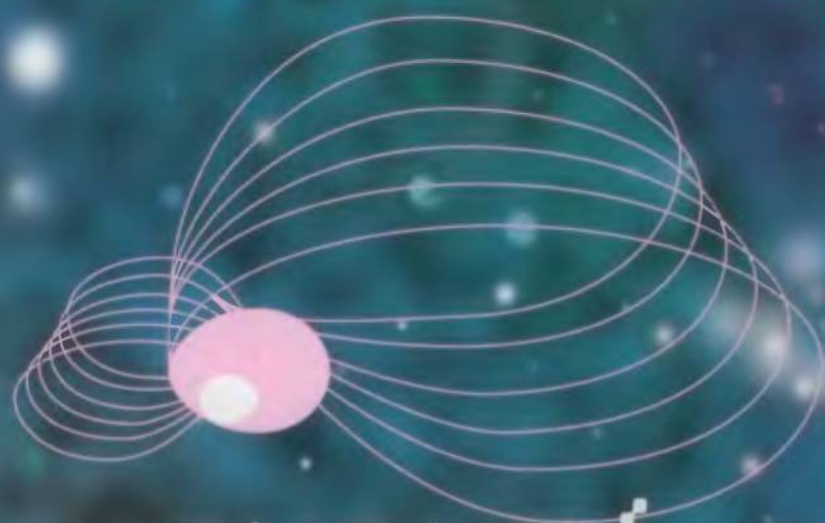


BRIAN
GREENE



SKRYTÁ
REALITA

PARALELNÍ VESMÍRY
A HLUBOKÉ ZÁKONY KOSMU

PASEKA

Autor bestsellerů *Elegantní vesmír* a *Struktura vesmíru* přichází se svou zatím nejobsáhlejší a nejsrozumitelnější knihou – knihou, která se zabývá velkolepou otázkou: Je náš vesmír jediný?

Bývaly doby, kdy „vesmír“ označoval naprosto vše, co existuje. Ale fyzikální a kosmologické objevy v nedávných letech přivedly mnoho vědců k závěru, že náš vesmír může být jen jedním z mnoha. Průzračným stylem a za pomoci inspirujících analogií nám Brian Greene vysvětluje, jak se několik odrůd „multivesmíru“ vynořuje z teorií, jejichž prvotním úkolem bylo vysvětlit nejrafinovanější pozorování subatomárních částic i temných hlubin vesmíru: multivesmír, v němž máte nekonečné množství dvojníků, kteří v dalekých končinách všichni čtou tuto větu; multivesmír zahrnující oceán vesmírných bublin, z nichž jedna jediná je naším vesmírem; multivesmír, který se donekonečna opakuje, nebo další, který může zůstat neviditelný přesto, že se vznáší pouhé milimetry od nás; multivesmír, v němž se každé z mnoha rozuzlení situace dovolené kvantovou mechanikou někde uskuteční. A také snad nejpodivnější ze všech multivesmírů, multivesmír vzniklý z čisté matematiky.

Greene, jeden z předních amerických fyziků a popularizátorů vědy, nás bere na podmanivou expedici do těchto paralelních světů a odkrývá, jak velká část skutečné povahy reality se hluboko v nich může skrývat. A díky svému jedinečnému umění podat složitý materiál srozumitelně i zábavně se nezalekne ani ústřední otázky: Jak může fundamentální věda učinit pokrok, leží-li dlouhé lány reality dále, než kam máme přístup?

Skrytá realita, vyznačující se vtípem a přesností, je dalekosáhlým přehledem nejnovějších výsledků fyziky a zároveň pozoruhodnou výpravou na samotnou hranu reality – cestou, která je pevně zakotvena ve vědě, ale omezena pouze naší představivostí.

NAKLADATELSTVÍ PASEKA

ॐ नमो भगवते वासुदेवाय ॥

SKRYTÁ REALITA

PARALELNÍ VESMÍRY
A HLUBOKÉ
ZÁKONY KOSMU

NAKLADATELSTVÍ PASEKA

PŘELOŽIL LUBOŠ MOTL

Copyright © 2011 by Brian R. Greene
All rights reserved
Translation © Luboš Motl, 2012

ISBN 978-80-7432-205-1

Věnováno Alecovi a Sophii

Předmluva

Pokud před sto lety byly ještě nějaké pochyby, na počátku 21. století to už byla hotová věc: snažíme-li se odhalit opravdovou povahu reality, každodenní zkušenost nás klame. Zamyslíme-li se nad tím, nebudeme vlastně ani nijak překvapeni. Pro naše předky, kteří sbírali plody v lesích a lovili zvěř ve stepích, nebyla schopnost předpovídat kvantové chování elektronů nebo určovat kosmologické důsledky černých děr tím podstatným, co by mohlo zvýšit naději na přežití. Větší mozek na druhé straně nebyl k zahzení a spolu s tím, jak rostla naše intelektuální šikovnost, rozšiřovala se i naše kapacita prozkoumávat okolí stále hlouběji. Někteří zástupci našeho druhu zkonstruovali nástroje, jimiž prodloužili dosah svých smyslů; další se cvičili v systematické metodě, s níž lze zaznamenat a vyjádřit jakékoli pravidelnosti – tedy v matematice. S těmito nástroji jsme začali nahlížet pod povrch každodenních dojmů.

Co jsme našli, nás už přimělo značně pozměnit názory na vesmír. Prováděli jsme pokusy i pozorování, jimiž jsme ověřovali svá očekávání a které nás vedly ke stále hlubšímu fyzikálnímu porozumění světu, vyjadřovanému se stále větší matematickou precizností. Tak jsme už prokázali, že prostor, čas, hmota a energie mají v repertoáru způsoby chování, které se nepodobají ničemu, čeho byl kdokoli z nás kdy přímým svědkem. A právě teď nás pronikavé rozborů těchto a souvisejících objevů přivádějí k něčemu, co může otřást naším chápáním světa znovu a od základu: k možnosti, že náš vesmír není jediným vesmírem. Předkládaná kniha by ráda tuto možnost prozkoumala.

Pustil jsem se do jejího psaní, aniž bych od čtenáře očekával odborné znalosti matematiky nebo fyziky. Místo toho jsem se, stejně jako ve svých předchozích knihách, rozhodl pro metafory a analogie, opeřené historickými příhodami, abych mohl nabídnout srozumitelné vysvětlení nejnovějších poznatků moderní fyziky, které – pokud by byla dokázána jejich správnost – by patřily mezi ty nejpodivnější a prozradily by nám o světě nejvíce. Nejedna pojem nebo myšlenka v této knize donutí čtenáře vzdát se pohodlných myšlenkových schémat a smířit se s nepředvídatelnými oblastmi reality. Vydáme se totiž po stejné cestě, jakou kráčela i historie vědy. Tato cesta je doslova poseta neočekávanými kličkami a objíždkami, z nichž vědci čerpali jak nadšení, tak

i ponaučení. Pečlivě jsem z těchto klíčků a objížděk vybíral, aby i čtenář mohl pohodlně přejít přes údolí a propasti v krajině vědění a z každodenních koutů této krajiny pronikl až do oblastí zcela neznámých a exotických.

Na rozdíl od mých předchozích knih jsem vynechal úvodní kapitoly, které systematicky vysvětlovaly základní učivo, do něhož patří speciální i obecná teorie relativity nebo kvantová mechanika. Místo toho jsem se ve většině případů rozhodl představovat nové pojmy „podle potřeby“; pokud jsem na několika místech došel k závěru, že pro srozumitelnost knihy je žádoucí, abych určitou problematiku rozebral v poněkud úplnějším světle, zkušenějšího čtenáře předem upozorním na to, že určitou podkapitulu může bez potíží přeskočit.

V kontrastu s tím se poslední stránky několika kapitol postupně promění v poněkud pokročilejší zpracování problematiky, které může některým čtenářům připadat obtížné. Jakmile se k těmto partiím přiblížíme, nabídnu méně poučenému čtenáři krátké shrnutí a navrhnou mu, jakou část textu může přeskočit, aniž by ztratil souvislosti. Nicméně každému doporučuji, aby se snažil proniknout tak daleko, jak mu to jeho zájem a trpělivost dovolí. Byť je obsah těchto partií komplikovanější, zvolená forma je optimalizovaná pro široké publikum; jedinou nezbytnou podmínkou úspěchu tedy zůstává čtenářova vytrvalost.

S poznámkami na konci knihy je to jinak. Čtenář-nováček je může přeskočit zcela; zkušenější čtenář v nich ovšem najde vyjasnění a rozšíření hlavního textu, jež považují za důležitá, ale která by v hlavním textu působila únavně. Řada poznámek je určena čtenářům, kteří prošli nějakou formální výukou matematiky a fyziky.

Při psaní *Skryté reality* jsem těžil z kritických komentářů a zpětné vazby, jež mi nabídla řada přátel, kolegů a rodinných příslušníků, kteří si přečetli některé kapitoly nebo i celou knihu. Obzvláště rád bych poděkoval Davidu Albertovi, Tracy Dayové, Richardu Eastherovi, Ritě Greeneové, Simonu Judesovi, Danielu Kabatovi, Davidu Kaganovi, Paulu Kaiserovi, Raphaelu Kasperovi, Juanu Maldacenovi, Katince Matsonové, Mauliku Parikhovi, Marcusi Poeselovi, Michaelu Popowitsovi a Kenu Vinebergovi. Je vždycky radost pracovat s Martym Asherem, mým redaktorem v Knopfu, a děkuji Andrewovi Carlsonovi za jeho manažerský dohled nad knihou v závěrečných stadiích výroby. Báječným ilustracím talentovaného a trpělivého Jasona Severse vděčím za zcela nový rozměr mého výkladu. Mám i to potěšení poděkovat svým literárním agentům, Katince Matsonové a Johnu Brockmanovi.

Když jsem si v hlavě rovnal, jak co nejlépe přistoupit k materiálu, na nějž se tato kniha soustřeďuje, značně mi pomohly nescíslné rozhovory s dlouhou řadou kolegů. Kromě těch, o nichž jsem se už zmínil, bych rád výslovně poděkoval i Raphaelu Boussovi, Robertu Brandenbergerovi, Frederiku Denefovi, Jacquesu Distlerovi, Michaelu Douglasovi, Lamu Huiovi, Lawrenci Kraus-

sovi, Janně Levinové, Andreji Lindemu, Sethu Lloydovi, Barrymu Loewerovi, Saulu Perlmutterovi, Jürgenu Schmidhuberovi, Steveu Shenkerovi, Paulu Steinhardtovi, Andrewovi Stromingerovi, Leonardu Susskindovi, Maxi Tegmarkovi, Henrymu Tyeovi, Cumrunu Vafovi, Davidu Wallaceovi, Ericku Weinbergovi a Shing-Tung Yauovi.

Svou první populárně-vědeckou knihu, *Elegantní vesmír*, jsem začal psát v létě 1996. Následujících patnáct let jsem se těšil z neočekávané a tvořivé souhry mezi tématy, na které se soustřeďuje můj odborný výzkum, a otázkami, které se řeší v mých knihách. Děkuji svým studentům a kolegům na Columbijské univerzitě za to, že vytvořili plodné prostředí k výzkumu, americkému ministerstvu energetiky, které můj vědecký výzkum financovalo, a také nedávno zesnulému Penttimu Kourimu za jeho štědrou podporu mého bádání na columbijském Ústavu pro struny, kosmologii a astročásticovou fyziku.

Nakonec děkuji i Tracy, Alecovi a Sophii – za to, že z tohoto vesmíru pro mě udělali ten nejlepší mezi všemi možnými vesmíry.

Kapitola první

Hranice reality

O paralelních světech

Kdyby bývalo v době mého dětství můj pokoj zdobilo jen jediné zrcadlo, moje dětské sny se mohly ubírat zcela jiným směrem. Ale v pokoji mi visela hned zrcadla dvě. A každé ráno, když jsem skříň otevřel, abych si vyndal oblečení, se zrcadlo zabudované do dveří skříňě srovnalo se zrcadlem na stěně a obě vytvořila zdánlivě nekonečnou posloupnost odrazů všech objektů umístěných mezi nimi. A to mě fascinovalo. Radoval jsem se z každého nového obrazu, který vyvstal na skleněných rovinách a jako by pokračoval tak daleko, kam až oko dohlédlo. Všechny odrazy se zdánlivě pohybovaly v souhře – ale, jak jsem věděl, pouze kvůli omezením daným lidskému vnímání; už v mladém věku jsem se dozvěděl o konečné rychlosti světla. V mysli jsem si tedy představoval, že moje oko sleduje zpáteční cesty světelných paprsků. Škubnutí hlavou i upažení ruky mezi zrcadly vyvolávaly tiché ozvěny a každý obraz jako by popoháněl svého souseda. Někdy jsem si představoval neuctivou kopii sebe sama, která kdesi v hloubi obrazů odmítne napodobovat svého předchůdce, aby tak rovnoměrný přenos pohybu přerušila a vytvořila novou realitu pro celou řadu následujících kopií. O školních přestávkách jsem si občas představoval, jak světlo, které jsem toho rána vyslal, donekonečna létá mezi oběma zrcadly, a často jsem se v myšlenkách připojoval k jednomu z Brianů ze zrcadla a vstupoval do imaginárního paralelního světa, světa vzešlého ze světla a poháněného fantazií.

Aby nedošlo k nedorozumění: odražené obrazy nemají vlastní duši nebo vědomí. Přesto tyto mladické rozlety fantazie, včetně jejich paralelních realit žijících pouze v naší představivosti, rezonují se stále významnějším tématem dnešní vědy – s možností, že mimo náš svět existují i světy další. Tato kniha je výpravou do těchto jiných světů a promyšlenou expedicí do říše vědy o paralelních vesmírech.

Vesmír a vesmíry

Bývaly doby, kdy „vesmír“ znamenal „vše, co existuje“. Všechno. Se vším všudy. Představa o více než jednom vesmíru, o více než jednom „všem“, vypadá jako

jeden velký protimluv. A přesto posloupnost teoretických zvrátů postupně zpřesnila interpretaci slova „vesmír“. Význam tohoto slova teď závisí na kontextu. Někdy slovem vesmír míníme úplně všechno. Jindy se zase toto slovo vztahuje jen k těm částem všehomíra, do nichž mají bytosti jako já nebo vy alespoň v principu přístup. Někdy se tímto slovem označují oblasti oddělené – buď částečně, nebo zcela – a k tomu dočasně nebo trvale nedostupné pro smrtelníky; v tomto smyslu toto slovo odsuzuje náš vesmír k tomu, stát se řadovým členem velkého, možná i nekonečně velkého kolektivu.

Spolu s tím, jak se oslaboval jeho monopol, uvolňoval „vesmír“ cestu dalším příbuzným slůvkům, která jsou užitečná pro rozpravy o větším plátnu, na němž může být realita ve své úplnosti namalována. *Paralelní světy, paralelní vesmíry, mnohočetné vesmíry, alternativní vesmíry* nebo *multivesmír, multiverzum, megaverzum, metaverzum* – všechna tato synonyma mohou kromě našeho vesmíru označovat i další vesmíry, které „kdesi tam“ existují.

Určitě jste si všimli, že jde o pojmenování poněkud matná a nepřesná. Co přesně představuje svět nebo vesmír? Jakými kritérii lze odlišit oblasti, jež jsou jednotlivými součástmi jednoho vesmíru, od těch, které lze považovat za plnohodnotné vesmíry samy o sobě? Někdy v budoucnosti možná naše chápání mnohočetných vesmírů pokročí natolik, že budeme schopni na tyto otázky precizně odpovědět. Než abychom se ale v knize potýkali s abstraktními definicemi, zvolíme strategii, s níž americký nejvyšší soudce Potter Stewart definoval pornografii. Zatímco Nejvyšší soud USA usiloval o její standardní definici, Stewart prohlásil: „Co to je, vím, jakmile ji spatřím.“

Koneckonců to, zda jednu nebo druhou oblast označíme za paralelní vesmír, je pouze jazyková jemňůstka. To podstatné, o co jde a co je jádrem celého problému, je otázka, zda vůbec oblasti, které se přiči konvenčním představám, existují, protože z jejich existence plyne, že to, co jsme dlouho nazývali *tím jediným* vesmírem, je pouze jednou složkou daleko impozantnější, možná daleko podivnější a snad i skryté reality.

Odrůdy paralelních světů

Pozoruhodnou skutečností (která mě částečně inspirovala k napsání této knihy) je, že řada důležitých vývojových kroků ve fundamentální teoretické fyzice – relativistická fyzika, kvantová fyzika, kosmologická fyzika, fyzika sjednocení všech sil a výpočetní fyzika – nás přivedla k tomu, abychom přemýšleli o různých odrůdách paralelních vesmírů. A tak je každá z následujících devíti kapitol jedním malým kouskem ve velké skládance, kouskem, který vyjasňuje jednu variaci na téma multivesmíru. Každá z nich představuje náš vesmír jako část neočekávaně většího celku, ale zevnějšek takového celku i povaha „členských“ vesmírů se od sebe v těch devíti případech zásadně odlišují. V některých představách jsou paralelní vesmíry od nás odděleny obrovitými

úseky prostoru a času; v dalších se vznášejí milimetry od nás; v ještě jiné skupině ztrácí přízemní otázka po jejich poloze jakýkoli smysl. Podobně pestré jsou i zákony, jimiž se tyto paralelní vesmíry řídí. V některých z nich panují stejné zákony jako u nás; v jiných platí zákony odlišné, ale sdílející s těmi našimi společný původ; a úplně jinde platí zákony, které se vzhledem a strukturou odlišují od všeho, s čím jsme se dosud setkali. Člověka pokojuje a zároveň i vzrušuje představa, jak rozsáhlá realita může být.

První vědecké expedice do paralelních světů započaly v padesátých letech 20. století; tehdy se badatelé pokoušeli vyřešit určité záhady kvantové mechaniky, teorie, jež měla vysvětlit události odehrávající se v říši atomů a subatomárních částic. Kvantová mechanika se vymanila z okovů předchozí kosty fyziky, takzvané klasické mechaniky, důkazem, že vědecké předpovědi mají nutně pravděpodobnostní ráz. Můžeme předpovědět naději, že v dané situaci dospějeme k jednomu nebo druhému výsledku, ale obecně předpovědět, který z těchto výsledků skutečně nastane, nemůžeme. Toto dobře známé odchýlení se od staletí vědeckého uvažování je překvapením samo o sobě. Kvantová mechanika se však vyznačuje i dalším zapeklitým aspektem, jež si lidé už tolik nevšimnou. Navzdory desetiletím pečlivých rozborů kvantové mechaniky a poté, co se nashromáždilo ohromné množství dat potvrzujících její pravděpodobnostní předpovědi, nedokázal ještě nikdo vysvětlit, proč nakonec z možných výsledků v každé situaci nastane jen jediný. Když provádíme experimenty a zkoumáme svět, všichni souhlasíme, že prožíváme jedinou a zcela určitou realitu. A přesto více než sto let po začátku kvantové revoluce ještě světoví fyzici nedospěli ke shodě, pokud jde o vysvětlení, proč je tento základní fakt slučitelný s matematickými rovnicemi kvantové teorie.

