmosférického tlaku. Na povrchu Marsu se pohybuje tlak mezi 600 a 1100 Pa, kapalná voda by se tam teoreticky mohla vyskytovat ve velmi úzkém rozmezí teplot kolem 0 °C, hned pod touto teplotou by zmrzla, těsně nad ní by se vypařila – bod tání a varu se při snižování tlaku postupně přibližuje, až nakonec splyne v tzv. trojném bodě, kde je pevná, kapalná a plynná fáze v dokonalé rovnováze. Při tlaku pod trojným bodem už existuje v závislosti na teplotě jen led nebo pára. Při teplotách pod asi -70 °C už vodní led nesublimuje ani ve vzduchoprázdnu, takže asteroidy a komety bez atmosféry mohou obsahovat led, stejně jako se led může vyskytovat na Měsíci.

Desítky druhů ledu

Led sám o sobě je velice komplikovaná záležitost. Mnohé chemické látky se vyskytují ve více než jedné pevné formě (například uhlík – grafit a diamant), forem ledu je však obrovské množství a patrně ještě neznáme zdaleka všechny. Žádnou z nich naštěstí není „led č. 9“ z Vonnegutova románu Kolíbka (tuhý při pokojové teplotě, neuvážené zacházení s ním způsobilo konec civilizace), ale záhad je tu i tak dost.

„Našemu normálnímu“ ledu se odborně říká led Ih. Vedle něj mohou na Zemi existovat ještě dva další. Jedním je led Ic který vzniká za normálního tlaku při velmi nízkých teplotách v horních vrstvách atmosféry. Druhým je pak sporný led XI, na nějž se přemění led Ih při velice nízkých teplotách (kolem -200 °C), který však byl roku 1998 nalezen v Antarktidě za teploty, při níž by neměl existovat.

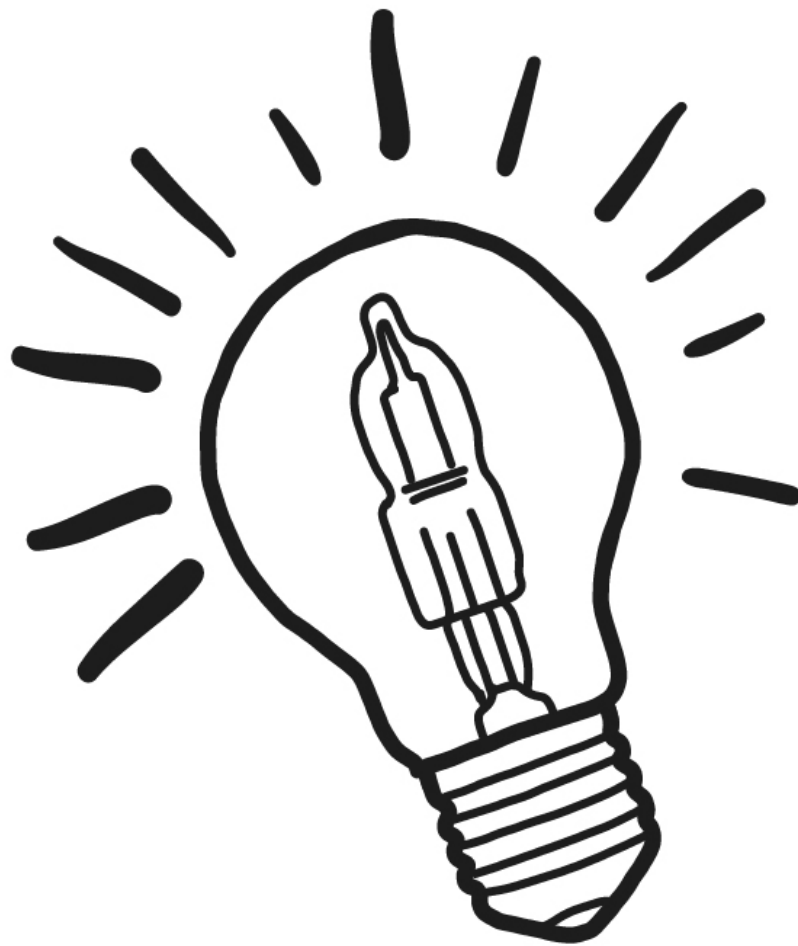
Četné další formy ledu jsou „doma“ v extrémních podmínkách – za mimořádně nízkých teplot, při mimořádně vysokém tlaku anebo při kombinaci obou faktorů. Rozdíly mezi jednotlivými typy ledu spočívají v jejich krystalové struktuře – každý z nich má mřížku uspořádanou

jinak. (Běžný led Ih krystalizuje v šesterečné soustavě, jak se lze přesvědčit pohledem na sněhovou vločku.)

Existují i amorfni, tedy nekystalické formy ledu („pevná voda“) a také tzv. superionický led (řiká se mu i superionická voda – oba názvy jsou zhruba stejně nevýstižné), kde krystalovou mřížku tvoří jen atomy kyslíku, zatímco atomy vodíku se mezi nimi volně pohybují jako elektrony v kovu. Superionický led byl připraven v laboratoři při extrémních teplotách a tlacích, mohl by se vyskytovat ve vesmíru – teoreticky stačí mít obrovskou kouli ledu, zvenčí dobře chlazenou, uvnitř kvůli vysoké hmotnosti, a tím pádem tlaku rozpálenou. To je možná výstižný popis planet Uran a Neptun, ale na důkazy budeme muset počkat.

Watt

Stručná poznámka o výkonu, příkonu, energii a práci.



Stroje mívají příkon a výkon. Příkon je množství energie dodané za jednotku času, výkon je množství práce vykonané za jednotku času. Příkon a výkon se měří ve wattech. Výkon je vždycky menší než příkon, pochopitelně, v opačném případě bychom měli perpetuum mobile (viz [ENTROPIE](#)).

Pojmy práce a energie mají jasně odlišený fyzikální význam, ale v běžném životě se používají libovolněji. Exaktně je to tak, že energie je schopnost konat práci, práce je množství předané či přeměněné energie. energii i práci měříme ve fyzice v jednotkách zvaných joule (J). Jeden joule je totéž co jedna wattsekunda (Ws). energii o velikosti jedné Ws spotřebuje zařízení, které má příkon jednoho wattu a je zapnuté po jednu sekundu.

V praxi potřebujeme mnohem větší jednotky. Například moderní úsporná žárovka mívá příkon 15 W. Když ji necháte svítit dvě hodiny, spotřebuje 30 Wh (watthodin) energie. Tisíc watthodin je jedna kilowatthodina (kWh), což je jednotka, kterou najdete na svém účtu za elektřinu. Cena za 1 kWh pro domácnost se u nás dnes pohybuje kolem 4 Kč.

[Průměrná spotřeba české domácnosti](#) činí asi 3500 kWh (neboli 3,5 MWh) za rok – je to však málo vypovídající číslo, protože rozptyl údajů je veliký (podle toho, zda jen svítíte, nebo elektřinou i topíte; podle toho, zda máte dům, či byt; podle počtu členů domácnosti, životního stylu atd.).

X

Matematika dlouho hledala praktický,
použitelný zápis úloh.

$$\sin x + \sin y = 2 \sin \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$$

Jakou lžici máš, tolik nabereš. Jaké výrazy ovládáš, tolik toho dokážeš říci. Platí to i v matematice, protože matematika je – svým způsobem – jazyk.

Dnes se běžně odvoláváme na matematické poznatky Babylóňanů a starých Řeků, poznatky staré někdy až 4000 let. Samozřejmě je zapisujeme v moderní podobě. Pýthagorovu větu známe i ve slovní formulaci („V pravoúhlých trojúhelnících čtverec na straně proti úhlu pravému rovná se čtvercům na stranách pravý úhel svírajících,“ což je znění z Eukleidových [Základů v českém překladu Františka Servíta](#) z roku 1907 a všimněte si, jak pěkně se Eukleidés i Servít obešli bez pojmů přepona a odvěsna – viz též [ZÁKLADY](#)), ale přednost určitě dáme algebraické formulaci $a^2 + b^2 = c^2$.

Ta se však stala součástí evropské vědy až v sedmnáctém století a samozřejmě součástí vzdělání až ve století devatenáctém. Algebra dnes pro nás je „tím počítáním s písmeny místo čísly“, což po tisíciletí nebyla. Zakladateli algebry jsou bezpochyby Babylóňané, kteří už za vlády Chammurapiho (1792–1750 př. n. l.) dovedli – jak to vyplývá z nalezených klínopisných tabulek – řešit kvadratické a také tzv. diofantické rovnice. Ty první jistě znáte, diofantické rovnice jsou takové, které mají víc než jedno řešení a řeší se v celých číslech. Příklad: máme jen dvoukoruny a pětikoruny, jakým způsobem můžeme zaplatit 21 korun?

Takové úlohy Babylóňané skutečně řešili, ale jinak, než bychom postupovali my. Nezapisovali rovnice, ale slovy formulovali postup – jako kuchařský předpis; a používali vždy konkrétní čísla, ne obecné symboly. Nadto počítali ve své šedesátkové soustavě.

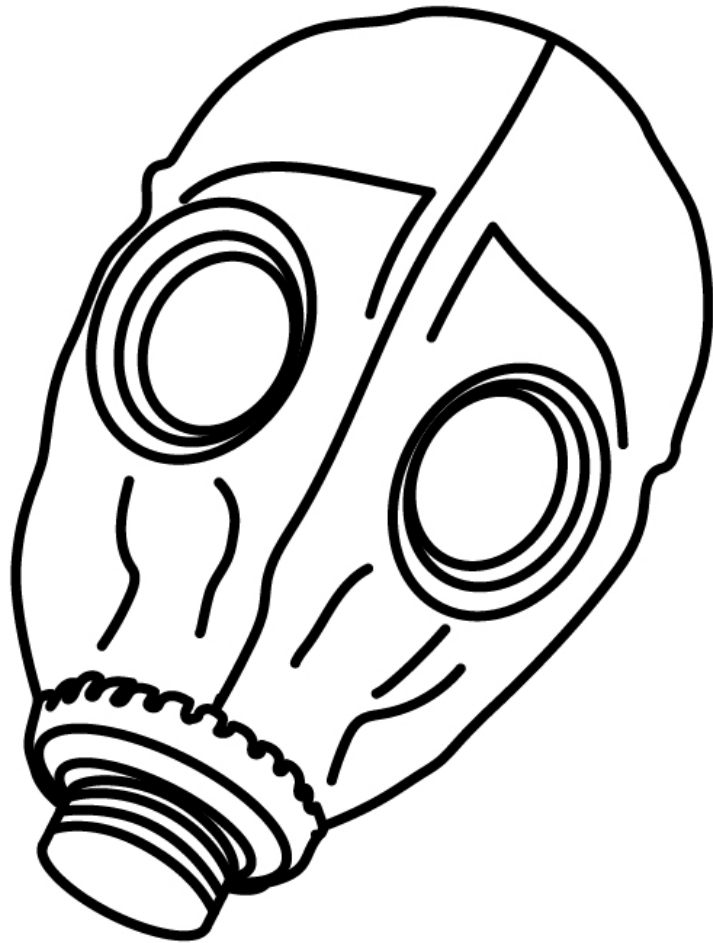
Na klínopisné tabulce z Chammurapiho časů se například [zachovala úloha](#): číslo je o 7 větší než jeho převrácená hodnota, jaké číslo to je? My bychom to zapsali jako $1/x + 7 = x$, což vede ke kvadratické rovnici s nepěkným neceločíselným řešením. Tady jsou zapotřebí hlubší znalosti dějin matematiky. Babylóňané používali pojem převrácená hodnota nejen pro $1/x$ jako my, ale také pro $60/x$, protože počítali v šedesátkové soustavě a protože k terminologické jednoznačnosti ještě muselo v Eufratu a Tigridu utéci hodně vody. Postup řešení pak začíná: vezmi sedmičku. Rozděli ji napůl, dostaneš 3,5 (v Babylónu ovšem 3:30, jako když dnes počítáme hodiny). Vynásob 3:30 krát 3:30 a dostaneš 12:15. Přičti k tomu 1:00:00, dostaneš 1:12:15. Z toho spočti odmocninu (ano, to Babylóňané uměli), dostaneš 8:30. Přičti k tomu 3:30, dostaneš 12. To je tvůj výsledek. Hledané číslo je 12, jeho převrácená hodnota (tj. $60/12$) je 5.