V průběhu let se tuto záhadu snažil objasnit ne jeden tvořivý nápad, ale ten nejvíce šokující z nich byl paradoxně navržen už mezi prvními. Podle této klasické představy, tkví jádro problému v tom, že náš předpoklad, že každý experiment má jen jeden výsledek, je chybný. Matematika v základech kvantové mechaniky – nebo přinejmenším jeden způsob, jak na ni nahlížet – naznačuje, že se *všechny* možné výsledky odehrávají někde, totiž ve svém vlastním, odděleném vesmíru. Předpovídá-li kvantový výpočet, že se nějaká částice může objevit tady, nebo naopak tam, potom se v jednom vesmíru *vynoří* tady, zatímco v jiném se *objeví* tam. A v každém takovém vesmíru žije kopie vás samotných, která si – chybně – myslí, že její realita je tou jedinou. Jakmile doceníme, že kvantová mechanika ovládá všechny fyzikální procesy, od slučování jader atomů uvnitř Slunce až k vyslání signálů mezi nervovými buňkami, na něž lze zredukovat naše myšlenky, začne být jasná dalekosáhlost důsledků představy o paralelních vesmírech. Podle této představy nezůstane žádná cesta nevyzkoušena. A přesto každá cesta – každá realita – zůstává skrytá před všemi ostatními.

Tato provokující interpretace kvantové mechaniky v řeči *mnoha světů* vzbudila v posledních desetiletích hodně zájmu. Výzkum však ukázal, že jde o ošemetný a choulostivý přístup k fyzice (jak uvidíme v 8. kapitole), a tak dodnes, po více než půlstoletí prověřování, vyvolává tato hypotéza polemiku. Zatímco někteří praktici kvantové mechaniky tvrdí, že její správnost už byla dokázána, další stejně sebejistě prohlašují, že její matematické základy stojí na písku.

Nehledě na nejistotu ohledně vědecké správnosti, rezonovala tato raná odvěta paralelních vesmírů s tématy oddělených civilizací nebo alternativních historií, která umělecky zpracovala díla literární, televizní a filmová. Kosmologie paralelních vesmírů inspiruje kreativní umělce dodnes. (Už od dětství řadím ke svým oblíbeným *Čaroděje ze země Oz*, *Život je krásný*, epizodu *Star Treku* nazvanou „Město na pokraji věčnosti“, příběh Jorgeho Borgese „Zahrada, v které se cestičky rozvětvují“ a v nedávné době „Srdcovou sedmu“ a film *Lola běží o život*.) Ve svém souhrnu pomohla tato a další díla masové kultury integrovat představu o paralelních realitách do ducha doby a stala se z velké části zodpovědnou za vášnivý zájem veřejnosti o toto téma. Kvantová mechanika je však jen jedním z mnoha způsobů, jimiž moderní fyzika vdechuje život pojmu „paralelní vesmír“. Vlastně to ani nebude ten první způsob, o němž budu mluvit.

V 2. kapitole se vydáme jinou cestou vstříc paralelním vesmírům, a to cestou možná nejjednodušší. Uvidíme, že pokud se prostor rozléhá donekonečna – a tento předpoklad je slučitelný se všemi pozorováními a je součástí kosmologického modelu, jemuž dává mnoho fyziků a astronomů přednost –, potom kdesi daleko (pravděpodobně *sakramentsky* daleko) musejí existovat oblasti, kde se kopie vás, mě a všech ostatních radují z alternativních verzí reality, kterou zažíváme zde. A 3. kapitola zavítá hlouběji do kosmologie: inflační teorie, tedy přístup, který předpokládá ohromnou explozi superrychlého rozpínání prostoru v nejranějších okamžicích života vesmíru, vytváří svou vlastní verzi paralelních světů. Je-li inflační teorie správná, jak to nejrafinovanější astronomická pozorování naznačují, potom exploze, z níž vzešla ta oblast prostoru, kterou obýváme, nemusela být tou jedinou. Inflační rozpínání může naopak právě v tuto chvíli ve vzdálených končinách prostoru plodit jeden vesmír za druhým a může v tom pokračovat navěky. Každý z těchto nafukujících se vesmírů má navíc svůj vlastní nekonečný objem, a proto obsahuje nekonečně mnoho paralelních světů z 2. kapitoly.

Ve 4. kapitole se naše cesta stočí k teorii strun. Po krátkém shrnutí základů přehledněme současný stav tohoto plánu, jak sjednotit všechny přírodní zákony. S takto získaným nadhledem pak v 5. a 6. kapitole prozkoumáme nedávné objevy v teorii strun, podle nichž mohou existovat tři nové typy paralelních světů. Jedním z nich je scénář *bránových světů*, scénář, který předpokládá, že náš vesmír je jednou „deskou“, která se vedle případných dalších

„desek“ vznáší ve vícerozměrném prostoru podobně jako krajíc chleba v mnohem rozsáhlejší rozkrájeném kosmickém bochníku.¹ Bude-li nám přát štěstí, pak správnost této domněnky zaručí, že Velký hadronový srážec (LHC) u švýcarské Ženevy zachytí v nepřiliš vzdálené budoucnosti stopy tohoto bochníku. Druhá z nových odrůd paralelních světů předpokládá speciální bránové světy, které po srážce s dalšími zničí veškerou hmotu v nich obsaženou a ohnivým peklem připomínajícím velký třesk započnou v každém z nich novou etapu vývoje. Třetí scénář postuluje „krajinu“ podle teorie strun, odvozenou od nesmírné různorodosti možných tvarů a velikostí dodatečných prostorových rozměrů, které z teorie vyplývají. Uvidíme, že ve spolupráci s inflačním multivesmírem naznačuje strunová krajina existenci obří sbírky vesmírů, v níž je realizován každý možný tvar dodatečných rozměrů.

V 6. kapitole se soustředíme na to, jak tyto úvahy objasňují jeden z nejpřekvapivějších výsledků pozorování na sklonku 20. století: že prostor, jak se zdá, je vyplněn homogenní a rozptýlenou odrůdou energie, která by mohla být ztělesněním Einsteinovy nechvalně známé kosmologické konstanty. Toto pozorování, jímž se nechala inspirovat značná část nedávného výzkumu paralelních vesmírů, je zároveň i rozbuškou vedoucí k jedné z nejemocionálnějších debat za poslední desetiletí. Šlo v ní o charakter vysvětlení, která lze přijmout jako vědecká. A 7. kapitola spojí toto téma s obecnější otázkou, zda úvahy o vesmírech, které se nalézají vně vesmíru nám známého, lze právoplatně považovat za vědní disciplínu. Lze tyto myšlenky ověřovat? A pokud nám tyto ideje poslouží k vyřešení otevřených otázek fyziky, učinili jsme nějaký opravdový pokrok, nebo jsme pouze zametli problémy pod kosmický koberec, kam se „naštěstí“ nikdo nemůže dostat? Snažil jsem se obnažit podstatu těchto konfliktních postojů, ale zároveň jsem představil i svůj vlastní pohled, podle něhož za jistých okolností nesporně paralelní vesmíry do kompetencí vědy náležejí.

Kvantová mechanika se svou verzí paralelních vesmírů ve formě mnoha světů je tématem 8. kapitoly. Ta stručně připomene podstatné rysy kvantové mechaniky a hned poté se soustředí na problém, který nahání hrůzu největší: jak získat jednoznačné výsledky z teorie, jejíž základní kostra umožňuje vzájemně neslučitelným realitám koexistovat v amorfní, byť matematicky precizní mlze. Pochtivě vás provedu úvahami, které ve snaze o odpověď zakotvují kvantovou povahu reality ve své vlastní hojnosti paralelních světů.

V 9. kapitole vás zavedu ještě hlouběji do kvantové reality, k něčemu, co považuji za tu nejpodivnější ze všech verzí paralelních vesmírů. K domněnce, která se postupně vynořila během třiceti let teoretických rozborů kvantových vlastností černých děr. Tato představa dosáhla svého vrcholu v posledních deseti letech v jednom ohromujícím výsledku strunové teorie, z něhož plyne, že všechny naše vjemy a zážitky nejsou ničím jiným než holografickou projekcí procesů, které se ve skutečnosti odehrávají na nějakém vzdáleném povrchu,

který nás obklopuje. Štípnete-li se, ucítíte bolest jako opravdovou, ale přesto půjde jen o odraz paralelního děje odehrávajícího se v odlišné a vzdálené realitě.

Nakonec – v 10. kapitole – si posvítíme na ještě imaginárnější možnost: na to, že hlavní úlohu hrají vesmíry umělé. K tomu se nejprve budeme muset vypořádat s otázkou, zda nám vůbec fyzikální zákony dávají moc nové vesmíry vytvářet. A hned nato se podíváme na hypotetické vesmíry, které nebyly vytvořeny z „hardwaru“, ale ze „softwaru“ – vesmíry, které lze simulovat na superpokročilém počítači –, a prozkoumáme, zda máme důvod věřit, že my sami nežijeme v simulaci někoho (nebo něčeho) jiného. Tím se dostaneme k odrůdě paralelních vesmírů zrodilší se v myslích filozofů a neomezeně téměř ničím: podle této představy je každý možný vesmír realizován někde uvnitř něčeho, co je nezbytně nejvelkolepějším ze všech multivesmírů. A tak se výklad přirozeně stočí k rozjímání o tom, jakou roli hraje matematika při odkrývání záhad vědy, a nakonec i k tomu, zda máme naději, že realitě budeme rozumět stále lépe.

Kosmický řád

Problematika paralelních vesmírů je vysoce spekulativní. Žádné pozorování ani experiment dosud neprokázaly, že by kterákoli z verzí této myšlenky byla v přírodě realizována. Skutečným cílem této knihy proto není přesvědčit vás o tom, že jsme součástí multivesmíru. Sám nejsem přesvědčen – a obecně řečeno, nikdo by neměl být přesvědčen – o ničem, co nelze podložit nezpochybnitelnými daty. Jedním dechem však hned dodávám, že za zvláštní a snad i přesvědčivé považuji, že téměř každá větev moderního fyzikálního pokroku, je-li studována do dostatečné hloubky, nakonec narazí na některou z variant myšlenky o paralelních vesmírech. Není to tedy tak, že by fyzici drželi v rukou napjatou multivesmírnou síť a čekali, až se do ní chytí jakákoli teorie, a pak ji vymodelovali a zasadili do paradigmatu paralelních vesmírů, ať to stojí, co to stojí. Naopak bychom mohli říct, že všechny scénáře paralelních světů, jimž se budeme vážně věnovat, přirozeně vyplynou z matematiky teorií rozvinutých za účelem popisu skutečných experimentálních dat a pozorování.

Mým cílem tedy bude jasně a stručně předvést intelektuální kroky a poslušnosti teoretických poznatků, které přivedly fyziky k myšlence vzít z mnoha úhlů pohledu vážně možnost, že náš vesmír může být jen jedním z mnoha. Chci, abyste získali cit pro to, jak moderní vědecké bádání – a nikoli nespoutané fantazie o zrcadlech v dobách, kdy jsem byl chlapcem – přirozeně vede k této ohromující možnosti. Věřím, že ukážu, jak se jistá, jinak ale zapeklitá pozorování mohou stát dokonale srozumitelnými v rámci jednoho nebo druhého multivesmírného paradigmatu, a zároveň popíšu i klíčové a dosud nevyřešené otázky, které zatím mohou bránit tomu, aby tento přístup k realitě

naplno ukázal svou schopnost vysvětlovat záhady světa. Byl bych rád, kdybyste po přečtení této knihy měli pocit, že se váš smysl pro to, kde končí realita – a kam až může dohlédnout moderní věda –, obohatil a zároveň i oživil.

Někteří z vás se samotného pojmu paralelních světů zaleknou v obavě, že jsme-li součástí multivesmíru, pak náš domov a naše důležitost ve vesmíru ztrácejí na významu. Já si to nemyslím. Nepřipadá mně rozumné měřit význam podílem na objemu. Spíše vidím jeden z nejuspokojivějších rysů lidskosti a jeden z nejvíce vzrušujících důsledků vědeckého výzkumu v něčem jiném: ve schopnosti přemostit se analytickým myšlením přes obří vzdálenosti, dostat se do prostoru vnějšího i vnitřního a – prokážou-li se některé myšlenky z této knihy jako pravdivé – dostat se i mimo náš vesmír. Je to právě naše hluboké porozumění světu, které jsme nabyli navzdory své samotářské poloze uprostřed tichého, mrazivého, černočerného a hrůzu nahánějícího vesmíru, jež vyvolává ozvěny napříč ohromným objemem reality a je znamením našeho příchodu na svět.

Kapitola druhá

Bezedný sklad dvojníků

Sešíváný multivesmír

Kdybyste se vydali hlouběji do vesmíru a cestovali stále dál a dále, zjistili byste, že prostor pokračuje donekonečna, nebo že někde náhle končí? Nebo byste snad obkroužili vesmír a vrátili se do stejného bodu, jak to udělal sir Francis Drake, když obeplul zeměkoulí? Obě možnosti – jak vesmír, který se rozpíná donekonečna, tak i ten obrovský, ale konečný – jsou slučitelné se všemi pozorováními a obě se několik posledních desetiletí staly předmětem zájmu důkladného studia vůdčích badatelů. Navzdory tomu všemu zkoumání má však varianta nekonečného vesmíru jeden závratný důsledek, kterému se dostalo jen poměrně skromné pozornosti.

Představte si, že v dalekých končinách nekonečného vesmíru existuje galaxie, která vypadá stejně jako Mléčná dráha a obsahuje sluneční soustavu, jež jako by z oka vypadla té naší a hostí planetu, která je duplikátem Země, a na ní dům nerozlišitelný od toho vašeho a obývaný bytostí, která vypadá přesně jako vy, právě čte tuto knihu a představuje si, jak se blížíte ke konci této věty kdesi v daleké galaxii. A taková kopie není ve vesmíru jen jedna. V nekonečném vesmíru je jich nekonečně mnoho. V některých z nich váš dvojník nebo dvojnice právě čte tuto větu současně s vámi. V jiných přeskočil(a) kus textu nebo odložil(a) knihu, aby se občerstvil(a). A v úplně jiných má zase tak mizernou náladu, že byste se s ním nebo s ní nechtěli setkat v nějaké temné aleji.

A to si pište, že ani nesetkáte. Tyto vaše kopie by obývaly oblasti natolik vzdálené, že by ani světlo za celou dobu, která nás dělí od velkého třesku, nemělo dostatek času překlenout obří prázdnotu prostoru, která vás odděluje. Nevládneme sice schopností tyto oblasti pozorovat, ale uvidíme, že ze základních fyzikálních principů plyne, že je-li vesmír nekonečně velký, stal se domovem nekonečně mnoha paralelních světů, z nichž některé jsou totožné s tím naším, jiné se od něho liší a ještě další se našemu světu nepodobají ani vzdáleně.

Na cestě k těmto světům musíme nejdříve pochopit podstatné pojmy kosmologie, vědecké disciplíny studující původ a vývoj vesmíru jako celku.

Tak se do toho pustíme.

Otec velkého třesku

„Vaše matematika je správná, zato vaše fyzika je opovrženíhodná.“ Solvayská konference o fyzice v roce 1927 byla v plném proudu, když takto Albert Einstein zareagoval na informaci Belgičana Georsese Lemaîtrea o tom, že z rovnic obecné relativity, které Einstein sepsal o více než deset let dříve, plyne dramatická revize příběhu o stvoření světa. Podle Lemaîtreových výpočtů začal vesmír svůj život jako malinké zrnko nesmírné hustoty neboli „prvotní atom“, jak mu říkal, který ohromně dlouhou dobu bobtnal, až se nakonec změnil v pozorovatelný vesmír.

Mezi desítkami slavných fyziků byl Lemaître zajímavou postavou, podobně jako sám Einstein, který si vyjel do bruselského hotelu Metropole na týden intenzivních debat o kvantové teorii. Do roku 1923 stačil Lemaître nejen získat doktorát, ale i zakončit studia v jezuitském semináři svatého Rumbolda a být vysvěcen na kněze. V průběhu konference přistoupil, s kolárkem na správném místě, k objeviteli rovnic, které se – jak věřil – staly základem nové vědecké teorie o původu vesmíru. Einstein o Lemaîtreově teorii věděl, článek, jenž se těmito otázkám věnoval, četl o několik měsíců dříve, a v Lemaîtreových manipulacích s rovnicemi obecné relativity nemohl najít žádnou chybu. Nakonec to nebylo poprvé, co někdo Einsteinovi tento výsledek ukázal. V roce 1921 dospěl ruský matematik a meteorolog Alexandr Fridman k celé množině řešení Einsteinových rovnic, podle nichž se prostor rozpínal a vesmír zvětšoval. Einstein, který měl k takovým řešením odpor, nejdříve naznačil, že se Fridmanovy výpočty utápějí v moři chyb. V tom se Einstein mýlil a později své tvrzení odvolal. Pěšákem ve službách matematiky však odmítal být i poté. Před rovnicemi dal přednost vlastní intuici o tom, jak by se vesmír *měl* chovat, a hluboce zakořeněné víře, že vesmír existuje věčně a na nejdelších měřítkách je pevný a neměnný. Pokáral Lemaîtrea a pravil, že vesmír se nerozpíná a ani to nikdy nedělal.

O šest let později Einstein soustředěně sledoval řečníka v přednáškové místnosti kalifornské observatoře Mount Wilson. Lemaître tehdy předkládal podrobnější verzi své teorie o tom, že vesmír začal prvotním zábleskem a že galaxie jsou hořícími doutnajícími uhlíky unášenými nafukujícím se mořem prostoru. Jakmile seminář skončil, Einstein povstal a prohlásil Lemaîtreovu teorii „nejkrásnějším a nejuspokojivějším vysvětlením stvoření, jaké kdy slyšel“.¹ Nejslavnější fyzik dospěl k rozhodnutí změnit názor na jednu z nejnáročnějších záhad světa. A Lemaître, stále neznámý v očích široké veřejnosti, si mezi vědci vydobyl přívlastek otce velkého třesku.

Obecná relativita

Kosmologické teorie rozpracované Fridmanem a Lemaîtreem stavěly na rukopisu, který Einstein zaslal do německých *Annalen der Physik* 25. listopadu

1915. Tímto článkem vyvrcholila jeho téměř desetiletá matematická odysea a výsledky, k nimž dospěl – obecná teorie relativity – lze považovat za jeho nejúplnější a nejdalekosáhlejší vědecký výdobytek. Ve své obecné teorii relativity Einstein elegantním geometrickým jazykem od základu přestavěl naše porozumění gravitaci. Jestliže se už cítíte obeznámeni se základními rysy a kosmologickými důsledky této teorie, nebojte se přeskočit tři následující podkapitoly. Ale pokud si chcete připomenout několik z jejich nejdůležitějších poznatků, tak mě neopouštějte.

Einstein začal na obecné teorii relativity pracovat roku 1907, v době, kdy si většina vědců myslela, že gravitace byla definitivně vysvětlena už dávnými pracemi Isaaca Newtona. Jak se středoškolští studenti povinně učí po celém světě, Newton předložil svůj univerzální gravitační zákon na sklonku 17. století. Poskytl tak lidstvu první matematický popis této nejznámější síly přírody. Jeho zákon je natolik přesný, že inženýrům v NASA dodnes slouží k výpočtu trajektorií kosmických plavidel a astronomové s ním i nadále předpovídají pohyb komet, hvězd i celých galaxií.²

Kvůli této prokazatelné efektivnosti je ještě pozoruhodnější skutečnost, že si Einstein počátkem 20. století uvědomil zásadní vady, jež Newtonův gravitační zákon zatěžují. V plné nahotě tyto defekty ukázala zdánlivě prostoduchá otázka: Jak, ptal se Einstein, gravitace funguje? Jak to, že je Slunce například schopno ovládnout 150 milionů kilometrů prázdného prostoru a ovlivnit pohyb Země? Jak může gravitace své silové působení uplatnit, když mezi oběma tělesy není napjat žádný provaz a Země netahá žádný řetěz?

Ve svých *Principiích*, otištěných roku 1687, docenil Newton důležitost této otázky, ale uznal, že jeho vlastní zákon nabízí místo odpovědi jen trapné ticho. Byl si jistý, že musí existovat něco, čím se působení gravitace přenáší z jednoho místa na druhé, ale co by to mohlo být, nebyl schopen zjistit. V *Principiích* posměšně poznamenal, že tuto otázku ponechává „k zamyšlení čtenáři“, a čtenáři přes dvě staletí tento domácí úkol jednoduše opomíjeli. To ale Einstein udělat nemohl.

Velkou část onoho zmíněného desetiletí Einsteina pohlcovalo úsilí mechanismus způsobující gravitaci nalézt; v roce 1915 konečně přišel s odpovědí. Navzdory ukotvení teorie v důmyslné matematice a přes obří koncepční skoky, které přinesla a které neměly v dějinách fyziky obdobu, se jeho teorie vyznačovala stejným svěžím vánkem jednoduchosti jako otázka, kterou si kladla za cíl zodpovědět. Jakým procesem dokáže gravitační působení přemostit prázdný prostor? Ke střetu s prázdnou prázdného prostoru měli zdánlivě všichni fyzici k dispozici jen holé ruce. Ale něco v prázdném prostoru přece jen je: *prostor*. To Einsteina přivedlo k myšlence, že samotný prostor je médiem gravitace.

Jak k tomu došel? Představte si, že se na velkém kovovém stole kutálí kulička. Protože je povrch stolu plochý, kulička poběží po přímé dráze. Ale když se

po zahřátí ohněm stůl na některých místech prohne a na jiných nadme, zvolí si kulička jinou dráhu, protože bude ovlivněna pokrouceným a rozvlněným povrchem. Einstein tvrdil, že podobný jev se odehrává i v tkanině samotného prostoru. Zcela prázdný prostor se podobá plochému stolu a dovoluje objektům nerušený pohyb po přímé dráze. Přítomnost hmotných těles však ovlivňuje tvar prostoru podobně, jako se zahřátím pokřivil tvar povrchu stolu. Kupříkladu Slunce ve svém okolí vytváří vybouleninu podobnou bublině, která vznikla na rozžhaveném stole. A stejně jako pokroucený povrch stolu přiměl kuličku k pohybu po zakřivené dráze, navádí zakřivený tvar prostoru kolem Slunce Zemi a další planety na jejich oběžné dráhy.

Toto stručné vysvětlení pomíjí důležité podrobnosti. Není to jen prostor, co se zakřivuje: zakřivuje se i čas (proto mluvíme o zakřivení časoprostoru neboli – jak se píše v mnoha českých populárně-vědeckých knihách – prostoročasu); samotná pozemská gravitace je pro pohyb kuličky nezbytná, protože ji tiskne ke stolu (zatímco podle Einsteina nepotřebují zkrouceniny v prostoru a čase žádného pomocníka, protože ony samotné *jsou* gravitací); prostor je třírozměrný, takže když se zakřivuje, děje se tak i v okolí objektu a nejen „pod ním“, jak analogie se stolem klamně naznačovala. Představa zakřiveného stolu nicméně zachycuje podstatu Einsteinova návrhu. Před Einsteinem byla gravitace záhadnou silou, jíž jedno těleso působilo skrze prostor na druhé. Po Einsteinovi se gravitace stala poruchou prostředí, vyvolanou jedním tělesem a určující pohyb tělesa druhého. Podle tohoto vysvětlení jste právě teď připoutáni k podlaze proto, že se vaše tělo snaží sklouznout po zářezu v prostoru (fakticky v časoprostoru), který vyvolala Země.*

Einstein strávil celé roky usilovnou snahou tuto myšlenku přeměnit na precizní matematickou strukturu a výsledné *Einsteinovy rovnice pole*, srdce jeho obecné teorie relativity, nám přesně říkají, jak se prostor a čas zakřivují v závislosti na přítomnosti libovolného množství hmoty (přesněji hmoty a energie; podle Einsteinova vztahu $E = mc^2$, kde E je energie a m hmotnost, lze tyto dvě veličiny zaměnit).³ Se stejnou přesností pak teorie určuje, jak je pohyb čehokoli – včetně hvězd, planet, komet a světla samotného, pohybujících se

* Je jednodušší si představit zakřivený prostor než zakřivený čas, a proto se většina populárních textů o Einsteinově gravitaci soustřeďuje čistě na prostor. Ve skutečnosti je ale gravitační účinek známých objektů, jako je Země a Slunce, převážně způsobován zakřivením času – a ne prostoru. To lze ilustrovat myšlenkovým experimentem se dvěma hodinami, z nichž jedny jsou umístěny na chodníku a druhé na střeše Empire State Building. Protože hodiny na chodníku jsou blíže středu Země, působí na ně o něco silnější gravitace než na hodiny shlížející na Manhattan. Podle obecné teorie relativity se tento rozdíl podepisuje na trochu odlišné rychlosti, s jakou oboje hodiny jdou: pozemské hodiny tikají o něco pomaleji (o miliardtiny sekundy za rok) než hodiny ve větší výšce. Tato odchylka v čase je příkladem toho, co míníme zakřiveným nebo zkrouceným časem. Obecná relativita zajišťuje, že se objekty pohybují směrem k místům, kde hodiny tikají pomaleji; v jistém smyslu „chtějí“ všechny objekty stárnout tak pomalu, jak to jen jde. Einstein takto originálně vysvětlil, proč předmět padá, když ho pustíte.

prostorem – takovým zakřivením časoprostoru ovlivněn; to dovoluje fyzikům provést podrobné výpočty pohybů v kosmu.

Důkazy správnosti obecné teorie relativity se objevily brzy. Astronomové dlouho věděli, že se oběžná dráha Merkura kolem Slunce trochu odchyluje od předpovědí Newtonovy matematiky. V roce 1915 Einstein s pomocí svých nových rovnic trajektorii Merkura přepočítal a tuto nesrovnalost vysvětlil. Tento poznatek později kolegovi Adrianu Fokkerovi vylíčil jako natolik vzrušující, že mu po něm několik hodin bušilo srdce. Astronomická pozorování Arthura Eddingtona a jeho spolupracovníků při zatmění Slunce v roce 1919 potom ukázala, že světlo ze vzdálených hvězd prolétávající v blízkosti Slunce na své cestě k Zemi postupuje po zakřivené dráze, tedy přesně tak, jak obecná teorie relativity předpověděla.⁴ Kvůli tomuto potvrzení – a také kvůli nadpisu v *New York Times* VŠECHNA SVĚTLA NA NEBI NAKŘIVO, MUŽE VĚDY ZACHVÁTILA POSEDLOST – se Einstein rázem ocitl v pozici mezinárodní celebrity jako čerstvě nalezený vědecký génius a právoplatný dědic Isaaca Newtona.

Na nejpůsobivější testy obecné relativity tehdy však svět ještě čekal. V sedmdesátých letech potvrdily pokusy s vodíkovými maserovými hodinami (masery jsou podobné laserům, ale pracují s mikrovlnnou částí spektra) předpověď obecné relativity o zakřivení časoprostoru v okolí Země s přesností 1 ku 15 000. V roce 2003 posloužila sonda Cassini-Huygens k detailnímu rozboru trajektorií rádiových vln v blízkosti Slunce; nasbíraná data souhlasila s předpověďmi obecné relativity s přesností 1 ku 50 000. A jak se sluší na teorii, která už složila zkoušku dospělosti, nosíme si dnes obecnou relativitu i v dlaních. Vojenský globální družicový polohový systém GPS, k němuž se možná připojujete ze svého inteligentního mobilního telefonu, komunikuje se satelity, jejichž vnitřní časovací zařízení běžně započítávají zakřivení časoprostoru, které se projevuje na jejich pohybu kolem Země. Kdyby ho nezapočítávaly, jimi vydávané informace o poloze by se v mžiku staly nepřesnými. Co vzniklo v roce 1916 jako sada abstraktních rovnic, s nimiž Einstein nabídl nový popis prostoru, času a gravitace, se dnes běžně využívá v zařízeních, která se vejdou do kapsy.

Vesmír a šálek čaje

Einstein časoprostoru vdechl život. Vzepřel se tisícům let intuice, která vzešla z každodenních zkušeností a která nahlížela na prostor a čas jako na neměnné pozadí. Kdo by si uměl představit, že se časoprostor může svíjet a ohýbat a že je něčím jako hlavním choreografem veškerého pohybu ve vesmíru? A tento revoluční tanec si Einstein dokázal představit a potvrdila ho pozorování. A přesto i on zanedlouho zakopl o zátěž prastarých, leč nepodložených předsudků.

Během prvního roku poté, co publikoval svou obecnou teorii relativity, ji Einstein aplikoval na nejhromnějších měřítkách: na celý vesmír. Mohlo by se vám to zdát jako obrovský úkol, ale umění teoretické fyziky tkví ve zjednodušení strašidelně komplexního takovým způsobem, že podstatné fyzikální rysy zůstanou zachovány, ale teoretický rozbor se stane schůdným. Je to umění výběru toho, co lze ignorovat. Takzvaným *kosmologickým principem* Einstein vymezil pravidla umění a nauky o teoretické kosmologii.

Zkoumáme-li podle tohoto principu vesmír na nejdelších vzdálenostech, bude se jevit homogenní. Představte si ranní šálek čaje. V mikroskopických měřítkách se v něm projevuje velká nehomogenita. Vedle molekuly H_2O je něco prázdného prostoru a pak zase nějaká molekula polyfenolu nebo taninu. Z makroskopického pohledu prostého oka je však čaj homogenní materiál. Einstein věřil, že vesmír je jako šálek čaje. Námi pozorované variace – Země, vedle ní trochu prázdného prostoru a za ním Měsíc, oddělený prázdným prostorem od Venuše, Merkura, dalších louží prázdného prostoru a Slunce – jsou pouhými nehomogenitami projevujícími se na krátkých vzdálenostech. V kosmologických měřítkách lze tyto variace podle něj ignorovat, neboť se – stejně jako váš čaj – zprůměrují do něčeho homogenního.

V Einsteinových dobách byly argumenty podporující kosmologický princip chabé, pokud se vůbec nějaké uváděly (dokonce i existence dalších galaxií byla jen právě se rodícím poznatkem), ale Einstein byl veden pevnou vírou, že žádné místo ve vesmíru není důležitější než ostatní. Cítil, že v průměru by měly být všechny oblasti vesmíru rovnoprávné a měly by mít v podstatě totožné celkové fyzikální vlastnosti. Astronomická pozorování následujících let podstatně víru v kosmologický princip posílila, ale pouze v případě, že jde o oblasti velké alespoň 100 milionů světelných let v průměru (což je asi tisícinásobek průměru Mléčné dráhy). Rozdělte-li vesmír do krychlových krabic o hraně 100 milionů světelných let, z nichž jedna se nachází *zde* a jiná zase *tam* (ve vzdálenosti třeba miliardy světelných let), a změříte-li průměrné vlastnosti uvnitř každé krabice – průměrnou hustotu galaxií, průměrné množství hmoty, průměrnou teplotu a tak dále –, zjistíte, že jednotlivé krabice od sebe jen stěží rozeznáte. Zkrátka – jestliže jste viděli jeden balík vesmíru o délce 100 milionů světelných let, viděli jste je vlastně všechny.

Tato stejnorodost je klíčová pro využití rovnic obecné relativity jako nástroje ke studiu celého vesmíru. Chcete vidět proč? Představte si krásnou, stejnorodou, hladkou pláž a myslte si, že vás požádám o popsání jejích vlastností na krátkých měřítkách – tedy vlastností každého zrnka písku. Jistě vás to vyděsí – úkol je to prostě příliš náročný. Požádám-li vás však pouze o celkové vlastnosti pláže (třeba o průměrnou hmotnost písku na krychlový metr, průměrnou odrazivost povrchu pláže na čtvereční metr a několik dalších údajů), úkol snadno vyřešíte. Důvodem takové snadnosti řešení je homogenita pláže. Stačí naměřit průměrnou hmotnost písku, teplotu a odrazivost na jednom

místě – a je to. Analogická měření na jiném místě by vedla k téměř totožnému výsledku. Podobně je tomu s homogenním vesmírem. Popsat každou planetu, hvězdu a galaxii by byl úkol nad naše síly, zato popis průměrných vlastností homogenního kosmu je neskutečně jednodušší a – s příchodem obecné teorie relativity – splnitelný.

Jak je to možné? Celkový obsah tohoto obrovského objemu prostoru lze zhruba vyjádřit množstvím „materiálu“, který obsahuje; přesněji hustotou hmoty nebo – ještě přesněji – hustotou hmoty a energie, které daný objem obsahuje. Rovnice obecné teorie relativity vypovídají o tom, jak se tato hustota mění v čase. Kdybychom se však nespolehali na kosmologický princip, bylo by beznadějně obtížné tyto rovnice analyzovat. Je jich deset, a protože každá z nich spleťte závisí na ostatních, tvoří jeden pevný matematický gordický uzel. Naštěstí Einstein zjistil, že když se rovnice aplikují na homogenní vesmír, matematika se zjednoduší; většina z té desítky rovnic začne být přebytečná, a lze je proto nahradit rovnicí jedinou. Kosmologický princip tak roztíná gordický uzel tím, že snižuje stupeň matematické složitosti analýzy hmoty a energie rozprostřené v kosmu do jediné rovnice (najdete ji v poznámkách).⁵

Einstein při zkoumání téhle rovnice zjistil něco neočekávaného, co bylo z jeho pohledu bohužel nestravitelné. Převažovalo přírodovědecké a filozofické mínění, že vesmír je na těch největších měřítkách nejen homogenní, ale i neměnný. Právě jako se rychlé molekulární pohyby ve vašem čaji zprůměrují do kapaliny, při pohledu zvnějšku statické, astronomické pohyby, například oběh planet kolem Slunce nebo pohyb Slunce v Galaxii, by se měly zprůměrovat do vesmíru ve svém celku neměnného. Einstein – stoupenec tohoto kosmického světónázoru – si uvědomil, že je v rozporu s obecnou relativitou. Z matematiky vyplývalo, že hustota hmoty a energie *nemůže* být konstantní v čase. Buď hustota roste, nebo klesá, ale nemůže zůstat beze změny.

Přestože je matematická analýza vedoucí k tomuto závěru důmyslná, pro pochopení jejího fyzikálního obsahu člověk zas tolik fantazie nepotřebuje. Představte si dráhu baseballového míčku, který se vznáší od pálky směrem k oplocení. Míček nejprve rychle vystřelí nahoru, potom ve svém letu zpomalí, a když dosáhne nejvyššího bodu, začíná zase padat dolů. Míček ani na chvíli nezůstane stát na místě jako vyhlídkový balon, protože gravitace vždy působí jedním směrem a přitahuje míček k povrchu Země. Statická situace, například nerozhodný výsledek při přetahování, vyžaduje dvě stejně velké síly působící v opačném směru, které se vykompenzují. U nafukovacího balonu se například gravitace směrem dolů vyváží s tlakem vzduchu, který tlačí balon nahoru (je naplněn heliem, plynem lehčím než vzduch); na baseballový míček nepůsobí proti gravitaci žádná další síla (odpor vzduchu působí proti pohybu míčku, ale nehraje roli, když je míček v klidu), a tak míček v konstantní výšce nemůže vydržet.

Einstein zjistil, že se vesmír chová spíše jako míček než jako nafukovací balon. Jelikož neexistuje žádná směrem ven působící síla, která by vyvážila gravitační přitažlivost, obecná teorie relativity ukazuje, že vesmír nemůže být statický. Buď se tkanina vesmíru rozpíná, nebo se smršťuje, ale co do velikosti nemůže zůstat neměnná. Krychle vesmíru, která má dnes hranu 100 milionů světelných let, nebude stejně velká i zítra. Buď bude větší a hustota hmoty v této krychli poklesne (s tím, jak se hmota rozptýlí do většího objemu), nebo bude menší a hustota hmoty stoupne (neboť se stlačí do menšího objemu).⁶

Einstein se zalekl. Podle matematiky obecné teorie relativity se vesmír na těch svých největších měřítkách musí měnit, protože se musí měnit jeho vlastní substrát – prostor samotný. Věčný a statický kosmos, který – jak Einstein očekával – měl vzejít z jeho rovnic, z nich jednoduše nevyplýnul. A Einsteina, který započal kosmologii jako vědní disciplínu, zarmoutilo, kam až ho matematika zavedla.