Nejde o to, abyste se naučili počítat „babylónsky“, ale abyste ocenili, oč je vše snazší, když máte jednoznačně definované pojmy, pohodlnou číselnou soustavu a symbol pro zápis neznámé veličiny. Nic z toho neměla ani evropská antika – římské číslice známe, Řekové psali číslice pomocí písmen abecedy (prvních devět písmen reprezentovalo číslice od jedné do devíti, druhých devět desítky od 10 po 90, třetích devět stovky od 100 po 900) a neznali nulu. Indové, Číňané a později Arabové vyřešili číselný zápis, ale úlohy dál zapisovali v konkrétních číslech a slovně. Tak tomu bylo i v Evropě zhruba do roku 1600. Teprve tou dobou začali různí myslitelé – Descartes, Leibniz, Newton, Viete – stanovovat pravidla

moderního symbolického zápisu. Tím také začal opravdový rozvoj matematiky, což není náhoda. A konvenci, že x označuje neznámou, dnes dodržuje každý kromě – matematiků. Ti, aby zdůraznili, že na symbolech nezáleží, že podstatná je abstraktní pravda někde daleko za nimi, si s radostí vymýšlejí jiná písmena. Včetně neexistujících. Také měl váš učitel rád „hlásku“ $fñ$?

Ypres

Pět bitev v Belgii a jeden muž, který pomohl miliony zahubit a jiné miliony zachránit.



Fritz Haber se narodil roku 1868 ve Vratislavi, tehdy samozřejmě německém městě, v zámožné a plně asimilované židovské rodině. Německo bylo tou dobou pro Židy asi nejprívětivější zemí světa, nebyli ničím omezováni – ani veřejným míněním ne – a měli otevřenou cestu ke kariérám ve všech oblastech života. Toho využil i Fritz. Ze svých mnoha nadání si vybral ke studiu chemii, jistě k potěšení rodiny, protože jeho otec byl mimo jiné majitelem menší chemické továrny. Pak svá studia dokončil na polytechnice v Curychu, tehdy (i dnes) jedné z nejlepších technických vysokých škol na světě. Pobýval tam o několik let dříve než Albert Einstein, takže se nepotkali – tehdy ještě ne. Později se však stali přáteli. Haber se věnoval akademické kariéře, putoval mezi univerzitami v německy mluvících zemích, sbíral zkušenosti a chystal se tak na objev, který změnil svět.

Haber-Boschův proces je asi nejpodceňovanější a nejméně známá z technologií, jež změnily svět. Zapsáno chemickou rovnicí jde o nesmírně jednoduchou věc: syntézu amoniaku (NH_3) z dusíku (N_2) a vodíku (H_2).

Amoniak neboli čpavek je nesmírně užitečná látka, především jako klíčová složka umělých hnojiv. V devatenáctém století se výrazně zvyšoval počet obyvatel Země a tomu odpovídala i poptávka po zemědělské produkci. Rostla velikost obdělávaných ploch i intenzita hospodaření, což se bez umělých, anorganických hnojiv neobešlo. Kde ale brát čpavek, zdroj dusíku? Jeho hlavním zdrojem byla těžba přírodního ledku (dusičnanu draselného), který se mimochodem hodil také k výrobě střelného prachu. Jenže propočty ukazovaly, že rostoucím potřebám nemohou světové zásoby ledku stačit. Tím se oživily obavy z malthusiánské pasti.

Thomas Robert Malthus (1766–1834) byl anglikánský duchovní s dobrým vzděláním z Oxfordu. Ve svých dvaatřiceti letech publikoval Esej o principu populace, text prezentující drasticky jednoduchou myšlenku: lidé se množí exponenciálním tempem, zatímco produkce potravin roste jen lineárně. Bez ohledu na konkrétní číselné parametry se tak musíme dostat do bodu, kdy nebude co jíst, ledaže bychom přijali důslednou kontrolu porodnosti.

Logika malthusiánské pasti je neúprosná. Dnes víme, proč v ní lidstvo neuvízlo: nové technologie zvýšily produkci potravin rychleji než lineárně a zároveň v bohatších společnostech poklesla porodnost vlivem přirozených preferencí. Když víte, že vám děti v kojeneckém věku nejspíš neumřou, nepořizujete si jich tolik a spíše investujete do jejich rozvoje a vzdělání. (Přesto ani dnes nejsou Malthusovy myšlenky zdaleka odepsané.) Na přelomu devatenáctého a dvacátého století se však o nedostatku ledku uvažovalo podobně jako dnes o nedostatku ropy či o klimatické krizi.

Napřed čpavek

Dusíku je všude kolem nás víc než dost – tvoří 79 % vzduchu. Vodík není naproti tomu ve vzduchu skoro žádný. Potíž s plynným dusíkem je ta, že je velmi netečný, těžko se dá přimět k jakékoli chemické reakci. Potíž s vodíkem je přesně opačná, je velice reaktivní a se vzdušným kyslíkem se okamžitě slučuje na vodu.

Vodík se průmyslově vyrábí tzv. parním reformingem zemního plynu. Z vodní páry a zemního plynu pod tlakem, za vysoké teploty a v přítomnosti kovových katalyzátorů vzniká směs oxidu uhelnatého a vodíku, tzv. vodní plyn, která se dá snadno rozdělit na složky. Potíže s vodíkem tím však zdaleka nekončí. Nesmí se dostat do styku se vzdušným kyslíkem, jinak hrozí výbuch. Obtížně se skladuje, protože se dovede v obrovském objemu rozpouštět v kovech. Nádrže a trubky pak křehnou a praskají. A co je vůbec nejhorší, ani jeho velká reaktivita sama o sobě neprobere dusík z netečnosti.

Právě do tohoto problému se zakouzl Fritz Haber a roku 1909 jej vyřešil – kombinací vysokotlakého zařízení a nových katalyzátorů. Jeho patent koupila firma BASF, jejíž výzkumník Carl Bosch dokázal Haberovu laboratorní syntézu převést do průmyslového měřítko. Těsně před první světovou válkou tak Německo jako jediná země světa disponovalo možností vyrábět amoniak v neomezeném množství. Využívalo ho spíše pro výrobu výbušnin než hnojiv (chemicky je to často skoro totéž), zejména poté, co západní mocnosti zablokovaly dovoz chilského ledku.

Potom chlor a yperit

Ypres je město v severozápadní Belgii nedaleko francouzské hranice. Leží na důležité přístupové cestě k přístavům Dunkerque a Calais. Německá armáda město obsadila, když na začátku války v rámci tzv. Schlieffenova plánu porušila neutralitu Belgie. Cílem Němců bylo vyhnout se francouzským opevněním a dobýt Paříž dřív, než Rusko na východě stačí mobilizovat. Ani jeden ze záměrů, jak známo, nevyšel a nastala dlouhá zákopová válka vyčerpávající obě strany.

V listopadu 1914 Spojenci dobyli Ypres zpět. Němci podnikli protiútok v dubnu 1915. Tato druhá bitva o Ypres vešla do dějin mimo jiné tím, kolik (pozdějších) nositelů Nobelovy ceny se do ní zapletlo.

Příběh se obvykle vypráví tak, že tím prvním byl Walther Nernst (Nobelova cena za chemii v roce 1920). Ač tou dobou už uznávaný (a padesátiletý) profesor, sloužil na frontě jako dobrovolník. Když viděl patovou situaci zákopové války, doporučil svým nadřízeným použití slzného plynu, jenž by protivníka vyhnal z pozic. Fritz Haber, se kterým generálové tento záměr konzultovali, navrhl něco lepšího: fosgen. Ukázalo se však, že ho není k dispozici dost, a Haber proto zvolil chlor.

Čistý chlor je žlutozelený plyn těžší než vzduch, zůstává proto při zemi a nerozptyluje se. Když ho vdechnete, sloučí se v dýchacích cestách

s vodou na kyselinu chlorovodíkovou a začne vám zevnitř leptat plíce. Totéž udělá se sliznicemi, s očima a s pokožkou.

Spolu s techniky ve firmě BASF vyřešil Haber otázku, jak zkapalněný plyn nejlépe aplikovat. Vítr byl příznivý, vál k nepřátelským liniím. Vypuštění 170 tun chlóru přihlíželi kromě Habera (Nobelova cena za chemii v roce 1918) také Otto Hahn (Nobelova cena za chemii v roce 1944), James Franck a Gustav Hertz (společná Nobelova cena za fyziku v roce 1925).

Plynu padlo za obět asi 5000 vojáků na straně Spojenců a také 12 Němců. Boje u Ypres pak pokračovaly po celý měsíc. Výsledkem bylo několik desítek tisíc mrtvých a posun fronty o několik kilometrů na západ. Město však Němci nedobyli.

U Ypres se pak svedly ještě tři další velké bitvy, než Spojenci konečně na podzim roku 1918 německou obranu prorazili. Nejničivější z nich byla třetí, známá též jako bitva u Passchendaele. Nepřinesla žádný zisk ani jedné válčící straně, vyžádala si však přes půl milionu životů. V této bitvě Němci použili novou bojovou látku, hořčičný plyn neboli yperit. Oproti chloru měl praktické výhody – dá se aplikovat jako aerosol, je méně unášený větrem, má zpomalený účinek a je sice méně smrtelný, ale spolehlivě vyřazuje vojáky z bojové činnosti. Jeho průmyslovou výrobu v Německu zavedli Wilhelm Lommel a Wilhelm Steinkopf pod vedením Fritze Habera.

V pozdějších fázích války začaly používat chemické zbraně všechny bojující strany, Němci v největší míře, což ovšem nepadá ani tak na vrub zdrženlivosti ostatních mocností, jako spíš toho, že německý chemický průmysl byl na tento úkol nejlépe připraven. Mimo jiné zásluhou Fritze Habera.

Nakonec Zyklon B

První bitva u Ypres byla také bojovým křtem vojína německé pěchoty Adolfa Hitlera. Po ní byl povýšen na svobodníka. Hitler se zúčastnil i bitvy u Passchendaele. V posledním roce války ho z bojů vyřadil právě útok britským yperitem. Dočasně po něm oslepl, byl hospitalizován, a než se uzdravil, bylo po válce.

Haber dopadl lépe, válku ukončil v hodnosti kapitána a bez zranění. Zaplatil však vysokou cenu jiného druhu; krátce po druhé bitvě u Ypres spáchala jeho manželka, povoláním rovněž chemička, sebevraždu. Zastřelila se Haberovou služební zbraní. Má se za to, že neunesla proválečný postoj svého manžela. Ten několik dní po její smrti odjel dohlížet na nasazení bojových plynů na ruské frontě.

Po válce zůstal Haber obhájcem chemických zbraní. „V míru patří vědec celému světu, za války své vlasti,“ řekl k tomu. Stal se ředitelem berlínského Ústavu fyzikální chemie a elektrochemie (dnes nese jeho jméno) Společnost BASF která vlastnila patenty spojené s Haber-

Haberova společnost vyráběla, která byla součástí německého koncernu IG Farben. Ve spolupráci s IG Farben vyvinuli vědci z Haberova ústavu pesticidy Zyklon A a Zyklon B. Bývalý svobodník Hitler mezitím zahájil úspěšnou politickou kariéru, ve které hrála velkou roli hrozba malthusiánské pastí. Bída válečných let se na psychice Němců podepsala. Nový Lebensraum, životní prostor, který Hitler sliboval, měl být především zemědělský. Němečtí sedláci usazení v Polsku a na Ukrajině – po odstranění původního obyvatelstva – měli především zajistit plnou potravinovou soběstačnost budoucího Německa. I tahle vize pomohla NSDAP k plnému převzetí moci.

Jedou z prvních věcí, kterou nacisté v roce 1933 zavedli, byl nový zákon o státní službě, který vykázal Židy z řady povolání včetně vědy a výzkumu. Habera se v této fázi ještě netýkal, neboť byl pokřtěn; bylo by na něj došlo až později. To sice nemohl vědět, ale každopádně na nic nečekal. Odstoupil na protest proti vyhazovu, který dostali jeho židovští kolegové. Z Německa, kterému věnoval vše včetně svědomí, odešel a krátce poté zemřel. Nestihl tak využít nabídky sionistického vůdce, budoucího prezidenta státu Izrael (a špičkového profesionálního chemika) Chajima Weizmanna, aby se ujal vedení nově zakládané vědecké instituce v Palestině.