Jak zdanit gravitaci

Často se říká, že Einstein raději přimhouřil oči – vrátil se ke svým sešitům a v zoufalství svoje krásné rovnice upravil, aby byly v souladu s vesmírem nejen homogenním, ale i neměnným. To je ale pravda jen zčásti. Skutečně své rovnice pozměnil, aby podporovaly jeho přesvědčení o statickém kosmu, ale jeho úpravy byly jen minimální a veskrze rozumné.

Abyste si udělali jakous takous představu o jeho matematickém kroku, připomeňte si daňový formulář. Mezi řádkami, do nichž zapisujete své údaje, jsou i řádky, které nevyplňujete. Matematicky představuje prázdná řádka nulu, ale psychologicky říká něco navíc. Znamená, že řádku ignorujete proto, že podle vašeho přesvědčení není pro vaši finanční situaci podstatná.

Kdybychom uspořádali matematiku obecné relativity jako daňové přiznání, mělo by tři řádky. Jedna by zahrnovala geometrii časoprostoru – jeho pokroucení a zakřivení –, tedy ztělesnění gravitace. Další by reprezentovala rozložení hmoty v prostoru, tedy zdroj gravitace – příčinu zakřivení a pokroucení. V průběhu desetiletí horlivého bádání vypracoval Einstein matematický popis těchto dvou položek a uvedené dvě řádky tedy velmi pečlivě vyplnil. Ale úplný zákon o dani z obecné relativity vyžaduje ještě řádku třetí. Ta je sice matematicky zcela rovnoprávná se zbylými dvěma, ale její fyzikální význam je delikátnější. Když obecná teorie relativity povýšila prostor a čas na dynamické aktéry vývoje kosmu, změnila je z jazykových nástrojů vypovídajících o tom, kde a kdy se odehrávají události, na fyzikální objekty, které také mají své vlastnosti. Třetí řádka na daňovém přiznání obecné teorie relativity vyčísluje konkrétní veličinu spojenou s časoprostorem, jež má vliv na gravitaci: *množství energie přiříté ke tkanině prostoru samotného*. Právě tak jako každý krychlový metr vody obsahuje určité množství energie, závislé na teplotě vo-

dy, tak i každý krychlový metr prostoru obsahuje jisté množství energie, a to množství vyjádřené číslem na třetí řádce. Ve svém článku ohlašujícím obecnou teorii relativity Einstein tuto řádku nevyplnil. Matematicky je to, jako by vyplnil nulu, ale stejně jako v případě daňového přiznání lze říct, že tu řádku prostě ignoroval.

Jakmile se obecná relativita ukázala jako neslučitelná se statickým vesmírem, Einstein se k matematice vrátil a tentokrát se na třetí řádku podíval zevrubněji. Uvědomil si, že neexistuje žádné pozorování nebo experimentální zdůvodnění toho, proč do ní zapsat nulu. A také se dovtípil, že ta řádka ztělesňuje pozoruhodný fyzikální potenciál.

Zapišeme-li totiž místo nuly do třetí řádky kladné číslo a obdaříme-li tkaničku prostoru homogenní kladnou energií, potom, jak si povšiml Einstein (a jak vysvětlím v další kapitole), bude každá oblast prostoru odtlačovat jakoukoli oblast další, což povede k něčemu, co fyzici považovali za nemožné: k *odpudivé* gravitaci. Einstein navíc ještě zjistil, že pokud přesně nastaví velikost čísla na třetí řádce, odpudivá gravitační síla napříč vesmírem přesně vyváží obvyklou přitažlivou gravitaci způsobenou hmotou, která prostor vyplňuje – a vznikne statický vesmír. Podobně jako nafukovací balon, který nestoupá ani neklesá, by byl vesmír neměnný.

Einstein nazval položku v třetí řádce *kosmologickým členem* nebo *kosmologickou konstantou*; jakmile ji doplnil tam, kam patřila, mohl klidně spát. Nebo alespoň klidněji. Má-li vesmír kosmologickou konstantu správné velikosti – tedy je-li prostor obdařen správnou dávkou sobě vlastní energie –, jeho teorie gravitace začne souhlasit s převládající vírou, že vesmír se na nejdelších měřítkách nevyvíjí. Einstein nemohl vysvětlit, proč má prostor přesně správné množství energie, aby k této rovnováze došlo, ale alespoň prokázal, že obecná teorie relativity, doplněná o kosmologickou konstantu správné velikosti, umožňuje existenci vesmíru toho druhu, který on i další očekávali.⁷

Prvotní atom

Přibližně ve stejné době, na solvayské konferenci v Bruselu roku 1927, přistoupil k Einsteinovi Lemaître a oznámil mu svoje zjištění, že obecná teorie relativity vede k novému kosmologickému paradigmatu, v němž se prostor rozpíná. Protože Einstein už zápasil s matematikou potřebnou pro statický vesmír a poněvadž už dříve odmítl podobná tvrzení od Fridmana, chyběla mu trpělivost, aby se rozpínajícím se vesmírem zabýval znovu. Vyčinil tedy Lemaîtreovi za to, že se přijímáním očividně absurdních závěrů stal otrokem matematiky a praktikuje „opovržením hodnou fyziku“.

Pokárání od ctěné osobnosti není žádný drobný nezdar, Lemaître se jím však dlouho netrápil. Když roku 1929 Edwin Hubble shromáždil údaje z tehdy největšího dalekohledu světa na observatoři Mount Wilson, přesvědčivě z nich

plynulo, že všechny vzdálené galaxie utíkají pryč od Mléčné dráhy. Vzdálené fotony, které Hubble prozkoumal po jejich přiletu na Zemi, přinášely jasné poselství: vesmír není statický. *Rozpíná se*. Einsteinovo rozhodnutí přidat kosmologický člen tedy bylo nepodložené. Model velkého třesku, v němž kosmos začal v nesmírně stlačeném stavu a od té doby se rozpíná, byl brzy obecně přijat jako vědecká verze příběhu o stvoření světa.⁸

Lemaître a Fridman byli rehabilitováni. Fridmanovi se dostalo uznání za to, že poprvé zkoumal řešení s rozpínajícím se vesmírem, a Lemaîtreovi za jeho nezávislé rozpracování těchto řešení do robustních kosmologických scénářů. Jejich práce byla náležitě velebena jako triumf matematiky při odhalování toho, jak funguje vesmír. Naopak Einstein litoval toho, že vůbec třetí řádkou daňového přiznání obecné relativity mrhal čas. Kdyby býval nebyl omezen předsudky o tom, že vesmír musí být statický, kosmologickou konstantu by nikdy nezavedl a mohl by snad i předpovědět rozpínání vesmíru víc než deset let předtím, než bylo pozorováno.

Příběh kosmologické konstanty tím nicméně ani zdaleka neskončil.

Modely a data

Kosmologický model velkého třesku obsahuje jeden detail, který se ukáže jako podstatný. Nabízí nám totiž nejen jeden, ale hned několik kosmologických scénářů; všechny předpovídají rozpínání vesmíru, ale liší se v pohledu na celkový tvar prostoru – a zvláště na otázku, zda je prostor jako celek konečný, nebo nekonečný. Protože rozdíl mezi konečným a nekonečným prostorem bude podstatný i pro náš výklad o paralelních světech, jednotlivé možnosti představím.

Kosmologický princip – předpokládaná homogenita vesmíru – omezuje geometrii prostoru. Většina tvarů nepřichází v úvahu proto, že nejsou dostatečně rovnoměrné: tyto tvary se nafukují zde, zplošťují jinde a kroutí o kus dále. Přesto z kosmologického principu neplyne *jediný možný* tvar našich tří prostorových rozměrů; místo toho princip zužuje možnosti na velmi omezený seznam kandidátů. Dokonce i profesionálové mají problém si je představit, ale je užitečné si všimnout, že nám situace se *dvěma* rozměry nabízí matematicky přesnou a snadno představitelnou analogii.

K tomuto účelu si nejprve představte dokonale kulatou kulečnickovou kouli. Její povrch je dvourozměrný (právě jako na povrchu Země lze polohu bodu určit dvěma čísly – například zeměpisnou šířkou a zeměpisnou délkou – proto také mluvíme o dvourozměrném tvaru) a dokonale homogenní v tom smyslu, že všechna místa vypadají stejně. Matematici nazývají povrch kulečnickové koule *dvourozměrnou sférou* a říkají, že má *konstantní kladnou křivost*. Zhruba řečeno znamená „kladné“ znaménko to, že prohlédnete-li si svůj obraz ve sférickém zrcadle, bude se vydouvat směrem ven, zatímco „konstantní“ zase

znamená, že nehledě na to, na jakém místě sféry je váš obraz, bude vždy stejně deformovaný.

Dále si představte dokonale hladký povrch stolu. Stejně jako v případě povrchu koule je homogenní. Tedy téměř. Mravenci pochodujícímu po stole nabízí každý bod stolu stejný výhled jako všechny ostatní, ale jen tehdy, je-li dostatečně daleko od hrany stolu. Není ale těžké obnovit dokonalou homogenitu. Stačí si představit stůl bez konců a hran a to lze dvěma způsoby. Jedním z nich je stůl rozprostírající se donekonečna zleva doprava i zepředu dozadu. Takový nekonečně velký povrch je neobvyklý – ale je příkladem stolu bez hran, protože z nekonečně velkého stolu nelze spadnout. Druhou možností je deska stolu připomínající obrazovku z prastarých videoher. Když slečna Pac-Manová překročí levý okraj obrazovky, objeví se na pravé, překročí-li dolní okraj, objeví se nahoře. Stůl s takovou vlastností nikde na světě nenajdete, ale z geometrického hlediska je tento tvar zcela v pořádku; říká se mu dvourozměrný *torus*. Podrobněji se o něm dočtete v poznámkách.⁹ Zde nám stačí vědět, že je stejně jako nekonečný stůl homogenní a nemá žádné hrany. Zdánlivé hranice, k nimž se slečna Pac-Manová přibližuje, jsou jen fiktivní; lze jimi projít a zůstat přitom ve hře.

Matematici říkají, že nekonečný stůl a obrazovka z videohry jsou tvary s *konstantní nulovou křivostí*. „Nula“ znamená, že váš odraz v zrcadle jednoho z těchto dvou tvarů není deformovaný, kdežto „konstantní“ znamená totéž co dříve: že váš obraz vypadá stejně na všech místech zrcadla. Rozdíl mezi oběma tvary začne být zřetelný pouze z globálního pohledu. Pojedete-li po nekonečném stole rovně, nikdy se nevrátíte domů; ve videohře byste ale objeli obrazovku a vrátili se na startovní metu, aniž byste kdy otočili volantem.

A nakonec jeden tvar, který se trochu hůře znázorňuje – vlastně jde o tvar bramborového lupínku Pringles, prodlouženého donekonečna –, představuje ještě jeden zcela homogenní tvar, který má v řeči matematiky *konstantní zápornou křivost*. „Záporná“ znamená, že váš odraz na zrcadle tohoto tvaru bude smršťený směrem dovnitř.

Naštěstí lze tyto popisy dvourozměrných homogenních tvarů bez námahy zobecnit na třírozměrné tvary vesmíru, o který opravdu jde. Kladná, záporná a nulová křivost – homogenní vydutí ven, smršťení dovnitř a nedeformovaný obraz – stejně dobře charakterizují homogenní třírozměrné tvary. Máme v podstatě dvojnásobné štěstí, protože jakkoli obtížné je si tyto třírozměrné tvary představit (když si představujeme tvary, těžko se zbavujeme předpokladu, že jsou umístěny v prostředí – letadlo *ve* vzduchu, planeta *v* prostoru –, ale pokud jde o prostor samotný, žádné vnější prostředí prostor obsahující neexistuje), homogenní třírozměrné tvary jsou natolik přiléhavými analogiemi svých dvourozměrných protějšků, že neobětujete žádnou přesnost, uděláte-li to, co dělají i fyzici: použijete dvourozměrné příklady jako názorné modely situace.

TVAR	DRUH ZAKŘIVENÍ	PROSTOROVÁ VELIKOST
sféra	kladné	konečná
deska stolu	nulové (čili „ploché“)	nekonečná
obrazovka videohry	nulové (čili „ploché“)	konečná
lupínek Pringles	záporné	nekonečná

Možné tvary prostoru slučitelné s předpokladem, že každé místo v prostoru je rovnoprávné se všemi ostatními (kosmologický princip).

V tabulce nahoře jsem shrnul možné tvary a zdůraznil, že některé z nich mají konečný objem (sféra a obrazovka videohry), zatímco jiné jsou nekonečné (nekonečná deska stolu a nekonečný lupínek Pringles). Tabulka je však ve své nynější podobě neúplná. Existují ještě i další možnosti, s báječnými názvy jako *binární tetrahedrální (čtyřstěnný) prostor* a *Poincarého dodekahedrální (dvanáctistěnný) prostor*, které mají také homogenní křivost, ale které jsem vynechal proto, že je těžší si je představit na základě objektů každodenního života. Rozvážným řezáním a frézováním je lze získat z tvarů v mém seznamu, a tak tabulka poskytuje alespoň reprezentativní vzorek. Jde však o detaily nepodstatné pro náš hlavní závěr: *Homogenita vesmíru uzákoněná v kosmologickém principu podstatně filtruje možné tvary vesmíru. Některé z možných tvarů mají konečný rozsah, zatímco jiné ne.*¹⁰

Náš vesmír

Rozpínání vesmíru matematicky nalezené Fridmanem a Lemaîtreem platí doslova pro vesmíry, které mají kterýkoli z těchto tvarů. V případě kladné křivosti si představte dvourozměrný model balonku, do něhož pumpujeme vzduch a tak ho nafukujeme. V případě nulové křivosti poslouží roztažená guma, která se rozpíná do všech směrů. Vesmír s negativní křivostí vypadá jako kus gumy vymodelované do tvaru lupínku Pringles, která se opět může roztahovat. Jestliže galaxie považujeme za třpytky rovnoměrně rozprostřené po jedné z těchto ploch, má rozpínání prostoru za důsledek pohyb třpytících se bodů – galaxií – od sebe navzájem, přesně tak, jak potvrdila Hubbleova pozorování z roku 1929.

Je to přesvědčivá kosmologická šablona, ale má-li být definitivní a úplná, potřebujeme určit, který z tvarů je vlastní našemu vesmíru. To, jaký tvar známý objekt – například věneček, baseballový míček nebo kostka ledu – má, zjistíme tak, že jej vezmeme do ruky a prohlédneme z různých stran. Takhle metoda bohužel nefunguje u vesmíru, a proto musíme určovat tvar nepřímou. Rovnice obecné teorie relativity nabízejí matematickou strategii. Ukazují, že se zakřivení prostoru redukuje na jedinou pozorovatelnou veličinu: na hustotu hmoty (přesněji hmoty a energie) v prostoru. Jestliže je hmoty mnoho,

přinutí gravitace prostor, aby se zakřivil sám do sebe a nabyl sférického tvaru. Je-li hmoty málo, má prostor příležitost šířit se směrem ven do tvaru lupínku Pringles. A je-li množství hmoty tak akorát, prostor bude mít nulovou křivost.*

Rovnice obecné relativity také poskytují přesnou demarkační čáru mezi těmito třemi možnostmi. Matematika ukazuje, že „správné množství hmoty, které je tak akorát“, takzvaná kritická hustota, je dnes asi $2 \cdot 10^{-26}$ kilogramu na krychlový metr, tedy asi šest vodíkových atomů na metr krychlový nebo – zůstaneme-li u známých objektů – dešťová kapka na objem o velikosti zeměkoule.¹¹ Když se porozhlédneme po okolí, určitě bychom si mohli myslet, že hustota vesmíru převyšuje hustotu kritickou, ale takový závěr by byl ukvapený. Matematický výpočet kritické hustoty předpokládá, že hmota je rozprostřena v prostoru rovnoměrně. Takže si musíte představit Zemi, Měsíc, Slunce a všechno ostatní rozdrčené na atomy a ty rovnoměrně rozprášené do kosmu. Otázkou je, zda každý metr krychlový bude potom vážit více, nebo méně než šest vodíkových atomů.

Pro její důležité kosmologické důsledky se astronomové snažili několik desetiletí průměrnou hustotu vesmíru měřit. A to metodou přímočarou. Výkonnými dalekohledy pečlivě pozorovali velké oblasti prostoru a sčítali hmotnosti hvězd, které mohli vidět přímo, i dalšího materiálu, jehož přítomnost mohli vydedukovat z pohybu hvězd a galaxií. Ještě nedávno se zdálo, že z pozorování plyne, že hustota vesmíru se pohybuje nízko, kolem 27 % kritické hustoty – to odpovídá asi dvěma vodíkovým atomům v každém krychlovém metru –, z čehož by plynul negativně zakřivený vesmír.

O něco později, na sklonku devadesátých let 20. století, se však stalo něco mimořádného. Na základě několika velkolepých pozorování a šňůry úvah (dočtete se o nich v 6. kapitole) si astronomové uvědomili, že do té doby přehlíželi jednu podstatnou položku rozpočtu: energii rozptýlenou tak, že vyplňuje prostor napohled rovnoměrně. Údaje šokovaly skoro každého. Energie zaplavující prostor? To zní skoro jako kosmologická konstanta, zavedená, jak jsme připomenuli, Einsteinem osm let předtím, než ji zase zavrhl. Vzkřísila snad moderní pozorování kosmologickou konstantu?

Stále to nevíme jistě. Dodnes, více než deset let po původních pozorováních, na astronomy čeká úkol rozhodnout, zda je hustota této energie v každé oblasti prostoru konstantní, nebo zda závisí na čase. Kosmologická konstanta, jak její název naznačuje (a jak plyne z jejího vyjádření jediným pevně daným číslem na daňovém přiznání obecné relativity), by měla být neměnná. Aby astronomové nevyhloučili možnost, že se tato energie přece jen mění,

* Pod vlivem našeho dřívějšího povídání o tom, jak hmota zakřivuje oblast, do které je uvržena, byste se mohli divit, jak je možné, že zakřivení může být *nulové*, přestože je přítomna hmota. Správná odpověď je, že rovnoměrná hustota hmoty obecně zakřivuje *časoprostor*; v tomto konkrétním případě má prostor samotný křivost nulovou, ačkoli křivost časoprostoru je nenulová.

a aby zdůraznili i to, že tato energie nevyzařuje světlo (proto se také tak dlouho skrývala před našimi zraky), vymysleli si nový pojem: *skrytá* či *temná energie*. Oba přívlasky kromě toho připomínají i mnoho mezer v našem chápání. Nikdo nedokáže původ skryté energie, její fundamentální složení nebo podrobné vlastnosti vysvětlit – tyto otázky jsou stále pečlivě zkoumány a my se k nim ještě vrátíme v pozdějších kapitolách.

Ale i navzdory četným otevřeným otázkám dospěla důkladná pozorování Hubbleovým vesmírným dalekohledem i dalšími pozemskými observatořemi ke shodě ohledně *množství* skryté energie, která dnes prostorem prostupuje. Výsledná hodnota několikanásobně převyšuje hodnotu kdysi dávno navrženou Einsteinem (protože ten chtěl hodnotu vedoucí k statickému vesmíru, zatímco náš vesmír se rozpíná). To nijak nepřekvapuje. Pozoruhodný je však fakt, že podle měření přispívá skrytá energie vyplňující prostor asi 73 % kritické hustoty. *Připočteme-li je k 27 % kritické hodnoty, kterou astronomové naměřili už předtím, vyjde nám přesně těch 100 % kritické hustoty, tedy přesně správné množství hmoty a energie pro vesmír s nulovou prostorovou křivostí.*

Nejnovější poznatky i pozorování tedy upřednostňují navzdory se rozpínající vesmír vytvarovaný buď do třírozměrné odrůdy nekonečné desky stolu, nebo do konečné obrazovky videohry.

Realita v nekonečném vesmíru

Na začátku této kapitoly jsem podotkl, že nevíme, zda je vesmír konečný, nebo nekonečný. V předchozím textu jsem vyložil důvody, proč si myslet, že obě možnosti mohou přirozeně vyplynout z teoretických studií a že obě jsou slučitelné s nejrafinovanějšími astrofyzikálními měřeními a pozorováními. Jak by jednoho dne mohlo pozorování rozhodnout, která z obou možností je ta správná?

To je těžká otázka. Je-li prostor konečný, potom může část světla vyslaného hvězdami a galaxiemi, než se dostane do našich dalekohledů, několikrát obletět celý vesmír. Podobně jako opakující se obrazy vytvořené párem rovnoběžných zrcadel, mezi nimiž se odráží světlo sem a tam, i světlo obíhající kolem vesmíru by vytvořilo mnohonásobné obrazy hvězd a galaxií. Astronomové takové mnohonásobné obrazy hledali – zatím neúspěšně. To samo o sobě nezaručuje, že je vesmír nekonečný, ale naznačuje to, že je-li vesmír konečný, tak musí být nesmírně rozlehlý, protože světlo zatím nemělo čas, aby kosmickou závodní dráhou několikrát proběhlo. A proto je tak těžké na základě pozorování dané dilema rozhodnout. Byť je třeba vesmír konečný, může svou nekonečnost předstírat, a to tím přesvědčivěji, čím je větší.

Pro některé otázky vznášené kosmologií, třeba pro zjištění věku vesmíru, nehraje rozdíl mezi oběma možnostmi žádnou úlohu. Ať už je vesmír konečný, nebo nekonečný, čím blíže se podíváme k začátku vesmíru, tím byly gala-

xie tlačeny více k sobě, a proto byl vesmír hustší, teplejší a procesy v něm extrémnější. Dnešní pozorování rychlosti rozpínání lze spojit s teoretickým rozbohem, jak se tato rychlost měnila s časem – tak se dozvíme, před jakou dobou byla veškerá hmota stlačena do jediného fantasticky hutného semínka, které bychom mohli označit za počátek všeho. Ať už je vesmír konečný, nebo nekonečný, vždy nám výpočet ukáže, že toto semínko existovalo před 13,7 miliardy let.

To, zda je vesmír konečný, nebo nekonečný, je však důležité z jiného pohledu. V případě konečného vesmíru si například lze přesně představit, že vydáme-li se ke stále ranějším okamžikům jeho života, celkový objem kosmu se stále víc a víc smršťuje. Ačkoli se matematika zhroutlí v samotném čase nula, měli bychom si uvědomit, že v okamžicích libovolně blízkých k tomuto začátku byl vesmír libovolně malinkaté smítko. Je-li ovšem vesmír nekonečný, pak je takový popis chybný. Jestliže je dnes vesmír nekonečný, tak byl nekonečný odjakživa a vždy také nekonečný zůstane. Když se vesmír smršťuje, je jeho obsah stlačován stále víc, čímž jeho hustota roste nade všechny meze. Celkový obsah však zůstává *nekonečný*. Koneckonců, kdybyste nekonečnou desku stolu smrštili dvojnásobně, co dostanete? Půl nekonečna, tedy stále nekonečno. Změníte ji milionkrát, a k čemu teď dojdete? Stále k nekonečnu. Čím víc se blížíme k bodu nula, tím bude nekonečný vesmír hustší, zato jeho velikost zůstane nekonečná.

Ačkoli pozorování ponechávají souboj konečného a nekonečného bez rozřešení, zjistil jsem, že pod tlakem fyzici a kosmologové většinou tíhnou k názoru, že vesmír je nekonečný. Myslím, že tento postoj částečně odráží nahodilý historický fakt, že dlouhá desetiletí nevěnovali badatelé příliš pozornosti konečnému tvaru z videohry, zejména proto, že se hůře matematicky analyzuje. A tento pohled snad také odráží nesprávnou představu, že rozdíl mezi nekonečným a obřím, leč konečným vesmírem je pouze akademická otázka. Nakonec když je vesmír tak velký, že nikdy nevystrčíme nos za hranice malé části celku, mělo by nás to, zda pokračuje o konečnou, nebo nekonečnou vzdálenost za hranici, kam dnes můžeme dohlédnout, vůbec zajímat?

Zajímat by nás to mělo. Otázka konečnosti má hluboký dopad na samotnou povahu reality. A tím se dostáváme do srdce této kapitoly. Zamysleme se nad možnostmi, že vesmír je nekonečně velký, a prozkoumáme, co z toho plyne. Bez větší námahy zjistíme, že my sami obýváme jeden svět v nekonečné sbírce paralelních světů.

Nekonečný prostor a sešivaná deka

Začneme jednoduše tady na Zemi, daleko od rozpínajících se končin nekonečného vesmíru. Představte si, že si vaše přítelkyně Penny, aby ukojila svou zálibu v pestrém oblečení, zakoupila pět set přepychových šatů a tisíc párů

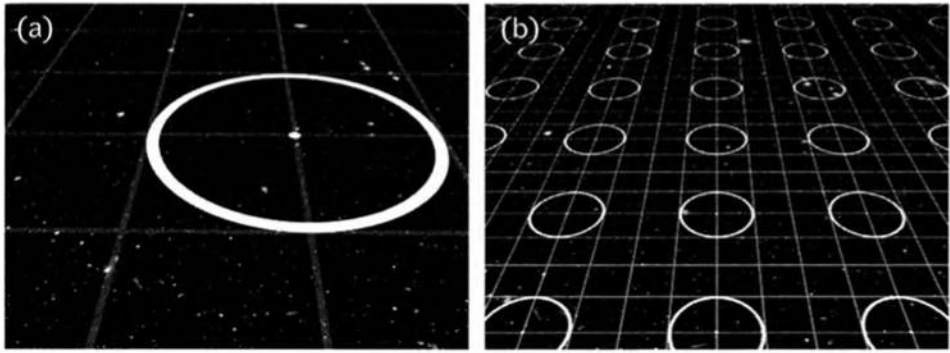
bot přímo od módních návrhářů. Jestliže si každý den obleče jiné šaty a obuje jiné boty, nakonec možné kombinace oblečení a obuvi vyčerpá a vezme na sebe něco, co už na sobě měla. Není těžké spočítat kdy. Pět set šatů a tisíc párů obuvi dává půl milionu různých kombinací. Pět set tisíc dnů je asi 1 400 let, takže pokud bude Penny žít dostatečně dlouho, nakonec ji přistihneme při tom, že jí došla módní fantazie. A kdyby žila nekonečně dlouho, oblékla by každý ze svých „ohozů“ nekonečněkrát. Nekonečné množství dní v kombinaci s konečným množstvím možného oblečení a obutí garantuje nekonečné opakování.

V podobném duchu se podívejme i na Howarda, zkušeného rozdavače karet, který jeden po druhém zamíchal obrovské množství balíčků karet a ty pak položil vedle sebe do úhledné řady. Může se pořadí karet v každém balíčku lišit, nebo se musí opakovat? Odpověď závisí na množství balíčků. Dvaapadesát karet lze uspořádat mnoha způsoby (52 možností, jak vybrat první kartu, krát 51 možností pro druhou krát 50 možností pro další kartu a tak dále). Když počet balíčků, které Howard míchá, převyší počet různých pořadí karet v balíčku, potom se některé z promíchaných balíčků budou shodovat. Kdyby zamíchal nekonečné množství balíčků, pořadí karet v balíčku by se opakovala nekonečněkrát. Stejně jako v případě Penniných šatů zaručuje nekonečný počet pokusů spolu s konečným počtem konfigurací to, že se výsledky musejí nekonečněkrát opakovat.

Toto prosté zjištění je podstatné pro kosmologii nekonečného vesmíru. Objasnění této důležitosti rozdělíme na dvě části.

V nekonečném vesmíru leží většina oblastí za hranicemi, kam můžeme dohlédnout, a to dokonce i těmi nejvýkonnějšími dalekohledy. Třebaže se světlo pohybuje neuvěřitelně rychle, nebude mít od velkého třesku dostatek času, aby k nám doletělo – pokud bylo vysláno ze zdroje, který je dostatečně daleko. Protože vesmír je starý 13,7 miliardy let, mohli byste si myslet, že do této kategorie budou náležet všechny zdroje, které jsou od nás víc než 13,7 miliardy světelných let daleko. Takový úsudek se opírá o víceméně správnou intuici, ale rozpínání vesmíru zvětšilo vzdálenost mezi námi a zdrojem, který kdysi dávno vyslal světlo, které k nám právě doletělo; dnes jsou tedy nejbzdálenější objekty, které můžeme vidět, od nás několiknásobně dále – nějakých 41 miliard světelných let daleko.¹² Na těchto přesných číslech zase tak moc nezáleží. Důležité je, že oblasti vesmíru, jejichž vzdálenost převyšuje určité číslo, se dnes nacházejí za hranicemi, kam dnes můžeme dohlédnout. Stejně jako odplouvající lodě, které už překročily horizont, nejsou z pobřeží vidět, tak podle astronomů objekty ve vesmíru, které jsou příliš daleko, takže je nemůžeme vidět, leží za naším *kosmickým horizontem*.

Podobně světlo vyslané od nás nemohlo ještě do těchto vzdálených oblastí doletět, takže i my se nalézáme za jejich kosmickým horizontem. Kosmické horizonty navíc neoddelují jen místa, která lze vidět, od těch, která spatřit



(a) Protože se světlo pohybuje konečnou rychlostí, pozorovatel ve středu libovolné záplaty (ve středu pozorovatelova kosmického horizontu) se mohl spojit pouze s objekty na stejné záplatě. (b) Dostatečně odlehlé kosmické horizonty jsou příliš vzdálené na to, aby se navzájem jakkoli ovlivnily, a proto se vyvíjejí zcela nezávisle.

nelze. Z Einsteinovy speciální teorie relativity víme, že žádný signál, žádný vzruch, žádná informace a *vůbec nic* se nemůže pohybovat rychleji než světlo – a to znamená, že oblasti vesmíru, které jsou od sebe navzájem tak daleko, že k sobě neměly čas vyslat světelné paprsky, se dosud zákonitě musely vyvíjet zcela nezávisle.

Ve dvourozměrné analogii můžeme přirovnat rozsah prostoru v daný okamžik času k obří dece sešité z kulatých záplat, v níž každá záplata představuje jeden kosmický horizont. Někdo umístěný ve středu takové záplaty mohl vést dialog s kýmkoli na stejné záplatě, ale nemohl navázat kontakt s ničím, co se nachází na jiné záplatě (obrázek *a* nahoře), protože je to zkrátka příliš daleko. Body ležící blízko hranice dvou záplat mohou mít k sobě navzájem blíže než středy obou sousedících záplat, a tak vzájemně interagovat mohly, ale pokud například uvažujeme o záplatách v každé druhé řadě a v každém druhém sloupci kosmické deky, budou teď všechny páry bodů na dvou různých záplatách od sebe navzájem tak daleko, že žádné mezizáplatové interakce zatím nemohly nastat (obrázek *b*). Stejně tak je tomu i v případě tří rozměrů, kde jsou kosmické horizonty – záplaty v kosmické dece – sférického tvaru a kde platí stejný závěr: dostatečně vzdálené záplaty leží mimo sféry vlivu svých kolegů – jde proto o nezávislé oblasti.

Jestliže je prostor rozsáhlý, ale konečný, můžeme ho rozdělit do velkého, ale konečného množství nezávislých záplat. Je-li nekonečný, bude existovat *nekonečný* počet nezávislých záplat. Tento poslední závěr má obzvláštní kouzlo, jehož objasnění je věnována druhá část našeho argumentu. Jak hned uvidíme, v každé jednotlivé záplatě mohou být částice hmoty (přesněji řečeno hmota a všechny formy energie) srovnány pouze do konečného množství různých uspořádání. Ujijeme-li úvahy uplatněné v případě Penny a Howarda, dovtípíme se, že podmínky v nekonečném množství velmi odlehlých záplat –

v oblastech prostoru podobných té, v níž žijeme, a rozptýlených po neomezeném vesmíru – se *zákonitě opakují*.

Konečný počet možností

Představte si, že vás za teplého letního večera otravuje v ložnici dotěrná moucha. Vyzkoušeli jste už plácačku i nehumánní sprej. Nic nezabralo. V zoufalství začnete s mouchou vyjednávat. „Tohle je dost velká ložnice,“ domlouváte jí. „Je tady tolik jiných míst, kde bys mohla být. Nemusíš proto bzučet u mého ucha.“ „Opravdu?“ odpoví moucha vykutáleně. „Kolik těch míst tu máš?“

V klasickém vesmíru by zněla odpověď „nekonečně mnoho“. Vždyť – říkáte mouše – může popoletět (přesněji posunout své těžiště) o 3 metry doleva, 2,5 metru doprava, 2,236 metru nahoru nebo 1,195829 metru dolů, nebo... chápete, co chci říct. Protože se poloha mouchy může měnit spojitě, existuje nekonečně mnoho míst, kde by mohla spočinout. Když tohle všechno mouše vysvětlujete, fakticky si uvědomujete, že kromě polohy si moucha může vybírat z dlouhého seznamu možností i rychlost. V jedné chvíli může být zde a pohybovat se rychlostí jednoho kilometru za hodinu doprava. Nebo může letět doleva rychlostí půl kilometru za hodinu, nebo nahoru čtvrt kilometru za hodinu, nebo dolů 0,349283 kilometru za hodinu a tak dále. Třebaže je její rychlost omezena řadou faktorů (včetně energie, kterou disponuje, protože čím rychleji letí, tím více energie musí spotřebovat), tato rychlost se může spojitě měnit – představuje tedy ještě jeden zdroj nekonečné rozmanitosti.

Mouchu je těžké přesvědčit. „Jsme na stejné frekvenci, když mluvíš o popoletění o centimetr, půl centimetru nebo i čtvrt centimetru,“ tyká vám. „Ale jakmile hovoříš o polohách, které se liší o desetitisíciny nebo statisíciny centimetru či ještě o méně, tak se ztrácím. Intelektuál je může považovat za různá místa, ale přičítá se zdravému rozumu, když říkáš, že *zde* a miliardtinu centimetru nalevo *odtud* jsou různá místa. Takto nepatrné změny polohy vnímat neumím, a proto je nepovažuju za různá místa. Totéž platí pro rychlosti. Můžu rozeznat rozdíl mezi rychlostí kilometr za hodinu a polovinou této rychlosti. Ale rozeznat rozdíl mezi 0,25 kilometru za hodinu a 0,249999999 kilometru za hodinu? To fakt ne. To jenom nějaká vyštudovaná moucha by mohla tvrdit, že takový rozdíl rozpozná. Nedokáže to však žádná z nás. Podle mě jsou to stejné rychlosti. Počet možností je mnohem menší, než to líčíš.“

Moucha zmínila důležitou myšlenku. V principu může zaujímat nekonečnou paletu poloh a nabýt nekonečné spektrum rychlostí. Existuje však praktický limit jemnosti, s jakou lze polohu nebo rychlost měnit, než začne být změna zcela nepozorovatelná. To je pravda i v případě, že moucha disponuje nejlepším technickým vybavením. Vždycky existuje nějaká mezní změna polohy i rychlosti a změny ještě menší zkrátka nelze zaregistrovat. Byť by

byly tyto nenulové přírůstky sebemenší, radikálně zužují paletu možností toho, co lze vnímat.

Dosahují-li například nejmenší zaznamatelné přírůstky polohy setiny centimetru, potom každý centimetr nenabízí nekonečné spektrum možných poloh, ale pouze sto. Každý krychlový centimetr by tedy obsahoval $100^3 = 1\,000\,000$ možností, zatímco vaše průměrná ložnice by jich měla 100 bilionů. Je těžké říct, zda by moucha považovala toto pole možností za dostatečně impozantní, aby vám přestala bzučet u ucha. Poučením každopádně je, že *jakékoli měření kromě dokonale přesného omezuje počet možností z nekonečného na konečné*.

Mohli byste namítnout, že neschopnost rozlišit mezi extrémně podobnými polohami nebo zaznamenat malinké změny rychlosti není nic více než jen technické omezení. Pokrok v přesnosti přístrojů nelze zastavit, a proto bude narůstat i počet pozic a rychlostí, které může dobře sponzorovaná moucha rozlišit. Na tomto místě se ale musím odvolat na základy kvantové teorie. Kvantová mechanika v jistém přesném smyslu opravdu a fundamentálně *omezuje* přesnost libovolného konkrétního měření a toto omezení nelze překonat nikdy, ať už dojde k jakkoli závratnému technickému pokroku. Toto omezení vyvěrá z ústředního zákona kvantové mechaniky, *principu neurčitosti*.

Tento zákon zaručuje, že ať použijete jakékoli přístroje a metody ke zvýšení přesnosti měření jedné z veličin, vždycky to nevyhnutelně něco stojí: zákonitě omezíte přesnost, s jakou můžete měřit komplementární či partnerskou veličinu. Nejznámějším příkladem je skutečnost, že čím přesněji měříte pozici objektu, tím méně přesně můžete měřit jeho rychlost, a naopak.