Další činy bývalého svobodníka jsou dobře známy. Těm z nich, které obnášely využití plynu Zyklon B v průmyslovém měřítku, padli za obět mnozí příbuzní Fritze Habera. A s nimi miliony dalších.

Zelená revoluce

Chemické zbraně nebyly během druhé světové války na evropských bojištích nasazeny, přestože válčící země jimi disponovaly ve velkém množství. Použila je však japonská Kwantungská skupina armád v okupované Číně, a to velmi brutálně. Po druhé světové válce pokračoval jejich výzkum a vývoj v SSSR, na Západě i jinde, k většímu bojovému nasazení došlo hlavně v irácko-iránské válce v osmdesátých letech. Vývoj a výzkum bojových plynů, jejich detekce a obrany proti nim dál pokračuje a zřejmě jen tak neskončí. To lze pokládat za jedno z trvalých dědictví práce geniálního Fritze Habera.

Tím druhým je tzv. zelená revoluce, proces zprůmyslnění a zefektivnění zemědělství, který se naplno projevil krátce po druhé světové válce. Z chudých zemí odstranil aspoň tu největší bídu, na Západ přinesl víceméně luxusní život pro široké vrstvy obyvatel. A také nebláhé vedlejší důsledky, hlavně v podobě poškozeného životního prostředí. Bez Haber-Boschovy syntézy a následné výroby umělých hnojiv by svět se sedmi miliardami obyvatel byl světem hladomorů.

Jestli nám to někdo někde sčítá, Fritz Haber musel představovat hodně tvrdý oříšek.

Ytterby

Sedmnáct prvků, bez nichž se neobejdou
moderní technologie.

Anglicky se jim říká „rare earths“, tedy vzácné zeminy, a to je špatně nadvakrát: nejsou to zeminy (ať už tím slovem míníme cokoli) a nejsou nijak zvlášť vzácné. Český termín – kovy vzácných zemin – je správný aspoň napůl. Většina z nich spadá, exaktně řečeno, do skupiny lanthanoidů, tedy prvků následujících v Mendělejevově periodické tabulce (viz [ASTAT](#)) za lanthanem. K nim se kvůli podobným vlastnostem připočítávají ještě další dva, skandium a yttrium.

Všech sedmnáct prvků, jež do této skupiny řadíme, jsou skutečně kovy. Většinou se podobají stříbru, jak vnějším vzhledem, tak tím, že jsou měkké a tažné. Jsou však asi o třetinu lehčí než stříbro, ale ne zas úplně lehké jako třeba hliník – hustotou se zhruba podobají železu. Některé z nich můžete vidět jen ve skleněné nádobě ponořené v oleji – na vzduchu by okamžitě oxidovaly, v jednom či dvou případech dokonce vzplály (hoření je totéž co oxidace, jen probíhá rychleji, viz [VODA](#)). Jiné odolávají vzduchu i vodě.

Skoro všechny jsou nesmírně užitečné pro své překvapivé a unikátní vlastnosti, ať už v čisté formě, anebo ve sloučeninách: dovedou zásadně změnit vlastnosti slitin, slouží jako katalyzátory, dělají se z nich extrémně silné magnety, neobejde se bez nich výroba laserů a počítačových displejů, hodí se líp než co jiného pro vysokokapacitní baterie. Jejich přidáním do skla se dají zásadně ovlivnit jeho optické vlastnosti. Jejich užitečnost rozpoznáváme až v poslední době a pravděpodobně o ní ještě nevíme všechno. Jinými slovy, jsou to typické materiály jednadvacátého století. Hodí se pro technologie, které donedávna neexistovaly. Tím pádem se o kovech vzácných zemin dřív neuvažovalo jako o strategicky významných surovinách. Jenže to se teď změnilo.

Kouzlo orbitalu f

Nepřesné názvy mívají historické důvody. Původ označení „vzácných zemin“ spočívá v tom, že je geologové začali objevovat koncem 18. století v minerálech, které do té doby neznali.

Proč je neznali, to souvisí se strukturou atomů těchto prvků, jež byla ovšem objevena a popsána až ve dvacátém století. V periodické tabulce jsou prvky seřazeny podle počtu protonů v jádru atomu (viz [BOHRŮV MODEL ATOMU](#)), a tím pádem také podle počtu elektronů obíhajících jádro – kvůli vyrovnání elektrického náboje musí být oba počty stejné. Po řadě tedy jde vodík s jedním protonem, helium se dvěma... až lanthan s pořadovým číslem 57. Tam se cosi zásadního mění: atom už vyčerpal tři různá místa, kam umístit další a další elektrony (odborně se těm místům říká orbitály) a začíná obsazovat čtvrté, takzvaný orbital f. (První tři, pokud by vás to zajímalo, se označují písmeny s, p a d.)

A zapojení orbitalu f má své důsledky. Fyzikové by vám vyprávěli o energetických hladinách – a nemuselo by to být nezajímavé –, zde nám ale postačí konstatovat, že kvůli tomuto novému faktoru ve struktuře

atomu se všechny kovy vzácných zemin velmi podobají jeden druhému. Jsou něco jako různé dialekty téhož jazyka. Je velice obtížné oddělit je od sebe navzájem, získat čistý kov – dodnes, natožpak před dvěma sty lety. Dá se říci, a opět je to nadsázka, že kovy vzácných zemin špatně rozeznávají i samy sebe navzájem. Drží se pohromadě v týchž minerálech, jako by šlo o rudu jediného kovu.

A drží se tak od stvoření světa, tedy od zformování planety, ať se zemská kůra přeskupovala jakkoli. Tím pádem o nich platí „všechno, nebo nic“. Na několika místech světa jsou jejich bohatá naleziště – všech, nebo skoro všech pohromadě.

Elektronové orbitaly, nudná a nesrozumitelná partie středoškolské fyziky, tak mají zásadní vliv na dnešní geopolitickou rovnováhu.

Erbium, terbium, ytterbium a yttrium

K prvnímu objevu kovů vzácných zemin došlo ve Skandinávii, konkrétně v živcovém lomu u vesnice Ytterby, jež se nachází na jednom ze spousty ostrovů u Stockholmu. Výzkumem tamních minerálů se proslavil Johan Gadolin, profesor univerzity v Åbo, dnešním finském městě Turku. On a jeho následovníci v rudě z Ytterby postupně našli sedm nových prvků, jež se jmenují yttrium, ytterbium, terbium, erbium (a tady jim došla jak písmena, tak odvaha použít „rbium“), následovalo tedy holmium (podle Stockholmu), thulium (podle Thule, jména ze severských mýtů) – a nakonec přišla, celkem právem, řada i na gadolinium. Sedm nových prvků z jediné malé lokality, to je rekord periodické tabulky! A volněji k nim lze přiřadit ještě skandium (pojmenované po Skandinávii) nalezené ve stejném druhu minerálu, byť z jiné lokality.

Devatenácté století nemělo pro žádný z nových kovů použití – tím spíš, že jejich získávání ze sloučenin tvořících minerály bylo (a pořád je) velmi pracné, výtěžnost malá a oddělování jednoho čistého kovu od druhého vyslovená noční můra.

Jak jsme si už řekli, dnes je situace odlišná. Nepřesně, ale stručně se dá shrnout dvěma větami: více než devadesát procent světové produkce kovů vzácných zemin kontroluje Čína.

Jeden zdroj pro celý svět

Čím byl kdysi lom v Ytterby, tím je dnes obří těžební komplex v Paj-jün-e-po (Baiyun-Obo, Bayan Obo, používají se i další transkripce) v čínské autonomní oblasti Vnitřní Mongolsko. Roční produkce komplexu představuje asi 130 000 tun kovů. Za zmínku stojí, že těžba a hlavně separace kovů vzácných zemin představuje velkou zátěž pro životní

prostředí kvůli použití koncentrovaných kyselin, obrovskému množství polétavého prachu a kvůli tomu, že malá, ale nezanedbatelná část odpadu ze separačního procesu je radioaktivní. Pokud by se těžba a separace měly provozovat podle západních ekologických standardů, byly by kvůli ochranným opatřením mnohem dražší.

Kovy vzácných zemin jsou tedy přece jen vzácné. Ne proto, že by jich na zeměkouli bylo málo. V zemské kůře se nacházejí v množství srovnatelném s běžnějšími kovy. Vzácnými je dělá jejich obtížné a drahé dobývání. Čína v něm má oproti Západu konkurenční výhodu, která spočívá v rozlehlosti území i relativní lhostejnosti k bezpečí pracovníků a k budoucí ekologické zátěži. Nic z toho by Západ u sebe nechtěl. Čínské materiály však chce a nad jejich původem ochotně přimhouří oko. Dokud může. Dokud má nad čím.

Čínský vůdce Si Ťin-pching má v kovech vzácných zemin silnou kartu. Zatím ji v obchodním přetahování s USA nevynesl, jen připomněl, že jí disponuje. Opakovaně řekl, že by Čína mohla na vývoz těchto materiálů uvalit kvóty či cla. Jako každé jiné opatření obchodní války, i tohle by bylo dvousečné. Ale čínský monopol na kovy vzácných zemin je silnější, než jakým disponuje třeba Rusko u vývozu zemního plynu do Evropy.

Dražší surovina znamená nové dodavatele

Omezení nabídky surovin vede k růstu ceny – a ten má za následek, že těžba někde jinde, dosud neekonomická, se stane výhodnou. Existují výjimky, ale kovy vzácných zemin mezi ně nepatří. Jejich velká ložiska jsou k dispozici na mnoha místech světa, především v Austrálii, na Novém Zélandu, v Indii, Rusku, na Ukrajině a také v USA. Kromě toho se dají téměř beze ztrát recyklovat a různě po světě – zejména ve vysoce rozvinutých zemích – jsou už v provozu výnosné závody, které se takovou recyklací zabývají. Další možností je těžba z mořského dna, se kterou se už experimentuje v Japonsku, a extrakce z elektrárenského popela po spálení uhlí.

Hlavní americkou produkční kapacitou kovů vzácných zemin je důl v Mountain Pass v Kalifornii. Jeho provozovatel, firma Molycorp, roku 2015 zkrachoval, protože neobstál v soutěži s Číňany. Nový vlastník, společnost MP Materials, už pracuje na obnovení produkce a podle [článku v časopisu Scientific American](#) ji chce zahájit v roce 2020, a to bez ohledu na případná čínská opatření – věří tedy ve vlastní konkurenceschopnost na otevřeném trhu. Toho se dá prakticky dosáhnout jen nasazením nových technologií, jimiž Čína zatím nedisponuje. To by mělo v Pekingu vyvolat starosti.

Až se bez nich obejdeme

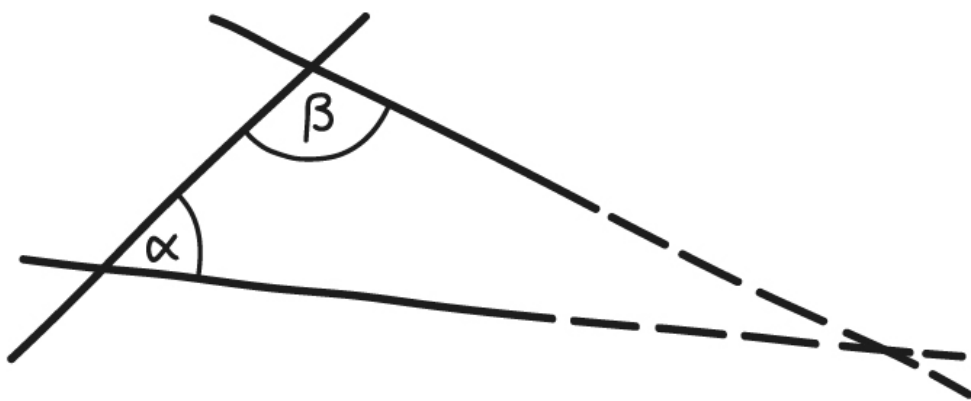
Některá využití kovů vzácných zemin navíc upadají, protože je lze nahradit jinými technologiemi – účinnějšími, levnějšími nebo splňujícími obě tato kritéria.

Tato cesta je ostatně jediná možná, protože surovinovou náročnost moderní elektroniky a dalších hi-tech výrobků bude tak jako tak nezbytné omezit z energetických důvodů. Uvádí se, že například každý iPhone v sobě obsahuje 75 prvků Mendělejevovy tabulky. I když odečteme ty banální – vodík, kyslík, dusík, křemík, uhlík –, zbude dost a dost takových, které je potřeba těžít, extrahovat, čistit a dopravit do továrny. To všechno spotřebuje mnoho energie, dnes převážně ve formě fosilních paliv. Brzy to bude těžce zdaněný luxus. Doba kamenná neskončila kvůli nedostatku kamení, ale nejedna starověká civilizace, jak dnes bezpečně víme, došla na to, že si vykácela stromy anebo jinak zničila životní prostředí.

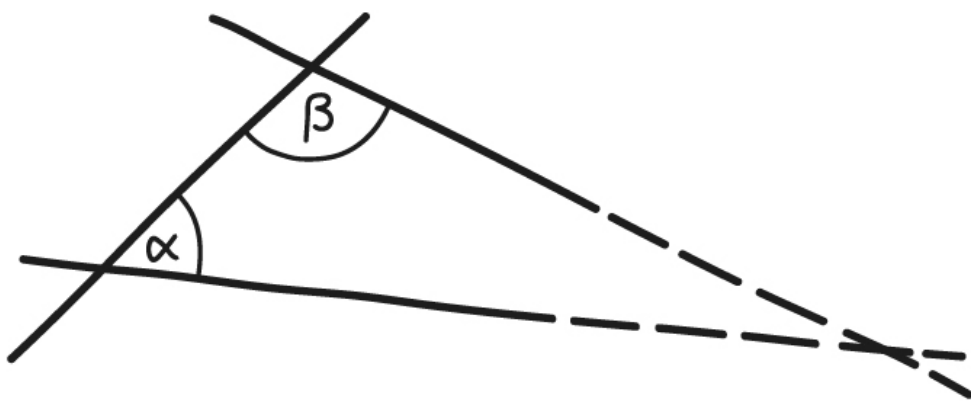
To je širší kontext dnešního geopolitického boje o kovy vzácných zemin. Státy, které se chovají jako surovinoví vyděrači, zatím z dlouhodobějšího hlediska vždy prohrávají. Svět má dost možností, jak je obejít, jak s nimi nemuset bojovat. Skutečnou pákou Číny, její narůstající silnou stránkou v ekonomické konfrontaci se Západem, nejsou ani suroviny, ani levná pracovní síla, ale nové technologie, schopnost je bleskurychle využít a odlišné etické či ekologické standardy.

Základy

Matematika dlouho hledala praktický,
použitelný zápis úloh.



Máte právo na vlastní názor, zda se rovnoběžky protínají v nekonečnu, anebo ne.



Nakreslete si přímku. Máte? Kousek od ní nakreslete bod. Podívejte se na obrázek a odpovězte na otázku: kolik rovnoběžek k dané přímce můžete vést daným bodem?

Nehleďte v tom chyták. Pro každého normálního člověka – a za běžných okolností i pro každého matematika – zní očividná odpověď, že jednu. Háček je však právě v tom, že ta odpověď je očividná.

Na obrázku před sebou máte grafické znázornění tzv. pátého Eukleidova axiomu. O Eukleidově životě toho moc nevíme. Žil v Alexandrii v dnešním Egyptě za vlády Ptolemaia I., tedy na přelomu čtvrtého a třetího století před naším letopočtem, na vrcholu helénské civilizace – neboli v jedné z metropolí tehdejší hlavní supermoci. Tedy na správném místě, pokud jde o intelektuální život. Díky tomu se také zachovalo jeho dílo. Měl dostatek žáků a následovníků, kteří se o to postarali.

A jde o dílo, z něž matematika žije dodnes. Známe ho pod jednoduchým názvem Základy. Na antickou knihu jsou Základy pořádně objemné, moderní vydání mívají přinejmenším 300 stran. Eukleidés v nich postavil geometrii, do té doby spíš praktickou dovednost než vědu, na abstraktní axiomatický základ. To především znamená, že ji co nejvíc oddělil od názorné představy. Právě takový obrázek, jaký jsem vás donutil představit si, by Eukleidés pokládal za matoucí, nesprávný, a dnešní matematika s tím plně souhlasí. Kreslit se nedá přesně, obrázky mohou klamat, je zapotřebí přejít od nich k ryze abstraktním, idealizovaným strukturám.

Co rozumějí matematici formulací „postavit na axiomatický základ“? Eukleidés sepsal geometrická tvrzení v takové formě, aby se od jednoho k druhému dalo přecházet logicky jasnými a prokazatelnými kroky. Taková metoda vyžaduje, aby se některá tvrzení přijímala bez důkazů, aby prostě bez diskuse platila. Těm se říká postuláty neboli axiomy. Čím méně jich je, tím lépe.

Eukleidés si vystačil s pěti. Čtyři z nich jsou bezproblémové (uvádím je v moderní formulaci). S pátým je potíž.

1. Dvěma body lze vést přímku.
2. Přímku lze neomezeně prodlužovat.
3. Ze zadaného středu lze vždy narýsovat kružnici se zadaným poloměrem.
4. Všechny pravé úhly jsou shodné.
5. Rovnoběžky jsou všude stejně vzájemně vzdáleny.

Pátý axiom pracuje s nekonečnem, což je v matematice ošidný prvek dodnes; v Eukleidových časech byl pokládán hlavně za zdroj podezřelých paradoxů (jistě znáte potouchlý Zénónův příběh o Achillovi a želvě, viz též [RADA](#)).

Přímky jsou nekonečné. Víme jistě, co se děje s rovnoběžkami v nekonečnu? Co kdybychom proložili týmž bodem druhou přímku

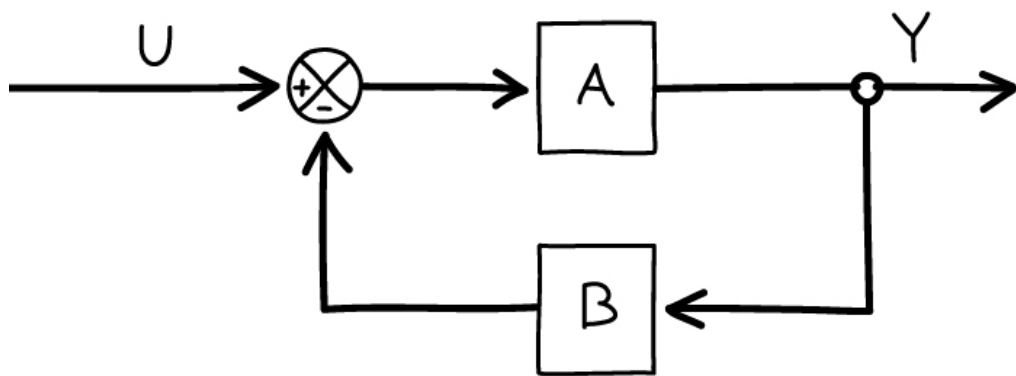
a pootočili ji o maličký, nepatrný – *nekonečně* malý – úhel? Je pak ještě totožná s tou první, nebo není? Protne se s ní někde, nebo neprotne? Když doopravdy kreslíme, není co řešit: protne. Když pracujeme s abstraktními objekty... s tím si matematici lámali hlavu přes dva tisíce let.

Druhá potíž spočívala v tom, zda je pátý axiom opravdu axiomem. Nedal by se odvodit z těch ostatních? Tím by se elegantně vyřešila i otázka jeho platnosti. Z axiomu by se stala věta a měli bychom její důkaz.

Průlom přinesli v devatenáctém století Bolyai, Lobačevskij a především Bernhard Riemann. Ukázali, že eukleidovská geometrie je jen jednou z mnoha možných a že k hlavním rozdílům mezi nimi patří právě pátý axiom. Geometrie na kouli místo v rovině (velmi užitečná pro tvory žijící na kulaté planetě) neobsahuje pátý axiom. Geometrie na hyperbolických plochách také ne. Ta je zase vhodným zobrazením tzv. Minkowského prostoročasu, tedy našeho vesmírného domova v širším měřítku (viz [RELATIVITA](#)). Existují formálně správné a velmi užitečné matematické struktury, které v lecčems eukleidovskou geometrii připomínají – až na to, že body a přímky v nich vypadají docela jinak, pokud tedy slovo „vypadat“ v tomto kontextu ještě něco znamená. Eukleidés měl pravdu: cesta k rozvoji matematiky vede přes odhození názorných představ.

Zpětná vazba

Čeho je moc, toho bude méně.



Těžko vymyslet přízemnější, ale i běžnější příklad zpětnovazebního mechanismu, než je nádržka splachovacího záchodu. Existují různé typy splachovacích zařízení, všechny však plní stejnou úlohu: naplnit nádržku po spláchnutí a pak zas přivod vody zavřít.

Hlavní součástí standardního, po staletí ověřeného mechanismu je plovák spojený s pákou, která otvírá a zavírá přívodní ventil. Po spláchnutí plovák klesne spolu s vodní hladinou do spodní polohy, tím otevře přívod vody, ta přiteče a plovák znovu zvedne. Když se dostane do horní polohy, páka vodu zavře. Dnes se častěji používají kompaktní koncentrické ventily, které zabírají méně místa, jejich princip je však stejný, jen u nich plovák nevidíte, nachází se uvnitř svislé trubky.

Nedalo by se to řešit jinak? Co třeba po spláchnutí pustit vodu na přesně stanovený čas vypočtený tak, aby se nádrž naplnila? Mechanicky by takové řešení bylo jednodušší, obešlo by se bez pák a plováků. Háček je v tom, že tlak přívodní vody kolísá, není vždy stejný. Proto při napouštění musíme měřit skutečný stav hladiny a podle něj řídit přítok. Jen tak zaručíme, že nádržka nikdy nepřeteče.

Podobným, velmi slavným vynálezem je Wattův odstředivý regulátor, kterým se stabilizují otáčky parního stroje. Stroj pohání svislou hřídel. Na té jsou připevněna na pohyblivých ramenech dvě závaží. Čím rychleji se hřídel točí, tím výš se závaží zvednou vlivem odstředivé síly. Pákový mechanismus, vcelku podobný tomu ve splachovací nádržce, přenesse jejich výchylku na ventil regulující přívod páry: když jsou závaží vysoko, pára se přivře a otáčky se sníží. Když klesnou naopak příliš nízko, otevřou tím přívod páry víc a otáčky zas stoupnou. U dobře seřízeného mechanismu se nakonec otáčky ustálí na hodnotě, která se dá nastavit tím, jak těžká jsou závaží.

Proč ventil nenastavit na stálou hodnotu? Z podobného důvodu jako u splachovače. Tlak páry přicházející z kotle kolísá. U parního stroje navíc může kolísat zátěž na hřídeli (představte si, že stroj třeba pohání míchačku, která jednou míchá řidší, jednou hustší beton). Wattův regulátor udržuje stále otáčky v nestálém prostředí.

Třetím příkladem téhož principu je termostat. Nastavíte požadovanou teplotu. Termostat měří skutečnou teplotu, vypočítá rozdíl a podle toho vyšle signál topnému nebo chladičímu zařízení.

Záporná je dobrá, kladná je špatná

Každý zpětnovazební mechanismus můžeme popsat jednoduchým schématem. Jeho středobodem je veličina, kterou chceme regulovat: výška hladiny v nádrži, otáčky parního stroje, teplota v místnosti.

K dispozici máme jinou veličinu, kterou můžeme ovládat: přítok vody, přívod páry, výkon topení. Mohli bychom to dělat ručně, kroucením

nějakého knoflíku, ale to právě nechceme – snažíme se proces automatizovat.

Což se dá udělat takto: měříme regulovanou veličinu. V uvedených příkladech k tomu slouží postupně plovák, závaží a teploměr. Její hodnotu porovnáváme s tou hodnotou, které chceme dosáhnout. U splachovacího zařízení je požadovaná hodnota dána délkou páky plováku, u odstředivého regulátoru hmotností závaží, u moderního termostatu to je nastavitelná číselná hodnota v maličkém počítači, jímž je termostat řízen.