Klasická fyzika, tedy fyzika, kterou podvědomě používáme při intuitivním chápání světa kolem nás, toto omezení vůbec nezná. Dostatečnou analogii však naleznete, když se pokusíte zlomyslnou mouchu vyfotografovat. Při krátké expoziční době získáte ostrý snímek, který přesně zachycuje její polohu v momentu, kdy jste stiskli spoušť. Ale kvůli ostrosti snímku se moucha zdá být v klidu: obrázek nepodává žádnou informaci o její rychlosti. Zvolíte-li delší expoziční dobu, rozmazaný obrázek nám napoví více o rychlosti mouchy, ale taková rozmazanost zase zmenší přesnost, s jakou můžete určit její polohu. Nemůžete nafotografovat snímek, z něhož lze vyčíst přesnou informaci o poloze i rychlosti zároveň.

Matematikou kvantové mechaniky vyjádřil Werner Heisenberg nejmenší možnou nepřesnost, s jakou lze polohu a rychlost měřit. Nevyhnutelné nepřesnosti říkají fyzici neurčitost. Pro naše účely lze výsledek formulovat obzvláště užitečným způsobem. Stejně jako ostrá fotografie vyžaduje krátkou expoziční dobu, ukazuje Heisenbergova matematika, že přesnější měření polohy objektu vyžaduje „sondu“ o vyšší energii. Rozsvítíte-li lampu na nočním stolku, výsledná sonda – rozptýlené světlo o nízké energii – vám umožní vidět přibližný tvar nohou a očí mouchy; osvětlíte-li ji fotony vyšší energie, jako je

rentgenové záření (a omezíte-li dobu, po níž je zdroj paprsků zapnut, abyste mouchu neuškvařili), jemnější rozlišení ukáže miniaturní svaly, umožňující mouše mávat křídly. Dokonalé rozlišení podle Heisenberga však vyžaduje sondu s nekonečnou energií a takovou získat nelze.

Podstatný závěr je tedy nasnadě. Klasická fyzika vyjasňuje, že dokonalého rozlišení nelze docílit v praxi. Kvantová mechanika jde ještě dále a uzákoňuje, že dokonalého rozlišení nelze docílit ani v principu. Domníváte-li se, že rychlost i polohu objektu – ať už mouchy nebo elektronu – změníte o dostatečně malé hodnoty, pak si podle kvantové mechaniky představujete něco nesmyslného. Změny natolik malé, že nemohou být změřeny, dokonce ani v principu, nejsou změny vůbec žádné.¹³

Stejnými úvahami, jakými jsme si předkvantově rozebrali mouchu, lze ukázat, že omezené rozlišení nutně redukuje počet možností pro polohu a rychlost libovolného objektu z nekonečného čísla na konečné. A protože je omezené rozlišení vepsáno tučným písmem a černým kvantovým inkoustem do sbírky nejdůležitějších fyzikálních zákonů, je tato redukce počtu možností na konečné číslo nevyhnutelná a nevyvratitelná.

Vesmírné reprízy

Dost už o mouchách v ložnici. Podívejme se teď na větší oblast prostoru. Představte si oblast o velikosti shodné s dnešním kosmickým horizontem, tedy sféru o poloměru 41 miliard světelných let – oblast o velikosti záplaty v kosmické dece. A tuto oblast nezabýdleme mouchami, ale částicemi hmoty a záření. Pak otázka zní: Kolika různými způsoby se mohou částice uspořádat?

Stejně jako v případě stavebnice Lego platí, že čím více kostiček máme – čím více hmoty a záření můžeme do oblasti nacpat –, tím vyšší bude počet možných uspořádání. Ale cpát částice do prostoru nelze bez omezení. Částice nesou energii a více částic nese více energie. Jestliže oblast prostoru obsahuje energie přespříliš, zkolabuje pod svou vlastní tíhou a vytvoří černou díru.* A budete-li se snažit do takto vzniklé černé díry vměstnat ještě více hmoty a energie poté, hranice černé díry (její *horizont události*) se tím zvětší a obklopí větší prostor. Existuje proto omezení toho, kolik vůbec hmoty a energie se může vměstnat do oblasti prostoru o dané velikosti. Pro oblast tak velkou jako dnešní kosmický horizont je tato maximální hmotnost přímo kolosální (asi 10^{53} kilogramů). Ale velikost této horní hranice není klíčová. Klíčový je fakt, že nějaké omezení *existuje*.

* O černých dírách se dozvíte víc v dalších kapitolách. Na tomto místě se spokojte s dobře známým faktem, který už pronikl i do všeobecného povědomí, totiž že černá díra je oblast prostoru – představte si kouli –, jejíž gravitační přitažlivost je tak silná, že nic, co překročilo její hranici, už z ní neunikne ven. Čím větší je hmotnost černé díry, tím větší černá díra je, takže když do ní padají předměty, roste tím nejen její hmotnost, ale i její poloměr.

Konečná energie uvnitř kosmického horizontu znamená, že částic, ať už jde o elektrony, protony, neutrony, neutrina, miony, fotony nebo jakékoli jiné typy včetně dosud neobjevených druhů částicového bestiáře, je konečný počet. Konečná energie uvnitř kosmického horizontu znamená i to, že si každá částice uvnitř kosmického horizontu může vybrat z konečného menu různých poloh a rychlostí, podobně jako obtížný hmyz ve vaší ložnici. Z konečného množství částic a konečného množství jejich poloh a rychlostí dohromady plyne, že uvnitř kosmického horizontu lze hmotu uspořádat jen do konečného počtu konfigurací. (V pokročilejším jazyce plnohodnotné kvantové teorie, s nímž se setkáme v 8. kapitole, nemluvíme o polohách a rychlostech částic samotných, ale o *kvantovém stavu* těchto částic. V tomto smyslu bychom mohli říct, že existuje pouze konečný počet pozorovatelně odlišných kvantových stavů částic v kosmické záplatě.) A skutečně, jeden krátký výpočet – popsáný v poznámkách, pokud byste rádi znali podrobnosti – ukazuje, že počet různých možných uspořádání částic uvnitř kosmického horizontu je asi $10^{10^{122}}$ (tedy jednička následovaná 10^{122} nulami). To je nepochybně konečné, byť nesmírně obrovské číslo.¹⁴

Omezená paleta různých kombinací obleků zajistila, že po dostatečně mnoha vycházkách si Penny musela zákonitě obléct nějaké roucho, které už předtím ozkoušela. Konečný počet možných pořadí karet v balíčku garantoval, že s dostatečným množstvím balíčků karet se pořadí vzniknuvší Howardovým promícháním karet nezbytně opakovalo. Stejně tak lze z omezeného počtu uspořádání částic vyvodit, že při dostatečně vysokém množství záplat v kosmické dece – při dosti vysokém počtu kosmických horizontů – se musí *uspořádání částic v jednotlivé záplatě shodovat s uspořádáním v jiných záplatách*. I kdybyste byli schopni hrát kosmického návrháře, který se snaží každou záplatu navrhnout jinak než ty, které jste prozkoumali předtím, dostatečně velká rozloha vesmíru bude mít za následek, že vám nakonec dojdou možnosti a po řadě premiér budete muset nakonec začít s reprízami.

V nekonečně velkém vesmíru je opakování ještě extrémnější. Záplat je v nekonečně velkém objemu nekonečně mnoho, a proto se při konečném množství různých uspořádání musejí konfigurace částic uvnitř záplat opakovat nekonečně mnohokrát.

O tento výsledek jsme usilovali.

Nic než fyzika

Když interpretuji důsledky tohoto výroku, neměl bych tajit své předsudky. Věřím, že fyzikální systém je zcela popsán uspořádáním svých částic. Řeknete-li, jak jsou částice tvořící Zemi, Slunce, naši galaxii, Mléčnou dráhu, a všechno ostatní srovnány, zcela tím specifikujete realitu. Tento redukcionistický pohled je mezi fyziky běžný, ale existují i lidé, kteří mají jiný názor. Zvláště

jde-li o život, věří někteří, že nefyzikální aspekt (duch, duševno, životní síla, chůze a tak dále) je zapotřebí k tomu, aby svět fyzický ožil. Jakkoli zůstávám této možnosti otevřený, nikdy jsem se nesetkal s důkazem její správnosti, ba ani s argumentem pro její správnost. Podle mě dává největší smysl názor, že fyzikální a mentální charakteristiky člověka jsou pouhou manifestací toho, jak jsou částice uspořádány v jeho těle. Popíšete-li uspořádání částic, popíšete všechno.¹⁵

Přidržíme-li se tohoto předpokladu, můžeme vyslovit závěr, že je-li uspořádání částic, s nimiž jsme obeznámeni, zopakováno i na jiné záplatě – v jiném kosmickém horizontu –, potom taková záplata bude vypadat stejně a vyvolávat stejné pocity jako ta naše. Je-li totiž vesmír prostorově nekonečný, nejste jediní, kdo má na realitu stejný názor jako ten, který jste si právě přečetli, ať je vaše reakce jakákoli. Ve vesmíru existuje mnoho dokonalých kopií vás samotných a ty prožívají přesně totéž co vy. A nelze určit, která z těchto kopií jste *opravdu* vy. Všechny verze jsou fyzicky, a proto i mentálně totožné.

Můžeme dokonce odhadnout i vzdálenost k nejbližší kopii. Jsou-li v jednotlivých záplatách částice uspořádány náhodně a nezávisle (tento předpoklad je slučitelný s rafinovanou kosmologickou teorií, s níž se setkáme v další kapitole), potom můžeme očekávat, že podmínky na naší záplatě budou replikovány stejně často jako podmínky v každé jiné záplatě. V každém souboru $10^{10^{122}}$ kosmických záplat tedy očekáváme v průměru jednu záplatu, která vypadá přesně jako ta naše. To znamená, že v každé oblasti prostoru, která na délku měří řádově $10^{10^{122}}$ metrů, bude existovat kosmická záplata přesně imitující tu naši – a obsahuje vás, Zemi, Galaxii a všechno ostatní, co lze nalézt uvnitř našeho kosmického horizontu.

Jestliže se uskromníte a místo přesné kopie celého kosmického horizontu se spokojíte s přesnou kopií oblasti, která má střed v našem Slunci a jejíž poloměr je několik světelných let, potom lze vaše očekávání splnit o něco snadněji: v průměru bude každá oblast o velikosti $10^{10^{100}}$ metrů obsahovat jednu takovou kopii. Ještě snazší je nalézt kopie přibližné. Nakonec existuje jen jeden způsob, jak oblast přesně okopírovat, ale celá řada způsobů, jak ji okopírovat *téměř* přesně. Kdybyste se do těchto nedokonalých kopií vydali, našli byste mezi nimi některé, které od našeho světa sotva rozeznáte, zatímco odchylky v jiných kopiích by se pohybovaly od očividných a obveselujících až k šokujícím. Každé rozhodnutí, které jste kdy učinili, lze přiřadit ke konkrétnímu uspořádání částic. Odbočíte-li doleva, vaše částice se pohybovaly na jednu stranu, zatímco jestliže odbočíte doprava, vydaly se na stranu opačnou. Řeknete-li ano, částice ve vašem mozku, rtech a hlasivkách se zachovaly podle jedné šablony; řeknete-li ne, následovaly šablonu jinou. A tak každá možná akce, každá volba, kterou jste kdy učinili, a každá možnost, kterou jste kdy zamítli, bude realizována v jedné ze záplat. V některé z nich se vaše nejhrozivější obavy o vás samotné, vaši rodinu a život na Zemi staly skutečností. V jiných

se splnily i vaše nejdivočejší sny. A v dalších se skromné, ale rozpoznatelné rozdíly od našeho světa uspořádaly tak, že vytvořily prostředí pro nás zcela nerozpoznatelné. A ve většině záplat nebude vzezření částic obsahovat vysoce specializovaná uspořádání známá jako živé organismy, a tak tyto záplaty zůstanou bez života – či alespoň bez toho života, jaký známe.

Po určitém čase se velikost kosmických záplat načrtnutých na obrázku *b* na straně 33 zvětší; má-li světlo více času, může proletět delší vzdálenost, a proto každý kosmický horizont naroste. Kosmické horizonty se nakonec budou překrývat. Jakmile se tak stane, nelze tyto oblasti nadále považovat za oddělené a izolované; paralelní vesmíry už nebudou paralelní – ale spojí se. Nicméně výsledek, který jsme našli, bude i nadále platit. Stačí nalinkovat mřížku kosmických záplat o velikosti dané vzdáleností, již světlo mohlo proletět od velkého třesku až k tomuto pozdějšímu okamžiku. Záplaty budou větší, takže jejich středy budou muset být od sebe dále, aby vytvořily strukturu jako na zmíněném obrázku, ale máme-li k dispozici nekonečný prostor, poskytuje nám více než dost místa na to, abychom se této úpravě velikosti přizpůsobili.¹⁶

A tak jsme dospěli k závěru zároveň obecnému i provokujícímu. V nekonečném vesmíru není realita taková, jakou by většina z nás očekávala. V každém okamžiku času obsahuje prostor nekonečný počet oddělených domén – stavebních bloků něčeho, čemu budu říkat *sešíváný multivesmír* –, přičemž náš pozorovatelný vesmír, tedy všechno, co vidáme na noční obloze, je pouze jedním z jeho členů. Když celou tuto nekonečnou sbírku oddělených oblastí obejdeme, zjistíme, že se uspořádání částic zákonitě mnohokrát opakují. Realita, která existuje v libovolném vesmíru, i v tom našem, se tedy opakuje v nekonečném množství dalších vesmírů sešíváného multivesmíru.¹⁷

Co z toho všeho plyne?

Nelze vyloučit, že závěr, k němuž jsme dospěli, vám připadne natolik exotický, že dostanete chuť celou argumentaci obrátit vzhůru nohama. A budete tvrdit, že bizarní povaha představ, k nimž jsme došli – nekonečné kopie vás, všech a všeho –, podporuje názor, že jeden nebo několik předpokladů, s nimiž jsme se dostali až sem, musejí být chybné.

Nemůže být předpoklad, že celý vesmír je obydlen částicemi, chybný? Za naším kosmickým horizontem může třeba existovat obří oblast, která obsahuje pouze prázdný prostor. Je to možné, ale fyzici by své teorie museli pozměnit prapodivným způsobem, aby takovému závěru neprotiřečily. Nejsofistikovanější kosmologické teorie, s nimiž se za okamžik setkáte, nás k podobné možnosti ani vzdáleně nevedou.

Mohly by se zákony fyziky samotné za naším kosmickým horizontem změnit, což by nám zabránilo spolehlivě tyto vzdálené oblasti analyzovat? Znovu říkám, že i to je možné. Ale jak uvidíme v další kapitole, nedávné poznatky

vedou k přesvědčivému argumentu, že ačkoli se zákony mohou měnit, tato proměnlivost nepopírá závěry platné pro sešívání multivesmír.

Mohla by být prostorová velikost vesmíru konečná? Určitě. Je to jistě možné. Jestliže by byl prostor konečný, byť obrovitý, stále by v něm mohly existovat docela zajímavé záplaty. Ale menší konečný vesmír by také mohl snadno trpět nedostatkem místa, takže by nemohl obsahovat značné množství rozdílných záplat, natož záplat, které kopírují tu naši záplatu. Konečný vesmír představuje nejpřesvědčivější způsob, jak se vyhnout sešívání multivesmíru.

V několika posledních desetiletích vyvinuli fyzici ohromné úsilí, aby teorii velkého třesku dotlačili zpět až k času nula – a tím našli hlubší porozumění počátku světa a povaze Lemaîtreova prvotního atomu –, a dospěli až k myšlenkovému schématu zvanému *inflační kosmologie*. V inflačním rámci představuje nekonečně velkého kosmu nejenže nalézá řadu teoretických a experimentálních argumentů, ale, jak uvidíme v další kapitole, stává se téměř nevyhnutelnou.

Aby toho nebylo málo, inflace vynáší na povrch novou, ještě exotičtější odrůdu paralelních světů.

Kapitola třetí

Věčnost a nekonečno

Inflační multivesmír

Průkopnická skupina fyziků si v půli 20. století uvědomila, že ani kdybyste zhasli Slunce, odstranili všechny ostatní hvězdy z Mléčné dráhy, dokonce vymetli i ostatní galaxie, prostor by se nestal zcela černým. Lidskému oku by se černý zdál, ale kdybyste mohli vidět záření v mikrovlnné části spektra, potom byste v libovolném směru spatřili homogenní zář. Co je její příčinou? *Původ* vesmíru samotný. Tito fyzici objevili pozoruhodné a vše prostupující moře mikrovlnného záření, vyplňujícího prostor, které je památkou na stvoření vesmíru (astrofyzik Jiří Grygar pro toto záření zvolil v češtině název *reliktní záření*). Dějiny tohoto vědeckého zvratu jsou příběhem o fenomenálním úspěchu teorie velkého třesku, zároveň však vypovídají o poznacích, které vrhly světlo na jeden podstatný nedostatek této teorie, a proto nakonec vytvořily podmínky pro další zásadní revoluci v kosmologii, která přišla po průkopnických pracích Fridmana a Lemaître: *inflační teorii*.

Inflační kosmologie upravuje teorii velkého třesku tak, že předpokládá nesmírně rychlé rozpínání v nejrannějších okamžicích vesmíru. Tato úprava, jak uvidíme, je klíčem k vysvětlení některých jinak matoucích rysů reliktního záření. Ale je i něčím víc. Inflační kosmologie je jednou z hlavních kapitol našeho vyprávění; vědci si totiž v průběhu několika posledních desetiletí postupně všimli, že její nejpřesvědčivější verze předpovídá zrod velké množiny paralelních světů, čímž radikálně transformuje vzhled reality.

Pozůstatky horkého počátku

George Gamow, průvodem ruský fyzik a téměř dvoumetrový hromotluk proslavený důležitými příspěvky ke kvantové a jaderné fyzice z počátku 20. století, byl nejen duchapřítomný a vtipný muž, ale i velký dobrodruh (v roce 1932 se pokusil se svou ženou utéct ze Sovětského svazu po Černém moři v člunu, v němž vezli zásoby zdravé kombinace vajec natvrdo, čokolády a alkoholu; špatné počasí pak donutilo pár vrátit se zpátky na břeh a Gamow dokázal uchlácholit soudruhy svým příběhem o tom, jak se mu nezdařily vědecké experimenty, které na moři prováděl). A když ve čtyřicátých letech konečně

železnou oponou proklouzl (suchou nohou a s menší porcí čokolády) a usadil se na Washingtonově univerzitě v Saint Louis, upřel svou pozornost na kosmologii. S kritickou pomocí svého fenomenálně talentovaného postgraduálního studenta Ralpa Alpera zrekonstruoval daleko podrobnější a živější obrázek prvních okamžiků vesmíru, než jaký ukazovaly práce Fridmana (jeho někdejšího učitele v Leningradě) a Lemaître. Jak tedy po moderních aktualizacích jeho a Alperova představa vypadá?