Rozdíl mezi aktuální a požadovanou hodnotou regulované veličiny se předá na vstup celého systému, tedy do toho místa, kde se dá „kroutit knoflíkem“. Když se parní stroj točí rychleji, než odpovídá přednastaveným otáčkám, regulátor přivře páru. Když chcete mít v bytě jednadvacet stupňů, a teploměr naměří jen devatenáct, vyšle termostat pokyn k zapálení plynu a kotel začne topit. Termostat bude neúnavně dál měřit, a když se skutečná teplota vyrovná s požadovanou, vyšle opačný pokyn, takže kotel topit přestane.

Ve všech těchto příkladech, stejně jako v mnoha dalších, jde o tzv. zápornou zpětnou vazbu. Zvýšení hodnoty na výstupu vede ke snížení hodnoty na vstupu. Vyšší teplota – topit méně. Vyšší otáčky – přivádět méně páry. Záporná zpětná vazba stabilizuje hodnotu regulované veličiny.

Představte si, co by se stalo, kdyby kotel naopak topil tím více, čím větší teplo je v místnosti. Anebo kdyby parní stroj přidával páru s rostoucími otáčkami. To jsou příklady kladné zpětné vazby a je jasné, že taková je nežádoucí. Kladná zpětná vazba vede k tomu, že hodnota regulované veličiny stále roste (anebo klesá). Matematicky jde o neomezený růst, v praxi by byl v obou zmíněných případech ukončen výbuchem kotle (pokud jde o splachovací zařízení s kladnou zpětnou vazbou, zvažte důsledky sami). Jedním z mála praktických využití kladné zpětné vazby, tedy principu „čím víc, tím víc“, je jaderná bomba, což mluví samo za sebe.

Záporná zpětná vazba je tedy to, co udržuje jakýkoli systém v rovnováze: zvýší-li se hodnota na výstupu, zapne se tím mechanismus, který ji zas sníží. Kladná zpětná vazba působí opačně. Zvýšení hodnoty na výstupu systému aktivuje mechanismy, které ji dále zvyšují. Když se systém s kladnou zpětnou vazbou vychýlí z rovnováhy, bude se od ní odchýlovat čím dál tím víc.

Zpětnovazební regulace v technice může být složitější, nemusí se omezovat na počítání rozdílu mezi požadovanou a aktuální hodnotou. Častý je například požadavek, aby regulátor nereagoval na malé rychlé výkyvy nahoru a dolů – to se hodí třeba při automatickém spínání světel. Anebo naopak, aby na takové výkyvy reagoval bleskurychle.

To první se dá zařídit tzv. integračním členem (reaguje na součet odchylek za nějaký časový úsek, ne na okamžitou hodnotu), to druhé derivačním členem (reaguje na rychlost změny odchylky, ne na její velikost).

Tak vypadá klasická, předpočítačová průmyslová regulace realizovatelná mechanicky. Digitální technika její možnosti dál rozšířila. Regulátor může

pracovat s jakoukoli kombinací výstupních hodnot a na výstup předávat jakoukoli matematickou funkci, kterou z nich odvodí. Hodí se to například tam, kde regulovanou veličinu nemůžeme přímo měřit a musíme se spoléhat na přibližnou hodnotu či vysloveně odhad.

Co se řídí samo a co ne

Některé systémy potřebují přidaný regulátor – například zmíněný kotel. Jiné jsou samoregulační, mají v sobě zpětnou vazbu zabudovanou.

Princip zpětné vazby najdeme všude v přírodě, řídí se jím například systémy predátor–kořist (lišky sežerou mnoho zajíců, tím pádem nemají co jíst, tím pádem částečně vyhynou, nedostatek lišek dopřeje život více zajícům... a tak dále, systém se může, nebo nemusí stabilizovat – viz též [CHAOS](#)).

Složité systémy obsahují stovky a tisíce zpětných vazeb, jejichž analýza je obtížná. Tak například atmosféra Země je vybavena řadou mechanismů tvořících jak kladné, tak záporné zpětné vazby. Změna klimatu do těchto mechanismů zasahuje, zpravidla tak, že posiluje kladné zpětné vazby. Zesiluje tak sama sebe. Právě zpětnovazební mechanismy jsou tím, kvůli čemu jsou důsledky změny klimatu špatně odhadnutelné, a tím, co z něj dělá záludné nebezpečí. Situace prostě není taková, že malé změně na vstupu odpovídá malá na výstupu.

Jednou z kladných zpětných vazeb je vypařování. Čím vyšší teplota, tím víc vody se vypařuje z povrchu do atmosféry. Vodní pára je skleníkový plyn, takže čím víc vypařování, tím silnější skleníkový efekt, tím vyšší teplota, tím víc vypařování... a tak dále. Připomíná to zmíněný kotel, který topí tím více, čím je v místnosti tepleji.

Další zpětnou vazbou je snižování albeda čili odrazivosti. Bílý a lesklý polární led funguje jako zrcadlo. Vodní plocha, která ho po tání nahradí, pohlcuje teplo mnohem lépe. Tím pádem: vyšší teplota, více tání... Zejména v Arktidě je mořský led sezónní a výkyvy jeho množství během roku ztěžují měření. Úbytek je ale nesporný (koneckonců umožňuje otvírání nových mořských cest a dává vzniknout velkému geopolitickému boji o Arktidu). Stejně tak je nesporné tání pevninských ledovců v Antarktidě a v Grónsku.

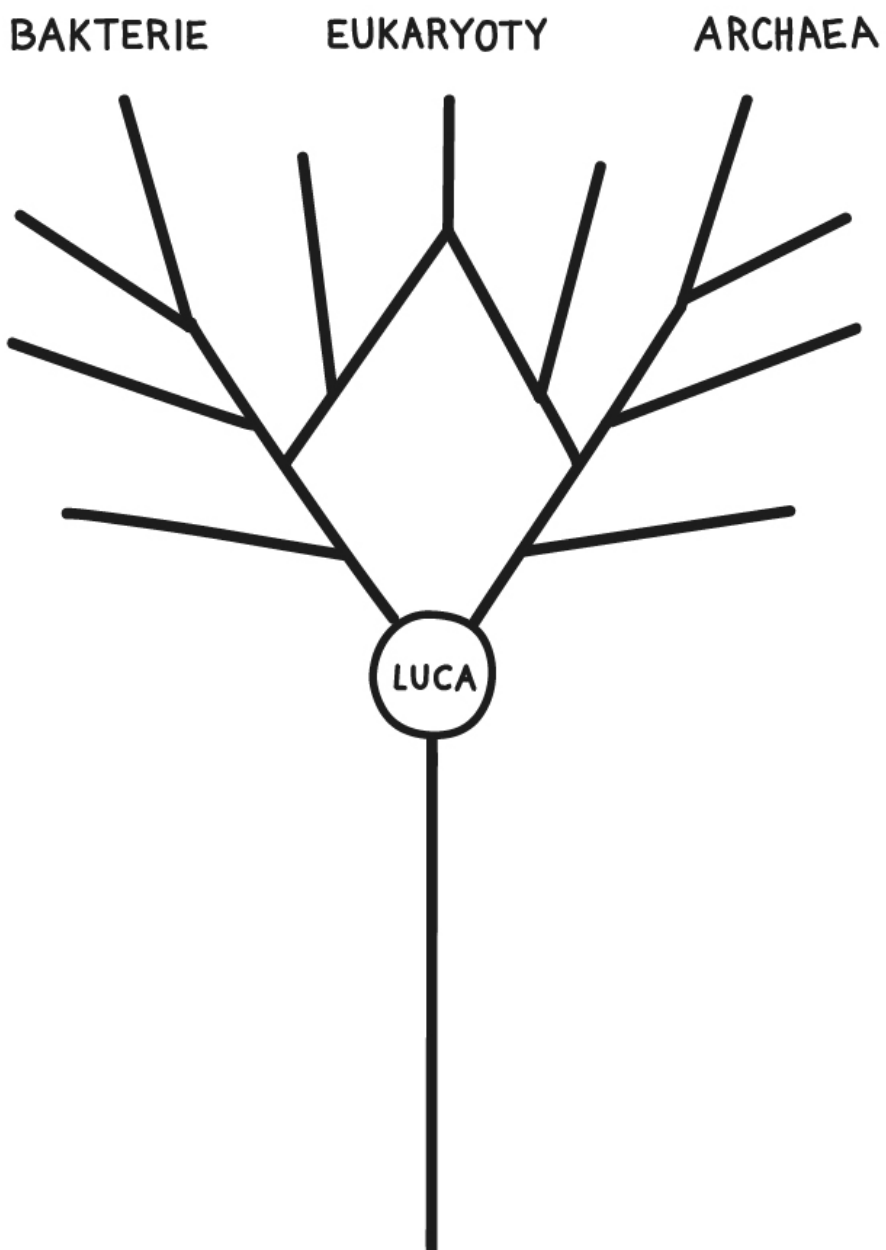
Velké lesní požáry, jichž kvůli horku a suchu citelně přibývá, uvolňují do atmosféry jak CO_2 , tak saze, které také přispívají ke skleníkovému efektu. Tající permafrost uvolňuje mnoho zadrženého metanu a CO_2 . Všechny tyto mechanismy způsobují, že tempo globálního oteplování není konstantní, ale zvyšuje se.

Zeměkoule však disponuje i zápornými zpětnými vazbami. Například dodatečný CO_2 v atmosféře je stále méně účinný, což se ale projeví až při vyšších koncentracích. Přírozenou zpětnou vazbou jsou zelené rostliny;

při fotosyntéze pohlcují CO_2 a využívají ho pro stavbu svých těl. Proto je masivní odlesňování dalším příspěvkem ke skleníkovému efektu.

Život

Největší záhadou života na Zemi je, odkud se na mrtvé planetě vzal.



Ta událost se odehrála téměř určitě dříve než před třemi a půl miliardami let, nejspíš dokonce o několik set milionů let dříve. Stáří Země je určeno – má se za to, že dost přesně – na 4,54 miliardy let. To znamená, že se život objevil hodně brzy. Dokládají to mikrofosilie a stromatolity, kamenné pozůstatky po dávných bakteriálních koloniích.

Jeden čas – asi před sedmdesáti lety – se zdálo, že o vzniku života mají vědci jasno, a ten pocit dodnes přežívá mezi popularizátory i v učebnicích, přestože je již prokázáno, že je neopodstatněný. Harold Urey a jeho tehdejší doktorand Stanley Miller se roku 1953 pokusili experimentálně napodobit atmosféru, jakou podle nich Země mohla mít před čtyřmi miliardami let. Do směsi vodní páry, amoniaku, oxidu uhličitého a metanu vysílali elektrické výboje (napodobující blesky). Směs stále cirkulovala, kondenzovala a opět se vypařovala. Po týdnu v ní našli organické látky – sacharidy a aminokyseliny. To vzbudilo nadšení – tajemství vzniku života se zdálo být vyřešeno. Aminokyseliny jsou stavebními kameny bílkovin a z bílkovin se skládá vše živé.

Pak se věci začaly komplikovat. Objev struktury DNA a pochopení významu genetického kódu změnily pohled na bílkoviny. Bez informace obsažené v DNA a bez složitého biochemického aparátu se z aminokyselin bílkovina nikdy nestane. Ještě větší problém vyvstal, když se ukázalo, že atmosféra mladé Země byla úplně jiná, než jak ji odhadl [Stanley Miller](#). Podle nových poznatků v ní převládal vedle oxidu uhličitého dusík, sirovodík a oxid siřičitý se stopovým množstvím metanu a vodíku. To je daleko méně nadějná směs; blesky z ní nevykřešou nic zajímavého.

A třetím, definitivním hřebíkem do rakve Miller-Ureyovy hypotézy (neboli teorie prvotní polévky, primordial soup) je úvaha o termodynamice života (viz [ENTROPIE](#)). Podmínkou sebeprimitivnějšího života jsou chemické reakce, které neproběhnou spontánně; musí je pohánět vnější zdroj energie. Pro [téměř veškerý současný život](#) na Zemi je tím zdrojem přímo či nepřímo sluneční světlo, které využívají fotosyntetizující rostliny k produkci organické hmoty. K tomu je však zapotřebí nesmírně složitý biochemický aparát, který spontánně a najednou vzniknout nemohl (viz [MITOCHONDRIE](#)). Vznikající život musel používat něco mnohem jednoduššího.

Peklo a ráj na dně moře

Většina dnešních teorií umísťuje vznik života na mořské dno do blízkosti hydrotermálních prúdů. Jsou to trhliny v mořském dně, kde voda přichází do styku se žhavým magmatem. V hloubce oceánu je vysoký tlak, a protože bod varu s tlakem stoupá, může se zde voda přehřát vysoko nad 100 °C, a přesto zůstat kapalná. Teplotní rozdíl mezi horkou vodou a chladným oceánem slouží jako hnací síla a umožňuje chemické reakce, které by bez přísunu energie neproběhly. K dispozici jsou rovněž dvě klíčové chemické suroviny: oxid uhličitý a vodík. Spolu s nimi tam je

menší množství dalších užitečných látek: metan, sirovodík, železo a síra, to vše z hlubin Země.

Průduchy také dávají vzniknout minerálům s jemnou porézní strukturou. Právě to je klíčem k současným představám o vzniku života. Potřebné suroviny spolu mohou reagovat do alelujá, ale nic složitějšího z nich nevznikne, protože se výsledky reakce okamžitě s vodou odplaví pryč. Ledaže by byly uzavřené do malého prostoru. U dnešních živých věcí je tím malým uzavřeným prostorem buňka. Kdysi dávno, na samém počátku, to mohla být komůrka ve vápenatém minerálu. Tím spíš, že jejich zrnitost rozměrům buněk odpovídá. První extrémně primitivní buňka nejspíš vznikla v kamenné zkumavce.

Dnešní vědci mají poměrně dobrou představu o tom, jak v takovém prostředí postupnými reakcemi mohly vzniknout složitější organické látky předcházející bílkovinám a nukleovým kyselinám. Biochemický stroj života se skládá z mnoha koleček a nemusel – ani nemohl – vzniknout celý najednou. Existují však schůdné hypotézy o tom, jak se kolečka mohla skládat a vylepšovat postupně.

Všichni máme společnou prababičku

Biologie totiž pokládá za prakticky jisté, že život na Zemi vznikl jen jednou. Proto má smysl ptát se po organismu, který byl posledním společným předkem veškerého nynějšího života na Zemi. Používá se pro něj název LUCA, [Last Universal Common Ancestor](#).

Existence společných předků je nutným důsledkem Darwinovy evoluční teorie (viz [samostatné heslo](#)). Pro názornější představu: tvory, kteří jsou nám lidem vývojově nejbližší, je rovným dílem šimpanz učenlivý (*Pan troglodytes*) a šimpanz bonobo (*Pan paniscus*). Poslední společný předek obou šimpanzů a člověka žil v Africe před několika miliony let, pak se rody *Pan* a *Homo* od sebe oddělily. Nemáme to sice zatím doloženo kosterními nálezy, ale dá se to velmi spolehlivě stanovit z porovnání DNA dnešních lidí a dnešních šimpanzů.

Stejným způsobem se dá postupovat po „stromu života“ níž a níž směrem k jeho kořenům. Někde po cestě narazíme na posledního společného předka člověka s gorilami, pak člověka s orangutany, pak lidoopů s opicemi a tak dále. O několik pater níže dospějeme k poslednímu společnému předku všech savců, pak všech obratlovců, postupem času dospějeme třeba [k poslednímu společnému předku člověka s mrkví](#). A ještě níže ve stromu života, na samém počátku jeho části, k níž patříme a kterou jako jedinou známe, byl LUCA.

LUCA nemusel být první živý organismus vůbec. Evoluce v počátcích života mohla napřed tápat, než se konečně ujala a rozvinula úspěšná vývojová větev, k níž patří bakterie, houby, rostliny a živočichové – včetně dinosaurů a trilobitů, protože mnoho druhů zaniklo i v rámci této větve.

LUCA musel mít s námi společnou základní biochemii. Měl genetický kód téhož typu, jaký mají všichni živí tvorové (nemusel však nutně mít DNA, možná si vystačil jen s RNA), podle genetického předpisu vytvářel bílkoviny. Musel být velice jednoduchý, proto je například vyloučeno, aby ovládal fotosyntézu. Připomínal bakterii, ale byl primitivnější. Téměř jistě žil na mořském dně u hydrotermálních prúdů, kde čerpal energii pro svůj metabolismus. Ten byl založen na reakci oxidu uhličitého s vodíkem, stejně jako je tomu u dnešních metanogenních organismů. Kyslík ani sluneční záření v životě LUCA nehrály roli – mimo jiné proto, že tou dobou v zemské atmosféře skoro žádný kyslík nebyl. Všechno další jsou hypotézy, které bude teprve potřeba prokázat.

Poznámky pod čarou

Astat

[Co kdyby?] MUNROE, Randall: [Co kdyby?](#) Práh 2014, str. 54. Viz též: bit.ly/lowe-astat

[jednoduchých látek kolem nás] Většina složitějších věcí – dřevo, bavlna, plastické hmoty, pivo, krev – jsou složité struktury tvořené buď mnoha vzájemně oddělenými sloučeninami, anebo promíchanou směsí sloučenin. Jejich analýzou dojdeme napřed k jednotlivým sloučeninám a pak k prvkům, z nichž se skládají.

[objevili chemici] Některé po obrovském úsilí; snaha připravit čistý plynný fluor trvala 74 let a ne jeden chemik přitom přišel o život.

[není celé číslo] A základní hodnotou, jedničkou, už není hmotnost atomu vodíku, je definována jako dvanáctina klidové hmotnosti atomu uhlíku C-12.

[dostalo se mu ironické otázky] STRATHERN, Paul: [Mendeleev's Dream: The Quest for the Elements](#), 2018, e-book, 83 %: „one even asked him sarcastically...”

[A jádro samo už vůbec ne.] Takhle by vám to aspoň řekla většina chemiků. Ve skutečnosti je tato věta trochu sporná. Svým způsobem se pokouší definovat hranici mezi fyzikou (pro kterou jsou vlastnosti jádra stejně důležité jako chování elektronového obalu) a chemií. Jenže hranice mezi oběma vědami vlastně neexistuje, jedna plynule přechází v druhou.

[s poločasem rozpadu] Přesněji poločas přeměny: doba, za kterou se výchozí množství sníží na polovinu. Nepřehlédněte, že takto měřený rozpad je tím pomalejší, čím méně výchozí látky zbývá. Podrobněji viz [ÚROK](#).

Banach-tarského paradox

[Luboš Pick] bit.ly/pick-btp

[Szkocka Restaurant & Bar] bit.ly/szkocka-lviv

Bayesovo pravidlo

[spolehlivost] Úplně korektní termín zní „specificita“, ale většinou ho nepoužívají ani sami biostatistickí.

[je nemocných jen 88] V reálné situaci by to nejspíš bylo tak, že by se test mýlil na obě strany. Kromě falešně pozitivních vyhodnocení (nejsem nemocný, ale označí mě tak) by poskytoval i jisté množství falešně negativních (jsem nemocný, ale testně vyhodnotil jako zdravého). Bayesovo pravidlo se dá použít i v této situaci, ale výklad jeho principu by se tím zatemnil. Zájemci najdou potřebné vzorce v odborné literatuře.

Bilion

[spolehlivost] bit.ly/milibili

[metr, kilogram a sekunda] A spolu s nimi ještě ampér (pro elektrický proud), kelvin (pro termodynamickou teplotu), kandela (svítivost) a mol (látkové množství).

[přinejmenším stejné množství] To tvrdí nejnovější odhady. Ve starší literatuře se dočtete, že to je víc, možná až desetinásobek počtu našich vlastních buněk.

[dva desítkové řády] Když je něco „řádově větší“, neznamená to „přibližně“, jak se domnívá hodně politiků, novinářů a kapitánů průmyslu. Znamená to „přinejmenším desetkrát větší“, případně i vícrát, to už musíte poznat z kontextu.

Bohrův model atomu

[příkladem lži-dětem] Záměrem jeho autora však byly spíš lži-fyzikům.
[napsal Ludwig Wittgenstein][Tractatus logico-philosophicus](#), věta 6.54.

Crispr

[co je na Zemi živé] S částečnou výjimkou virů.

[Američanka Jennifer Doudnaová a Francouzka Emmanuelle Charpentierová] Stojí za zmínku, že prvním autorem jedné ze stěžejních prací tohoto týmu je mladý český vědec Martin Jínek. Spolu s ním připomeňme ještě jméno dalšího důležitého člena týmu, jímž je Litevec Virginijus Šikšnys.

[Che Tien-kchuej] bit.ly/jiankui

[překročil dnešní hranice lékařské etiky] Viz např. bit.ly/2YYsscZ

Černá díra

[zapálí zbylý vodík] Slovem „zapálit“ se zde míní: spustit termionukleární fúzi. V astrofyzice se používá běžně, stejně jako slovo hořet, je však dobré zdůraznit, že s hořením, jak ho známe my – tj. slučováním s kyslíkem –, to nemá nic společného).

[Karl Schwarzschild] Karl Schwarzschild (1873–1916) byl německý fyzik a astronom.

[Stephen Hawking] Stephen Hawking (1942–2018) byl britský teoretický fyzik, jehož hlavní specializací byla teorie gravitačních singularit.

Derivace

[Přibližná definice] Lze namítnout, že přibližná definice není definice! Přesná definice zní: funkce je zobrazení z libovolné množiny M do číselné množiny T , kde každému prvku z M je přiřazeno nanejvýš jedno číslo z T . Množinou T se obvykle rozumí buď množina reálných, nebo komplexních čísel.

Ďábel

[nevěnovala pozornost] Evangelíci to viděli trochu jinak. Luther napsal o Koperníkovi už v roce 1539: „Tento blázen se pokouší vyvrátit celou astronomickou vědu, jako by se v Písmu svatém vysloveně neříkalo, že Jozue zastavil slunce, nikoliv zemi.“ A jeho nejbližší spolupracovník Melanchton instruktivně dodal: „Moudří vládci by měli zajisté ovládnout talentovanou lehkomyšlnost.“ Rozsudky vynášela a vykonávala světská moc, nikoli církevní, jen bylo potřeba moudrým vládcům naznačit.

[pasáž, kterou připomněl Luther Koperníkovi] [Joz 10, 12–13, kralický text](#)

[Většinou se shodnou] LAW, Stephen: „Scientism!“ In: [Science Unlimited? The Challenges of Scientism](#), BOUDRY Maarten a Massimo PIGLIUCCI. The University of Chicago Press, 2017. E-book, 40 %.

[potenciálně vyvrátitelné hypotézy] Tady se vám možná připomene Karl Popper a jeho požadavek falzifikovatelnosti. Přírodní vědy však reálně postupují spíš tak, že pro hypotézy experimentálně hledají podporu, než že by se je snažily touto cestou vyvracet. Je tomu tak proto, že podat přímý důkaz neexistence čehokoli je v přírodních vědách možné jen málokdy. Padesát let marného hledání gravitačních vln ani trochu nevyvrátilo hypotézu o jejich existenci, jen ukázalo, že potřebujeme lepší přístroje.

[jen málo přírodovědců] Přinejmenším ne explicitně a veřejně.

[Stephen Jay Gould] Paleontolog, evoluční biolog, 1941–2002.

[od starozákonního verše] [Český ekumenický překlad, Izajáš 26, 4.](#)

[podle Gallupova průzkumu] bit.ly/gallup2017

[jeden kuriózní výsledek] bit.ly/pray-cardi

Entropie

[do tří tvrzení] V malé nadsázce a velkém zjednodušení: První věta termodynamiky: nemůžete vyhrát, nanejvýš dosáhnete nerozhodného výsledku. Druhá: nerozhodného výsledku dosáhnete jen při teplotě absolutní nuly. Třetí: absolutní nuly nelze dosáhnout.

[teplota] Jak známo, existují různé stupnice pro měření teploty. V termodynamice musíme počítat výhradně v Kelvinově stupnici, jinak nedostaneme správné výsledky. Převod z Celsiovy stupnice na Kelvinovu spočívá v tom, že přičtete číslo 273,15. Dvacet stupňů Celsiovy stupnice je 293,15 Kelvinovy. Pro přibližné výpočty se používá jen číslo 273 bez desetinných míst.