Hned po velkém třesku vyvíjel nesmírně žhavý a hustý vesmír frenetickou aktivitu. Prostor se rychle rozpínal a ochlazoval, čímž postupně zmrazil rozvařené částice prvotního plazmatu. V prvních třech minutách zůstala rychle klesající teplota dostatečně vysoká, takže vesmír mohl fungovat jako kosmická jaderná pec a slučovat nejjednodušší atomová jádra: vodík, helium a stopové množství lithia. Po několika dalších minutách teplota sestoupala na 10^8 kelvinů (K), tedy přibližně na teplotu 10 000krát vyšší, než jaká panuje na povrchu Slunce. Jde sice podle každodenních měřítek o teplotu nesmírně vysokou, ovšem přesto příliš nízkou na to, aby poháněla jaderné procesy, a proto částicová bouře v tomto údobí téměř utichla. Následovaly dlouhé epochy, v nichž se kromě rozpínání prostoru a chladnutí částic téměř nic nedělo.

Potom, asi o 370 000 let později, když vesmír ochladl na 3 000 kelvinů, tedy na polovinu teploty povrchu Slunce, přerušila kosmickou jednotvárnost posloupnost stěžejních událostí. Do té doby byl prostor vyplněn plazmatem částic, které nesly elektrický náboj, zejména protony a elektrony. Poněvadž mají elektricky nabitě částice jedinečnou schopnost vrážet do fotonů, částic světla, prvotní plazma se zdálo neprůsvitné; fotony, ustavičně bičované protony a elektrony, vytvářely rozptýlenou zář podobnou světlu reflektorů zahalenému hustou mlhou. Jakmile však klesla teplota pod 3 000 kelvinů, rychle se pohybující elektrony a jádra zpomalily natolik, že mohly splynout do atomů; elektrony zachytila atomová jádra a přetáhla je na své oběžné dráhy. To byla stěžejní transformace. Protože protony a elektrony mají stejné náboje, ale opačná znaménka, atomy, jež vytvořily, jsou elektricky neutrální. A protože elektricky neutrálními stavebními bloky mohou fotony proletět podobně snadno jako nůž pronikne máslem, po vzniku atomů kosmická mlha opadla a světelná ozvěna velkého třesku se mohla začít rozlévat po prostoru. Od té doby prvotní fotony spokojeně plynuly prostorem.

Tedy až na jednu drobnost. Fotony už nebyly vláčeny sem a tam elektricky nabitými částicemi, zato je ovlivnil jeden důležitý jev. Jak se prostor rozpíná, vše, i fotony, se rozřeďuje a chladí. Na rozdíl od částic hmoty však fotony nemohou zpomalit, pokud se chtějí ochladit; coby částice světla musejí vždy letět rychlostí světla. A tak se fotony chladí snižováním svých vibračních frekvencí, tedy změnou své barvy. Fialové fotony se přemění na modré, potom na zelené, pak na žluté, na červené a nakonec na infračervené (ty jsou viditelné jen s přístroji na noční vidění), mikrovlnné (záření, jímž ohříváte jídlo

v mikrovlnné troubě) a úplně na závěr dorazí do oboru rádiových kmitočtů.

Jak si jako první uvědomil Gamow a pak detailněji rozpracoval Alpher se svým spolupracovníkem Robertem Hermanem, z toho všeho plyne, že je-li teorie velkého třesku správná, potom je prostor všude vyplněn *pozůstatky obřadu stvoření ve formě fotonů*, které letí všemi směry a jejichž vibrační frekvence jsou určeny tím, nakolik se vesmír za miliardy let od chvíle, kdy tyto fotony byly osvobozeny, rozepnul a ochladil. Podrobné matematické výpočty ukázaly, že fotony se ochladily až na teplotu blízkou absolutní nule a že jejich frekvence sklouzla do mikrovlnné oblasti spektra. Proto se jim v angličtině říká *kosmické záření mikrovlnného pozadí*.

Nedávno jsem si znovu přečetl články Gamowa, Alphera a Hermana, které tyto závěry na sklonku čtyřicátých let ohlásily a vysvětlily. Jsou to zázraky teoretické fyziky. Jejich technické analýzy nevyžadují od čtenáře o moc více než základy vysokoškolské fyziky, a přesto jsou jejich výsledky hluboké. Autoři došli k závěru, že se všichni noříme do fotonové lázně, tedy kosmického dědictví vesmíru z doby jeho ohnivého zrodu.

Patrně vás překvapí, že jejich články byly ignorovány. A to zejména proto, že byly napsány v éře ovládané kvantovou a jadernou fyzikou. Kosmologie ještě čekala na svůj přerod do kvantitativní vědy, a tak fyzikální obec nevěnovala tolik pozornosti studiím zdánlivě okrajovým a spekulativním. Do jisté míry články zapadly i vinou Gamowova neobyčejně hravého stylu (jednou upravil seznam autorů článku napsaného společně s Alpherem: přidal k němu jméno přítele, budoucího laureáta Nobelovy ceny Hanse Betheho, jen aby jména všech tří – Alpher, Bethe, Gamow – připomínala první tři písmena řecké abecedy), kvůli němuž ho někteří fyzici nebrali tak vážně, jak by si zasloužil. Navzdory svému úsilí nedokázali Gamow, Alpher a Herman v nikom vzbudit zájem, natožpak přesvědčit astronomy, aby věnovali značnou pozornost náročným pokusům zachytit reliktní záření, které předpověděli. Jejich články tak rychle upadly v zapomnění.

Aniž by byli seznámeni s předchozím bádáním, uvažovali princetonské fyzici Robert Dicke a Jim Peebles začátkem šedesátých let podobně; i oni si uvědomili, že velký třesk by měl po sobě zanechat všudypřítomné, prostor vyplňující záření.¹ Na rozdíl od Gamowova týmu proslul Dicke jako slavný experimentátor, a tak nemusel nikoho přesvědčovat, aby toto záření hledal. Mohl to udělat sám. Spolu se svými studenty Davidem Wilkinsonem a Peterem Rollem navrhl přístroj pro zachycení fotonů, které jsou pozůstatkem velkého třesku. Dříve než mohli tito princetonské badatelé svůj plán provést, zazvonil telefon, a když zvedli sluchátko, zažili jeden z nejslavnějších telefonátů v dějinách vědy.

Zatímco Dicke a Peebles počítali, prožívali Arno Penzias a Robert Wilson – inženýři z Bellových laboratoří, vzdálených pouhých padesát kilometrů od Princetonu – hotová muka se svou anténou pro rádiovou komunikaci

(byla náhodou založena na náčrtcích, s nimiž Dicke vyrukoval ve čtyřicátých letech). Ať anténu nastavili a poupravili jakkoli, ozývalo se z ní v pozadí signálů i neodstranitelné šumění. Oba inženýři si mysleli, že něco s jejich přístrojem není v pořádku. Potom však došlo k neuvěřitelné a nepředvídatelné posloupnosti konverzací. Přednášku Peeblese na Univerzitě Johnse Hopkinse v únoru 1965 vyslechl i radioastronom Kenneth Turner z Carnegieho instituce. O Peeblesových výsledcích se zmínil svému kolegovi z MIT Bernandu Burkeovi, a ten byl náhodou v kontaktu s Penziasem z Bellových laboratoří. Jakmile se zprávy o výzkumu v Princetonu donesly i do Bellových laboratoří, Penzias s Wilsonem si uvědomili, že anténa měla k šumu dobrý důvod: *detekovala reliktní záření*. Zavolali tedy Dickemu a ten jim hned potvrdil, že se nevědomky zaposlouchali do ozvěny velkého třesku.

Oba týmy se domluvily, že články publikují současně v prestižním časopise *Astrophysical Journal*. Princetonská skupina tam představí svou teorii kosmologického původu reliktního záření, zatímco tým z Bellových laboratoří – v nejkonzervativnějším možném jazyce a bez jediné zmínky o kosmologii – oznámí detekci rovnoměrného mikrovlnného záření prostupujícího prostor. Ani jeden z obou článků nezmínil předchozí práci Gamowa, Alpher a Hermana. Penziasovi a Wilsonovi byla v roce 1978 za objev udělena Nobelova cena za fyziku.

Gamowa, Alpher a Hermana to hluboce zasáhlo. Celá léta se pak snažili, aby jejich práce byla uznána. Jen postupně a se zpožděním jim vzdávala fyzikální obec za jejich úlohu v tomto monumentálním objevu poctu.

Tajuplná stejnorodost starodávných fotonů

Reliktní záření se několik desetiletí poté, co bylo poprvé pozorováno, stalo klíčovým nástrojem kosmologického výzkumu. Důvod je nasnadě. V řadě disciplín by badatelé obětovali cokoli, kdyby jim někdo takový necenzurovaný, přímý pohled do minulosti nabídl. Místo toho musejí většinou slepovat mozaiku dávných podmínek z částečných údajů skrývajících se v pozůstatcích – například ve zvětralých zkamenělinách, rozpadajících se pergamentech a mumifikovaných lidských ostatcích. Kosmologie je jediným oborem, v němž se můžeme fakticky stát svědky historie. Špendlíkovité světelné paprsky z hvězd, které lze vidět pouhým pohledem, k nám putovaly roky, ba tisíce let. Světlo ze vzdálenějších zdrojů, které zaznamenávají silné dalekohledy, potřebovalo čas ještě delší, někdy i celé miliardy let. Když se na takové pradávne světlo podíváte, vidíte – doslova – dávnověké epochy. Události z dávných dob už dávno odnesl čas, ale zdánlivá homogenita vesmíru obrovských měřítek silně podporuje názor, že co se odehrávalo tam, se v podstatě odehrávalo i zde. Zvedneme-li pohled k obloze, nahlížíme vlastně i do minulosti.

Fotony reliktního záření nám dovolují z této příležitosti vytěžit co nejvíce. Ať už se v budoucnu technika jakkoli zdokonalí, budou vždy tyto mikrovlnné fotony těmi nejstaršími fotony, které máme naději spatřit, protože jejich starší předchůdce pohltila hmota v mlhavých podmínkách, které v ještě dřívějších érách ve vesmíru panovaly. Když prozkoumáme fotony reliktního záření, naskytne se nám letmý pohled na to, jak vesmír vypadal téměř před 14 miliardami let.

Výpočty ukazují, že dnes takových kosmických mikrovlnných fotonů prolétá každým krychlovým metrem prostoru asi 400 milionů. Pouhýma očima je vidět nemůžeme, ale dovede to staromódní analogová televize. Asi 1 % sněžení, které zahlédnete na obrazovce televize odpojené od kabelového signálu a naladěné na stanici, která přestala vysílat, mají na svědomí přímo fotony z velkého třesku. Stejně rádiové vlny, jaké přinášejí reprízy *Ordinace v růžové zahradě* a *Pojišťovny štěstí*, jsou také nasáknuty některými z nejstarších fosilií vesmíru. Tyto fotony podávají svědectví o dramatu, jež se odehrávalo ve vesmíru jen několik set tisíc let starém (či mladém).

Správná předpověď modelu velkého třesku o tom, že je prostor vyplněn mikrovlnným zářením, byla triumfem. Za pouhá tři století vědeckého uvažování a technického pokroku byl náš živočišný druh schopen pokročit od zírání jednoduchými dalekohledy a od pouštění koulí z nakloněných věží k porozumění fyzikálním pochodům, které nastaly okamžitě poté, co se vesmír zrodil. Další výzkum dat nicméně odkryl i palčivou záhadu. Stále rafinovanější měření teploty tohoto záření, které lidé provedli nikoli s televizní obrazovkou, nýbrž s některými z nejpřesnějších kdy postavených přístrojů, ukázalo, že toto záření je dokonale – a tajemně – homogenní v celém prostoru. Ať už namíříte svůj detektor kamkoli, teplota záření je 2,725 kelvinu (stupně nad absolutní nulou). Hlavalam tkví v úkolu vysvětlit, jak taková fantastická stejnorodost mohla vzniknout.

Dokážu si představit, že pod dojmem myšlenek představených v 2. kapitole (a mých komentářů o čtyři odstavce výše) si říkáte: „Tohle není nic jiného než kosmologický princip v praxi: žádné místo ve vesmíru není před ostatními preferované, a tak by měla být teplota na každém z nich stejná.“ Budiž. Ale nezapomeňte, že kosmologický princip byl *předpokladem*, jehož se fyzici počínaje Einsteinem dovolávali, aby matematický rozbor evoluce vesmíru zjednodušili a učinili poddajným. Protože je reliktní záření skutečně homogenní v celém prostoru, poskytuje nám přesvědčivý, na pozorování založený důkaz kosmologického principu a posiluje naše přesvědčení, že závěry od tohoto principu odvozené platí. Ohromující homogenita tohoto záření však vrhá kosmologický princip samotný pod oslňující světlo reflektorů. Ať zní kosmologický princip jakkoli rozumně, jaký mechanismus zapříčinil celovesmírnou homogenitu, kterou pozorování potvrzují?

Rychleji než světlo

Každý z vás si patrně prožil ten lehce znepokojující pocit, když si s někým potřásl rukou a zjistil, že je buď horká až vařící (to ještě jde), nebo nelidsky chladná (to je jistě horší). Pokud bychom ale ve stisku pokračovali, zjistili bychom, že drobné teplotní rozdíly s časem zanikají. Když jsou objekty v dotyku, teplo putuje z teplejšího tělesa na studenější, až se teploty obou srovnají. Stáváme se toho svědky dnes a denně. Právě proto se nakonec teplá káva na stole ochladí na pokojovou teplotu.

Podobné úvahy by zdánlivě mohly vysvětlit homogenitu reliktního záření. Stejně jako u dotýkajících se rukou nebo stojící kávy odráží homogenita pravděpodobně dobře známou tendenci prostředí směřovat k jednotné teplotě. Jedinou novinkou v tomto procesu je, že toto vyrovnávání teplot by mělo nastávat na kosmických vzdálenostech.

Podle teorie velkého třesku ovšem takové vysvětlení nemůže být správné.

Podstatnou podmínkou toho, aby místa nebo objekty dosáhly společné teploty, je vzájemný kontakt. Může být přímý, jako v případě podání rukou, nebo alespoň zprostředkovaný výměnou informace, po níž mohou podmínky na vzdálených místech dosáhnout souladu. Bez takového vzájemného vlivu nelze docílit společného, sdíleného prostředí. Proto je termoska navržena tak, aby takovým interakcím předcházela, mařila snahu o homogenitu a zachovávala teplotní rozdíly.

Toto jednoduché pozorování zvýrazňuje potíž s naivním vysvětlením kosmické teplotní homogenity. Místa v prostoru, která jsou od sebe velmi daleko – řekněme daleko napravo od vás jeden bod, jímž první vyslané fotony teprve doletěly k vám, a podobné místo nalevo od vás –, dosud nikdy neinteragovaly. Třebaže vy vidíte obě místa, světlo z jednoho z nich bude, než dorazí k místu druhému, ještě muset překonat ohromnou vzdálenost. Hypotetičtí vzdálení pozorovatelé nalevo a napravo se zatím nemohli vidět, a jelikož rychlost světla je tou maximální rychlostí, s níž se cokoli může pohybovat, zatím na sebe navzájem ani jinak nepůsobili. V jazyce minulé kapitoly je každý za kosmickým horizontem druhého z nich.

Takový popis záhadu obnažuje. Spadli byste patrně ze židle, kdyby obyvatelé těchto vzdálených míst mluvili stejným jazykem nebo měli knihovny plné stejných knih. Jak by mohli sdílet kulturní dědictví, když by nikdy nebyli v kontaktu? A kdybyste zjistili, že bez jakéhokoli zřejmého kontaktu sdílejí tyto neuvěřitelně oddělené oblasti stejnou teplotu, s přesností nejméně na 4 desetinná místa, mělo by vás to ohromit stejně.

Před lety, kdy jsem o tomto hlavolamu slyšel poprvé, jsem z něho obrazně řečeno byl *na větví*. Po chvíli uvažování se ale pro mě stala hlavolamem formule hlavolamu samotného. Jak se mohly dva objekty, které se kdysi nacházely blízko sebe – a věříme, že všechny objekty v pozorovatelném vesmíru v době

velkého třesku blízko byly –, oddělit tak rychle, že světlo z jednoho nemůže doletět k druhému? Je-li světlo rychlostním rekordmanem vesmíru, jak může propast mezi dvěma objekty narůst více než na vzdálenost, kterou by dokázalo urazit?

Odpověď stává do popředí detail, kterému se leckdy nevěnuje dostatečná pozornost. Rychlostní omezení definované světlem se vztahuje pouze na pohyb objektů *prostorem*. Ale galaxie se od sebe vzdalují nikoli proto, že cestují *prostorem* – nemají přece tryskové motory –, ale proto, že se nafukuje samotný prostor a tento všezahrnující tok s sebou unáší i galaxie.² A to podstatné je, že relativita nijak nestanoví, jak rychle se může prostor nafukovat, takže neexistuje žádné omezení rychlosti, s jakou se galaxie navzájem v důsledku nafukování prostoru vzdalují. Rychlost, s níž se od sebe vzdaluje pár galaxií, může překonat libovolnou rychlost, tedy i rychlost světla.

A skutečně, matematika obecné teorie relativity ukazuje, že v prvních okamžicích života vesmíru se prostor nadouval tak rychle, že oblasti byly od sebe hnány nadsvětelnou rychlostí. Proto nemohly na sebe navzájem nijak působit. Potom je však obtížné vysvětlit, proč si nezávislé kosmické domény vybraly totožné teploty. Této záhadě začali kosmologové říkat *problém horizontu*.

Jak rozšířit horizonty

V roce 1979 přišel Alan Guth (tehdy pracující v Stanfordském lineárním urychlovačovém středisku SLAC) s myšlenkou, která po následných zásadních vylepšeních Andrejem Lindem (tehdy výzkumníkem Lebeděvova fyzikálního ústavu v Moskvě) a Paulem Steinhardtem a Andreasem Albrechtem (profesorem a studentem tehdy pracujícími na Pensylvánské univerzitě) problém horizontu, alespoň podle názoru většiny fyziků, vyřešila. Jejich řešení, *inflační kosmologie*, stojí na jistých jemných rysech Einsteinovy obecné teorie relativity (hned je vyložím), ale hrubý obrys tohoto řešení lze podat snadno.