[žádný stroj nemůže] Takovému neexistujícímu stroji se říká perpetuum mobile druhého druhu: mění teplo na práci beze ztrát. Tím se liší od perpetua mobile prvního druhu, stroje, který pracuje bez přísunu energie zvenčí. Oba jsou fyzikálně nemožné. Dnes už nelákají ani ty nejsilnější vynálezce. Před odhalením přesné povahy termodynamických zákonů byl však zájem o ně vcelku omluvitelný.

Evoluce

[byl jen nadšeným amatérem] Existuje nepřehledné množství Darwinových životopisů. Doporučuji knihu: Michael Ruse: [Charles Darwin](#); filozofické aspekty Darwinových myšlenek, Academia 2011, která klade důraz spíše na dílo než na anekdoty ze života.

[slavný esej Thomase Roberta Malthuse] jdem.cz/fb6hc9

[Jenže tak to není.] ZRZAVÝ Jan a kol.: [Jak se dělá evoluce](#), Dokořán/Argo 2017, str. 312–315 a 336.

[téměř stejnými slovy] Darwinovy závěry byly daleko propracovanější a podloženější, například zmíněnými zkušenostmi z Galapág. Wallace zůstal spíše ve spekulativní rovině. Rychlost publikování však mohla být rozhodující.

[velmi populární] Web s úplnými texty celého Darwinova díla (v angličtině): darwin-online.org.uk

Fúze

[velmi chápavé rodiče] bit.ly/fuze-doma

[Obrovského množství energie] Z jednoho gramu hmoty (jakékoli, na materiálu nezáleží) se podle Einsteinovy rovnice dá uvolnit 90 billionů joulů energie neboli 25 000 MWh (viz [WATT](#)). To odpovídá dvanácti hodinám produkce Temelína. Anebo jinak: při této účinnosti by na roční spotřebu elektřiny v ČR stačilo dva a půl kilogramu výchozího materiálu. Znamenalo by to však, že bychom museli veškerou hmotu převést na energii, anihilovat ji; a že bychom museli veškerou takto vzniklou energii pochyťat a využít. Nic z toho ani zdaleka neumíme. Jaderná fúze uvolní jen asi 0,7 % tohoto maximálního dosažitelného množství – a užitečně ji zatím neumíme zpracovat vůbec.

Gravitace

[neuvěřitelné výjimky] Nedobrovolnou světovou rekordmankou je srbská letuška Vesna Vulovićová, která roku 1972 přežila pád z výšky 10 160 metrů. Došlo k tomu po výbuchu teroristické bomby na palubě letadla na lince Stockholm–Bělehrad, a to nad československým územím poblíž Děčína. Nikdo jiný havárii nepřežil. Vesna Vulovićová byla vážně zraněna, ale vyléčila se bez trvalých následků.

[Isaac Newton] Sir Isaac Newton (1642–1726) je pokládán za největšího fyzika všech dob. Formuloval trojici pohybových zákonů, které představují základ mechaniky. Popsal gravitaci. Založil optiku jako fyzikální vědu. Byl jedním z tvůrců diferenciálního počtu.

[to teď není důležité] Třetí Keplerův zákon říká, že poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet je stejný jako poměr třetích mocnin hlavních poloos jejich eliptických drah. A důležitý je, ne že ne, tady se bez něj však obejdeme.

[Robert Hooke] Robert Hooke (1635–1703) byl Newtonův současník, stejně jako on polyhistor. Mezi oběma muži zůstaly nedořešené spory o prvenství v některých objevech.

[hypotéze vzniku Sluneční soustavy z akrečního disku] Též Laplace-Kantova hypotéza. V moderní podobě zní: velký plynový oblak (o průměru asi 3 světelné roky) se začal gravitačně zhušťovat, tím rostla jeho teplota, zejména v centrální části; jejím zhroucením vznikla hvězda, ze zbytků oblaku se vytvořily planety. Celá věc je nedořešená, zbývá mnoho otazníků včetně toho, kde se vzal počáteční rotační pohyb oblaku.

[jedenáct již bylo potvrzeno] bit.ly/gravi-wave

Heisenbergův princip neurčitosti

[popis vztahů mezi měřitelnými veličinami] Pochopitelně nebyl zcela originální. Aplikoval na fyziku logický pozitivismus Ernsta Macha a (tehdy vznikajícího) Vídeňského kruhu.

[hybnost] Hybnost je součin hmotnosti a rychlosti.

[nesmírně malé číslo] Symbolické označení redukované Planckovy konstanty je vodorovně přeškrtnuté h , což se anglicky čte jako h -bar, tedy „ejč bar“, od čehož se odvozují nepříliš vtipné zmínky o popíjení v Planckově baru apod. Hodnota $\hbar = 1,054571 \times 10^{-34}$ J.s.

[poprosit o pomoc] BODANIS, David: [E = mc²](#); životopis nejslavnější rovnice na světě. Dokořán 2002, str. 113.

[Skoro celý výkvět fyziky] Výjimku představovali hlavně ti, kdo byli pokládáni tou či onou stranou za nespolehlivé: sovětský emigrant George Gamow v Americe, německý emigrant Max Born ve Skotsku, mravně nepřijatelný Erwin Schrödinger v Irsku. Celá princetonská skupina emigrantů (Einstein, Pauli). A pak samozřejmě ti, kdo uvízli ve válčících zemích bez možnosti úniku.

Izotopy.

[jeden izotop] Jde vesměs o prvky s lichým protonovým číslem a sudým počtem neutronů. Kombinace, kdy jsou obě čísla lichá, vede k nestabilitě, jenže ne vždy. Tato otázka není dořešená.

Jaderná bomba

[Klause Fuchse] Klaus Fuchs (1911–1988) byl německý fyzik, který roku 1933 emigroval do Velké Británie. Za války pracoval v Los Alamos, odkud předával špionážní informace do SSSR. Strávil devět let v britském vězení, po propuštění odešel do NDR, kde se stal významnou celebritou.

Kompleni číslo

[ten příběh] HØEG, Peter: [Cit slečny Smilly pro snih](#). Argo 1997, str. 94.

[minus krát minus] Kolik je $i \times (-i)$? To si spočtete sami.

[nebylo chudé na zásadní objevy] Johann Carl Friedrich Gauss (1777–1855) byl německý matematik a fyzik, často pokládáný za největšího matematika všech dob.

Kvantum

[Richard Feynman jednou poznamenal] bit.ly/nobody-rf

[Max Planck] Jedna z největších osobností německé vědy všech dob, držitel Nobelovy ceny za fyziku za rok 1918.

[podle Maxwellovy teorie] James Clerk Maxwell (1831–1879), skotský fyzik, autor matematické teorie elektromagnetického pole, kterou shrnují tzv. Maxwellovy rovnice.

[formuloval ji velmi opatrně] Jde o popis tzv. fotoelektrického jevu. Einstein jej publikoval roku 1905. Právě za tento objev, nikoli za teorii relativity (publikovanou téhož roku) dostal o šestnáct let později Nobelovu cenu.

[tradici vznikající kvantové fyziky] Tradice se zachovává dodnes. Fyzikové dovedou některé jevy uchopit jen matematicky, ale když prstem ukážete na některý výraz v rovnicích, nebudou vám umět říci, čemu v reálném světě odpovídá. V klasické newtonovské fyzice taková situace nemůže nikdy nastat. V zásadě jsou dvě možnosti (které se navzájem nevylučují): buď je fyzikální popis kvantových jevů dosud velmi nedokonalý, anebo se zabýváme takovou částí objektivní reality, kterou jinak než matematicky (aspoň z pohledu bytostí, jako jsme my) uchopit nelze.

[Max Born] Max Born (1882–1970), německý fyzik, nositel Nobelovy ceny za rok 1954. Od roku 1933 žil ve Velké Británii.

[amplitudy] Maximální či minimální výška vlny.

[Nemohu uvěřit] Niels Bohr na to údajně odpověděl: „Einsteine, přestaňte Bohu říkat, co má a nemá dělat.“

Kvark

[Carl Anderson] Carl David Anderson (1905–1991), americký experimentální fyzik, nositel Nobelovy ceny za rok 1936, objevitel pozitronu a mezonu.

[mezon] Později se ukázalo, že mezonů je víc, a ještě později byly tyto částice zcela překlasifikovány, takže Jukawův a Andersenův „mezon“ dnes mezonem vůbec není. Správně se jmenuje mion (česky) neboli muon (anglicky, vyslovuje se to mju'n).

[Fermi] Enrico Fermi (1901–1954), italsko-americký fyzik, nositel Nobelovy ceny za rok 1938, jedna z největších osobností vědy dvacátého století. Postavil první experimentální jaderný reaktor (Chicago 1942).

[Jestliže vidím dál než ostatní] bit.ly/gm-dwarfs

[pocházel z rakouské Bukoviny] JOHNSON, George: [Strange Beauty](#): Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics. Vintage, 2000.

[skládají z částic vpravdě elementárních] Proton se skládá ze dvou kvarků „up“ a jednoho kvarku „down“. Neutron se skládá ze dvou kvarků „down“ a jednoho kvarku „up“. „Down“ a „up“ nic neznamená, jsou to konvenční názvy pro dva ze šesti druhů kvarků. Kvarky mají neceločíselný elektrický náboj. Celkový náboj protonu: $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$. Celkový náboj neutronu: $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$.

Laser

[se nabyté energie zbaví] Foton nemá hmotnost, ale má energii, což by vás mělo zarazit, protože hmotnost je dle Einsteinova vztahu $E = m \cdot c^2$ jen převlečená energie. Foton má však výjimku, a to proto, že se vždy pohybuje rychlostí světla – vždyť je světlo. Jeho klidová hmotnost proto nejen může, ale musí být nulová. Rychlostí světla se nemůže pohybovat nic, co má při nižší rychlosti nenulovou hmotnost.

Mitochondrie

[výstředního prvoka] Objevil ho dominantně český tým: bit.ly/monocer

[Lynn Margulisová] Nebyla úplně první, v méně sofistikované podobě se touto představou na počátku 20. století zabývali Konstantin Sergejevič Merežkovskij (Rusko), Ivan Wallin (USA) nebo Paul Portier (Francie).

Nekonečno

[nelze zapsat jako zlomek] Skvělý výklad tohoto důkazu najdete v knize [Obrana matematikova](#), kterou napsal excelentní britský matematik G. H. Hardy.

[Leopold Kronecker] Leopold Kronecker (1823–1891), německý matematik, zastánce extrémně přísné zdrženlivosti v používání pojmů. „Jen přirozená čísla jsou od Boha, vše ostatní je lidským dílem,“ hlásal. Vývoj mu, mírně řečeno, nedal za pravdu.

[řekl roku 1831] STEWART, Ian: [Odsud až do nekonečna](#); průvodce moderní matematikou. Argo/Dokořán 2006, str. 83.

[reálných čísel je nespočetně mnoho] Reálná čísla jsou všechna, která se dají zapsat buď konečným, nebo nekonečným desetinným rozvojem. Neboli všechna racionální a iracionální čísla dohromady. Neboli všechna algebraická a transcendentní čísla dohromady. Tři různé způsoby, jak popsat tutéž množinu.

Nula

[trigonometrické tabulky] Trigonometrické funkce znáte ze střední školy – sinus, kosinus, tangens. (Je jich ještě víc.) Už Řekové dovedli vypočítat jejich hodnoty pro libovolný úhel.

[nula faktoriál] Faktoriál je součin celých čísel až po dané číslo. Značí se vykřičníkem. Například $5! = 1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 = 120$. Ve vyšší matematice se dá dodefinovat pro všechna komplexní čísla (viz [samostatné heslo](#)), pak se mu říká gama funkce.

Ňadra

[oblíbené téma křesťanské ikonografie] Téměř výhradně středověké. V novověku zaujala katolická církev podobné stanovisko jako Facebook.

[těžší než identifikovat obnažené Ňadro] Téměř stejnými slovy to roku 2018 řekl šéf Facebooku Mark Zuckerberg, viz engt.co/zuck-nipp.

[2,54 miliardy uživatelů] Tím se myslí tzv. MAU, monthly active users, tedy lidé, kteří se přihlásí alespoň jednou za měsíc. Počet uživatelů aktivních každý den je samozřejmě nižší, činí 1,59 miliardy. Viz bit.ly/howmanyfb.

[obsáhlý manuál] bit.ly/fb-stand

P-hodnota

[že je lék A opravdu účinnější] Právě takto se skutečně testují nové léky. Legislativa většiny zemí vyžaduje pro schválení nového léku, aby měl prokazatelně lepší účinnost než stávající léčba téže nemoci. Z etických důvodů se nové léky testují vždy proti stávajícím, nikoli proti neúčinnému placebo, výjimkou jsou některé léky na duševní choroby. Popsaný pokus by reálně probíhal jako tzv. dvojitě slepý, to znamená, že pacienti by nevěděli, ve které skupině jsou zařazeni, a nevěděl by to ani zdravotnický personál, který jim léky podává.

Qubit

[kvantové počítače] Nezaměňujte je s kvantovou teleportací, což je jiný jev s využitím v právě vznikající technologii. V ní jde o přenos kvantové informace na dálku.

[dvojice čísel] Přesněji: vektor v dvourozměrném komplexním vektorovém prostoru.

[musí rovnat jedničky] Jinými slovy, délka (absolutní hodnota) vektoru vyjadřujícího stav qubitu se musí rovnat jedné.

[s pravděpodobností] Teď by také mělo být jasnější, proč je normalizační podmínka zapotřebí: potřebujeme, aby se součet pravděpodobností obou možných výsledků rovnal jedné.

[Z těchto tří obvodů] Stačily by dokonce dva – NOT a kterýkoli z dvojice AND a OR. Skutečné elektronické součástky jsou složitější a uspořádané trochu jinak, na principu se ale nemění nic.

[plně funkční počítač] Přísně vzato to není pravda. Potřebujeme k tomu další elementární součástky: časovač, klopné obvody apod. Ale opět: na principu se nic nemění.

[existuje větší množství] bit.ly/qgates

[zcela nezávislá] Programování neexistujících počítačů má dlouhou tradici. Augusta Ada Kingová, hraběnka z Lovelace, napsala netriviální program pro Babbageovu Analytical Engine v roce 1843. Stroj tou dobou neexistoval, hraběnce však bylo známo, jaké funkce bude mít (mimo jiné proto, že některé z nich sama navrhla).

Radioaktivita

[William Crookes] Sir William Crookes (1832–1919), britský fyzik a chemik; kromě katodových paprsků objevil také prvek thalium a tzv. Crookesův mlýnek – zařízení, které se začne otáčet, když na něj posvítíte.

[Wilhelm Röntgen] Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923), německý fyzik, nositel Nobelovy ceny za rok 1901.

[o popularitu tohoto druhu nestál] Což není neobvyklé. Ještě méně o ni určitě stál Thomas Crapper, instalatér, který si dal patentovat podstatná zlepšení splachovacího záchodu, anebo Joseph—Ignace Guillotin, který byl ve skutečnosti odpůrcem trestu smrti.

[Henri Becquerel] Henri Becquerel (1852–1908), francouzský fyzik, objevitel radioaktivity, nositel Nobelovy ceny za rok 1903.

[Marie Curie-Skłodowská a její manžel Pierre Curie] Zakladatelé fyzikální dynastie. Marie Curie-Skłodowská (1867–1934) byla polsko-francouzská fyzička, objevitelka prvků polonium a radium. Její manžel Pierre Curie (1859–1906) s ní spolupracoval na výzkumu radioaktivity, kromě toho se zabýval magnetickými vlastnostmi materiálů. Společně (a spolu s Henrim Becquerelem) obdrželi Nobelovu cenu za fyziku v roce 1903. Marie Curie-Skłodowská pak získala ještě samostatně Nobelovu cenu za chemii, a to v roce 1911. Její dcera Irène (1897–1956) pracovala nejprve se svou matkou a pak s manželem Frédéricem (1900–1958), rovněž fyzikem. Pod společným příjmením Joliot-Curie získali Nobelovu cenu za chemii roku 1935. Marie i Irène zemřely na rakovinu vyvolanou dlouhodobými účinky radioaktivity.

Relativita

[světlo ve vakuu] Dodatek „ve vakuu“ je velice podstatný. V různých materiálech se světlo šíří různou rychlostí, k důsledkům patří třeba známý lom světla ve vodě – „hůl do vody ponořená zdá se býti zalomená“. Rychlost světla ve vzduchu je nepatrně nižší než ve vakuu; ve vodě se světlo zpomalí asi na 75 %, v běžném okenním skle na 66 %, v diamantu na 40 %. Existují postupy, jak světlo zpomalit ještě více.

[zestárne jen o šest let] Vydělte rychlost letu rychlostí světla, dostanete 0,8. Spočítejte odmocninu z $(1 - 0,8^2)$, což je 0,6. Tímto číslem vynásobte počet let, jež uběhly na Zemi (deset), a dostanete počet let, jež uběhly v kosmické lodi: $10 \times 0,6 = 6$. Zkuste, co se stane, když budeme rychlost lodi zvyšovat a snižovat.

[jede vlak] Einstein zásadně používal jako přirovnání vlak. V jeho mládí koneckonců nic nejezdilo (ani nelétalo) rychleji.

Řada

[Douglas Hofstadter ve své knize Gödel, Escher, Bach] HOFSTADTER, Douglas: [Gödel](#), [Escher](#), [Bach](#); Existenciální gordická balada. Argo/Dokořán, str. 50.

[protože takový závod nevyhraje] Zénón z Eleje (cca 490–430 př. n. l.) nebyl blázen a samozřejmě věděl, že Achillés předběhne želvu. Svým paradoxem chtěl upozornit na to, že s některými pojmy je třeba zacházet opatrně. Také chtěl podpořit jednu filozofickou školu (Parmenidovu) proti jiné (Pýthagorově) a získat přitom kousek slávy pro sebe. Za předpokladu, že opravdu žil, protože jediný doklad o něm máme z Platónova dialogu Parmenidés.

Schrödinger a kočka

[v superpozici stavů] Superpozice není ve fyzice nic složitějšího než „oboje najednou“ nebo „součet“ nebo „zároveň jedno i druhé“.

[zjevně absurdní] U elektronu to může být zrovna tak absurdní, ale tam jsme ochotni uvěřit skoro čemukoli. U kočky ne. Přísně vzato, použití kočky nic nedokazuje, ale působí přesvědčivě.

[ptá se rétoricky fyzik Nicolas Gisin] bit.ly/kittens-schr

Ťuhýk

[předmětem amatérského experimentování] MACURA, Vladimír:
[Znamení zrodu a české sny](#). Academia 2015.

[Žádný jiný jazyk] Mimochodem, jiné slovanské jazyky využily také svých možností, v ruštině se rozlišuje azotistaja a azotnaja kislota, v polštině kwas azotawy a kwas azotowy. Tyto koncovky však vyjadřují jen porovnání – nižší a vyšší mocenství, nikoli přesné valenční číslo.

Ultrazvuk

[různé druhy vlnění] Mnoho výborných vizualizací najdete na bit.ly/typy-vln.

Úrok

[nechtějete vědět] Je to možné jen v případě, že jde o funkci v oboru komplexních čísel. K čemuž lze jen dodat standardní učebnicovou frázi: „Výklad by převyšoval možnosti a záměry této knihy.“

[Průměrná spotřeba české domácnosti] Tisíc kilowatthodin je megawatthodina (MWh). Tisíc megawatthodin je gigawatthodina (GWh). Tisíc gigawatthodin je terawatthodina (TWh). Celková spotřeba elektřiny v ČR v roce 2017 činila 60,7 TWh. Jeden blok (tj. jeden reaktor) jaderné elektrárny Dukovany má výkon 510 MW, za rok tedy dodá do sítě 4,5 TWh elektrické energie (teoreticky, ve skutečnosti to je méně kvůli odstávkám).

X

[Základů v českém překladu Františka Servíta] bit.ly/zaklady-servit

[zachovala úloha] DERBYSHIRE, John: [Unknown Quantity](#); A real and imaginary history of algebra. Joseph Henry Press 2006, e-book, 5 %.

Ytterby

[článku v časopisu Scientific American]
www.scientificamerican.com/article/dont-panic-about-rare-earth-elements/

Život

[Stanley Miller] Ten usoudil, že dobrým vodičkem bude atmosféra Jupitera.

[téměř veškerý současný život] Výjimku představuje poměrně pestrá skupina chemotrofních organismů, které získávají energii například oxidací anorganických látek. Pokud probíhá anaerobně, bez přítomnosti kyslíku, pak se o nich dá říci, že jsou na Slunci nezávislé. Na Slunci je však samosebou závislá existence celé planety a koneckonců i vznik oněch anorganických látek. U hlubokomořských průduchů, tedy v typickém (byť ne jediném) habitatu těchto organismů tak končí biologie a začíná filozofie.

[Last Universal Common Ancestor] Není však jisté, zda byl nejjednodušším živým tvorem vůbec – nemusel být, v dalším průběhu evoluce se mohla vytratit nějaká schopnost, kterou LUCA ovládal.

[k poslednímu společnému předku člověka s mrkví] Byl jednobuněčný, žil asi před dvěma miliardami let a samosebou o něm nelze říci, zda to byl živočich, nebo rostlina, protože předcházel jejich oddělení od sebe.

Obsah

[Úvodem](#)

[Astat](#)

[Banach-tarského paradox](#)

[Bayesovo pravidlo](#)

[Bilion](#)

[Bohrův model atomu](#)

[Crispr](#)

[Černá díra](#)

[Derivace](#)

[Ďábel](#)

[Einstein](#)

[Entropie](#)

[Evoluce](#)

[Fraktál](#)

[Fúze](#)

[Gravitace](#)

[Heisenbergův princip neurčitosti](#)

[Chaos](#)

[Chromozom](#)

[Integrál](#)

[Izotopy](#)

[Jaderná bomba](#)

[Komplexní číslo](#)

[Kvantum](#)

[Kvark](#)

[Laser](#)
[Logaritmus](#)
[Metrika](#)
[Mitochondrie](#)
[Nekonečno](#)
[Nula](#)
[Ňadra](#)
[Orbita](#)
[P-hodnota](#)
[Pí](#)
[Qubit](#)
[Radioaktivita](#)
[Relativita](#)
[Řada](#)
[Schrödinger a kočka](#)
[Šifra](#)
[Tranzistor](#)
[Ťuhýk](#)
[Ultrazvuk](#)
[Úhel](#)
[Úrok](#)
[Voda](#)
[Watt](#)
[X](#)
[Ypres](#)
[Ytterby](#)
[Základy](#)
[Zpětná vazba](#)
[Život](#)
[Poznámky pod čarou](#)

Petr Koubský

Věda podle abecedy

Editor ■ Ondřej Vrtiška

Jazyková redakce a korektura ■ Ondřej Horník

Grafická úprava a obálka ■ Eva Škrovinová

Sazba a ilustrace ■ Marcela Schneiberková a Eva Škrovinová

Foto obálka ■ Adobe Stock

Vydala ■ N media, a. s., v Praze roku 2019 jako svou 2. publikaci

Vytiskly ■ Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

Vydání ■ První, 320 stran

ISBN 978-80-907652-3-8 (epub)

ISBN 978-80-907652-5-2 (mobi)

N media a. s.

Spálená 97/29, 110 00 Praha 1

denikn.cz

Edice N

AMERICKÝ DENÍK



JANA CIGLEROVÁ

EDICE N



Americký deník, který píše Jana Ciglerová, přináší osobní postřehy z běžného života v USA. Autorka se soustředí na popis fenoménů a každodenních situací vyplývajících ze střetu kultur. Jako Češka adaptující se na život mezi převážně Latinoameričany na jihu USA přináší konkrétní neobvyklé pohledy na to, jak se v tak národnostně pestré společnosti žije a jak Čechům známé životní situace řeší místní lidé.

Kdo život v USA zná, bude si své zkušenosti moci porovnat s autorčinými. Koho cesta do Ameriky láká, pro toho to bude obohacující, někdy legrační, místy pohoršené, občas i dojemné vyprávění o tom, co takový obyčejný život na druhé straně Atlantického oceánu obnáší. A pro ty, kdo si prostě jen chtějí rozšířit obzory, nabízí Americký deník poutavě psaný vhled do života za velkou louží.