Standardní teorie velkého třesku trpí problémem horizontu proto, že se oblasti prostoru vzdalují příliš rychle, takže nemohly dospět k tepelné rovnováze. Inflační teorie tento problém vyřešila. Vyplyvá z ní totiž nižší rychlost, s jakou se oblasti vzdalovaly na samotném začátku, a dává tak dostatek času, aby dospěly ke stejné teplotě. Teorie navíc předpokládá, že po ukončení těchto „kosmických podání rukou“ nastala krátká éra ohromně rychlého a neustále se zrychlujícího rozpínání – *inflační expanze* –, během níž vesmír dokonale odčinil svou počáteční lenivost a při níž byly oblasti prostoru rozmetány na nesmírně vzdálená místa na obloze. Homogenní podmínky, které pozorujeme, už tedy nepředstavují záhadu, jelikož společná teplota byla

dosažena dříve, než byly oblasti odfouknuty od sebe.³ Taková je zhruba podstata inflačního vysvětlení.*

Mějte ale na paměti, že fyzici vesmíru nepředepisují, jak rychle se má rozpínat. Jsou-li naše nejrafinovanější pozorování spolehlivým vodítkem, předepisují tuto rychlost Einsteinovy rovnice obecné relativity. Životaschopnost inflačního scénáře proto závisí na tom, zda se navržená úprava standardního rozpínání z teorie velkého třesku může vyklubat z Einsteinovy matematiky. Na první pohled to vůbec není jasné.

Například jsem si vcelku jistý, že kdybyste oživilí Newtona a v pětiminutovém rychlokurzu obecné relativity byste mu vysvětlili zakřivený prostor a rozpínající se vesmí a zasnětili ho do moderní vědy, shledal by váš následující popis inflační teorie směšným. S vážnou tváří by trval na tom, že nehledě na efektní matematiku a novopečený einsteinovský jazyk je gravitace stále přitažlivá síla. A proto – praštil by pravděpodobně do stolu – gravitace působí tak, že přitahuje objekty k sobě a zpomaluje tak ve vesmíru jakoukoli rozbíhavost. Rozpínání, které začne v loudavém tempu, ale potom na chvíli ostře zrychlí, může vyřešit problém horizontu, ale je to fikce. Stejně jako rychlost baseballového míčku letícího nahoru začne hned po úderu klesat – prohlásil by Newton –, tak i rozpínání kosmu se musí časem zpomalovat. Samozřejmě když rychlost rozpínání klesne na nulu a přejde ve smršťování, kolaps se pak může zrychlovat, právě jako rychlost míčku poté, co začal padat dolů. Ale rychlost rozpínání prostoru směrem ven růst nemůže.

Newton se zde dopouští chyby, ale vyčítat byste mu to neměli. Za všechno může povrchní vysvětlení obecné teorie relativity, jež se mu dostalo od vás. Ale nevyložte si to špatně. Je pochopitelné, že v pouhých pěti minutách (z nichž byste jednu strávili vysvětlováním baseballu) jste se soustředili na zakřivený prostor jako původce gravitace. Newton sám upozornil na fakt, že neexistoval žádný známý mechanismus, jak přenášet gravitaci, a vždycky to považoval za zející mezeru ve své vlastní teorii. Přirozeně jste mu chtěli ukázat Einsteinovo rozřešení. Einsteinova teorie gravitace však dokázala mnohem více než jen to, že tuto trhlinu v Newtonově fyzice vyplnila, a v tomto kontextu jde o jeden konkrétní rys, který si zaslouží důraz.

Podle Newtona teorie pramení gravitace čistě v hmotnosti objektu. Čím je objekt těžší, tím silnější je jeho přitažlivost. V Einsteinově teorii zato gravitaci vyvolává nejen hmotnost (a energie) objektu, *ale i jeho tlak*. Zvažte zapečetěný sáček s bramborovými lupínky. Udělejte to znovu, ale tentokrát stlačte sáček, aby vzduch uvnitř měl větší tlak. Podle Newtona nedošlo ke změně hmotnosti, a tak bude tíha stejná. Podle Einsteina bude stlačený sáček vážít o něco více,

* Řečeno jinými slovy: superrychlé zrychlené rozpínání znamená, že dnes vzdálené oblasti vesmíru byly v raném vesmíru mnohem blíže k sobě, než naznačuje tradiční teorie velkého třesku – tím mohlo k vyrovnání teplot dojít ještě předtím, než exploze tyto oblasti odfoukla od sebe.

protože navzdory neměnné hmotnosti v něm naroste tlak.⁴ V každodenním životě si takových změn nevšimneme, protože u obyčejných objektů je tento jev fantasticky nepatrný. Přesto obecná teorie relativity a experimenty, které ji ověřily, odstraňují všechny pochyby o tom, že tlak gravitaci ovlivňuje.

Tato odchylka od Newtonovy teorie je stěžejní. Tlak vzduchu, ať je v sáčku s lupínky, v nafouknutém balonu nebo v místnosti, kde teď čtete tuto knihu, je kladný, což znamená, že vzduch tlačí směrem ven. V obecné teorii relativity způsobuje kladný tlak – stejně jako kladná hmotnost – zvýšení tíhy, ale zatímco hmota je vždy kladná, existují situace, kdy tlak je záporný. Stačí si připomenout gumičku na vlasy. Místo aby tlačila objekty ven, stahuje molekuly na okrajích směrem k sobě a vyvolává tak něco, čemu fyzici říkají *záporný tlak* (či ekvivalentně *napětí*). Ze stejného důvodu, proč kladný tlak vyvolává přitažlivou gravitaci, jak ukazuje obecná teorie relativity, způsobuje záporný tlak opak: *odpudivou* gravitaci.

Odpudivá gravitace?

Něco takového by Newtona ohromilo. Podle něho je gravitace vždy přitažlivá. Pro vás by to však už překvapení být nemělo. Pamatujete si na Einsteinovu kosmologickou konstantu z předchozí kapitoly? Tvrdil jsem tam, že nasákne-li prostor homogenní hustotou energie, kosmologická konstanta vyvolá odpudivou gravitaci. Ale nevysvětlil jsem, proč se tak stane. Ted' to můžu napravit. Kosmologická konstanta neobdarovává tkaninu prostoru pouze homogenní energií, určenou velikostí této konstanty (čísla na třetí řádce smyšleného relativistického daňového přiznání), ona vyplňuje prostor i homogenním negativním tlakem (proč, hned uvidíme). Jak jsem už uváděl, takový záporný tlak musí účinkovat opačně než tlak kladný. Vyvolává odpudivou gravitaci.*

Einstein využil odpudivou gravitaci s jediným záměrem, a to záměrem postaveným na omylu. Soudil, že pečlivé nastavení záporného tlaku prostupujícího prostorem může přesně kompenzovat přitažlivou gravitaci způsobovanou obvyklejším hmotným obsahem vesmíru – a tak zajistit neměnný vesmír. Viděli jsme, že se od tohoto počínu později distancoval. O šedesát let později navrhli otcové inflační teorie odpudivou gravitaci, která se od své sestry – Einsteinovy – lišila podobně, jako se Mahlerova *Symfonie č. 8* odlišuje od hučení vidličkové ladičky. Místo aby lehkým a neměnným tlakem stabilizoval vesmír, zapříčinil tlak podle inflační teorie nesmírně intenzivní,

* Mohli byste si myslet, že záporný tlak věci k sobě přitahuje, tedy že je pravým opakem odpudivé – ven působící – gravitace. Jenže *homogenní* tlak libovolného znaménka fakticky objekty vůbec netlačí ani netahá. Bubínky vám prasknou pouze v přítomnosti nestejného tlaku, tedy vyššího na jedné straně a nižšího na druhé. Ted' ale mluvíme o tlakové síle, která objekty odpuzuje od sebe. Ta je *gravitační silou vyvolávanou přítomností homogenního záporného tlaku*. To je obtížně pochopitelná, ale podstatná skutečnost. Ještě jednou: Zatímco přítomnost kladné hmoty nebo kladného tlaku vyvolává gravitaci přitažlivou, přítomnost záporného tlaku má na svědomí ne tak známou gravitaci odpudivou.

ale neuvěřitelně krátkou vlnu odpudivé gravitace. Oblasti prostoru měly před touto explozí více než dost času, aby dospěly k téže teplotě, ale mohly se později na této obří vlně i svézt a zajistit si tak ohromné vzdálenosti na obloze, jež dnes pozorujeme.

V tomto okamžiku by na vás Newton jistě vrhl další nelibý pohled. Jako věčný skeptik by ve vašem vysvětlení našel další vadu. Protože rychle pročetl jednu ze standardních učebnic a obeznámil se v ní se spleťnými detaily obecné teorie relativity, už se s podivnou skutečností, že gravitace může být – v principu – i odpudivá, smířil. Ale co mají znamenat všechny ty výroky o záporném tlaku prostupujícím prostor? Jedna věc je zmínit smršťující se gumičku na vlasy jako příklad záporného tlaku, jiná věc je tvrdit, že vesmír byl dávno, v době velkého třesku, na okamžik vyplněn ohromným a rovnoměrným záporným tlakem. Jaký objekt, proces nebo substance má schopnost takový prchavý, ale vše prostupující záporný tlak zajistit?

Průkopníci inflace nabídli geniální odpověď. Ukázali, že záporný tlak potřebný k explozi antigravitace přirozeně vyvěrá z nového mechanismu, jehož se účastní hráči známí pod jménem *kvantová pole*. Podrobnosti tohoto děje jsou pro naše vyprávění podstatné, protože procesy, které dávají vzniknout inflaci, hrají ústřední roli při zrodu inflačních paralelních vesmírů.

Kvantová pole

V Newtonově době se fyzika zabývala pohybem objektů viditelných – kamenů, dělových koulí, planet – a rovnice Newtonem sepsané odrážely toto ohnisko zájmu. Newtonovy pohybové zákony jsou matematickým vtělením toho, jak se hmatatelná tělesa pohybují, když do nich strčíme, když je taháme nebo je vystřelujeme do vzduchu. Takový přístup byl báječně plodný víc než sto let. Ale na začátku 19. století odstartoval anglický vědec Michael Faraday představu vědeckého uvažování. Zavedl totiž neuchopitelný pojem *pole*, o jehož užitečnosti však nemohly být žádné pochyby.

Jistě uhodnete, co bude následovat, vezmete-li do ruky silný magnet z ledničky a umístíte-li ho tři centimetry nad kancelářskou svorku. Svorka vyskočí a přilepí se k povrchu magnetu. Jde o jev natolik běžný a nám všem natolik známý, že si ani neuvědomujeme, jak podivný jev to vlastně je. Aniž by se svorky dotkl, magnet ji dokázal uvést do pohybu. Jak je to možné? Jak může magnet působit na svorku bez jakéhokoli kontaktu? Toto pozorování a řada dalších úvah vedly Faradaye k předpokladu, že magnet se sice přímo svorky nedotýká, ale že z něj vychází něco, co se *dotýká*. Toto „něco“ nazval Faraday *magnetickým polem*.

Pole vytvořená magnety nemůžeme vidět ani slyšet; žádný z našich smyslů na ně není citlivý. To však ukazuje pouze fyziologická omezení našeho těla a nic víc. Stejně jako oheň vytváří teplo, tak i magnet vytváří magnetické

pole. Toto pole, rozkládající se za geometrickými hranicemi pevného magnetu jako jakási „mlha“ nebo „vůně“, vyplňuje prostor a vykonává za magnet práci.

Magnetická pole jsou pouze jedním druhem pole. Nabité částice jsou původci pole dalšího: pole elektrického, které vám někdy například ušetří ránu, dotknete-li se kovové kliky od dveří v pokoji zcela pokrytém vlněným kobercem. Faradayovy experimenty neočekávaně ukázaly, že elektrická a magnetická pole jsou úzce spojena: zjistil totiž, že měnící se elektrické pole vytváří magnetické pole a naopak. Na sklonku 19. století podložil James Clerk Maxwell tyto poznatky i matematikou, když popsal elektrická a magnetická pole v řeči čísel přiřazených ke každému bodu prostoru; velikost těchto čísel vyjadřuje schopnost pole uplatnit svůj vliv v daném bodě. V těch místech v prostoru, kde jsou číselné velikosti magnetického pole vysoké, například v tunelu magnetického rezonančního tomografu, pocítí kovové předměty silný tlak nebo tah. A v místech vysokých hodnot elektrického pole, například uvnitř bouřkového mraku, může snáze dojít k elektrickému výboji, například k blesku.

Maxwell objevil rovnice, dnes po něm pojmenované, které určují, jak se síla elektrického a magnetického pole mění od bodu k bodu v prostoru a od okamžiku k okamžiku v čase. Tytéž rovnice ovládají i vlnící se peřeje elektrických a magnetických polí, takzvané *elektromagnetické vlny*, do nichž jsme všichni ponořeni. Zapněte mobilní telefon, rádio nebo bezdrátový počítač, a signály, které tyto přístroje přijmou, jsou malinkým zlomkem houště elektromagnetických vln, které každou sekundu pádí i skrze vás. Největším překvapením bylo zjištění plynoucí z Maxwellových rovnic, že i viditelné světlo samotné je elektromagnetickým vlněním, k jehož zaznamenání se *vyvinuly* naše oči.

V druhé polovině 20. století sloučili fyzici pojem pole s pučícím teoretickým poupětem porozumění mikrosvětlu, s takzvanou kvantovou mechanikou. Výsledek spojení, *kvantová teorie pole*, se stal základem našich nejrafinovanějších teorií hmoty a sil v přírodě. Na základě této teorie fyzici zjistili, že vedle elektrických a magnetických polí existuje celá sbírka dalších polí – například *silná a slabá jaderná pole a elektronová, kvarková a neutrinová pole*. Jedno z polí, dodnes zcela hypotetické, takzvané *inflatonové pole*, poskytuje teoretický základ inflační kosmologii.*

* Rychlému rozpínání vesmíru říkáme inflace, ale částice pole pohánějícího inflaci dostala v souladu s historickými tradicemi ve fyzikálním názvosloví jméno inflaton (které končí na „-on“ podobně jako částice elektron, proton, neutron, mion atd.). Toto slovo bychom si neměli plést s anglickým výrazem pro inflaci, *inflation*, které navíc obsahuje ještě jedno písmeno „i“.

Kvantová pole a inflace

Pole nesou energii. Intuitivně víme, že to tak musí být, protože pole zvládají úkoly, k nimž je energie zapotřebí, například to, že pohnou objekty (třeba svorkou). Rovnice kvantové teorie pole ukazují i kvantitativně, jakou energii obsahuje oblast v prostoru v závislosti na číselné velikosti pole v této oblasti. Nejčastěji platí, že čím je vyšší hodnota, tím větší je energie. Hodnota pole se může měnit od místa k místu – kdyby byla konstantní, tedy kdyby nabývala všude stejné hodnoty, potom by každý bod přispíval k energii vyplňující prostor stejným dílem. Guthovým stěžejním poznatkem bylo, že taková homogenně uspořádaná pole zaplňují prostor nejen homogenní energií, ale i homogenním záporným tlakem. Guth tak *teoreticky našel fyzikální mechanismus schopný vyvolat odpudivou gravitaci*.

Abyste pochopili, proč homogenní pole vede k zápornému tlaku, začněte s obvyčejnější situací, v níž je tlak kladný: zkuste otevřít láhev šampaňského Dom Pérignon. Když pomalu zátku odstraňujete, můžete pocítit kladný tlak oxidu uhličitého, který vytlačuje zátku z láhve do vaší ruky. To, že tlak směrem ven ze šampaňského odebere trochu energie, lze ověřit přímo. Vzpomínáte na kondenzované kapičky páry v blízkosti hrdla láhve, když je zátku venku? Tvoří se proto, že energie spotřebovaná šampaňským na vytlačení zátky způsobí pokles teploty, a ten v okolí sráží vodní páru. Ze stejného důvodu vydechujete páru v mrazivém počasí.

A teď nahradte šampaňské něčím méně svátečním, zato poučnějším – polem se stejnou hodnotou v celé láhvi. Odstraní-li zátku v tomto případě, ucítíte a uvidíte něco zcela odlišného. Když zátku vytahujete ven, zvětšujete tím uvnitř láhve objem prostoru, do něhož se může pole rozšířit. Protože homogenní pole nese stejnou hustotu energie v každém bodě, *roste* celková energie láhve se zvětšujícím se objemem vnitřku. To znamená, že na rozdíl od šampaňského zvýšíme energii láhve tehdy, když zátku odstraníme.

Jak je to možné? Odkud by se ta energie vzala? Zamysleme se nad tím, co se stane s obsahem láhve šampaňského, jestliže zátku *vtlačíte dovnitř*, místo abyste ji vytáhli ven. Na to musí vaše svaly vyvinout práci, čímž se energie přenesou z vašeho těla do láhve. K vysvětlení nárůstu energie láhve si musíme všimnout jediného rozdílu – toto homogenní pole nasává energii dovnitř, zatímco šampaňské ji tlačí ven. To máme na mysli tvrzením, že homogenní pole vede k zápornému tlaku.

Příroda sice žádného sklepníka, který by odzátkoval vesmír, nezaměstnává, přesto stejný závěr platí i ve vesmíru: pokud existuje pole – hypotetické inflatonové pole –, které má homogenní velikost v celé oblasti prostoru, vyplní tuto oblast nejen energií, ale i záporným tlakem. A jak už víme, záporný tlak vyvolává odpudivou gravitaci a ta pohání stále se zrychlující rozpínání prostoru. Když Guth dosadil pravděpodobnou číselnou hodnotu inflatonové energie a tlaku slučitelného s extrémními podmínkami raného vesmíru do Einsteino-

vých rovnic, matematicky mu vyplynula ohromující výsledná odpudivá gravitace, o desítky řádů silnější než odpudivá síla, kterou podle Einsteinových starých představ způsobovala kosmologická konstanta, a schopná pohánět opravdu velkolepé rozpínání prostoru. To už samo o sobě bylo vzrušující. Ale Guth věděl, že ho automaticky čeká ještě jedno příjemné překvapení.

Stejně úvahy, jaké vedly k zápornému tlaku, lze uplatnit i na kosmologickou konstantu. (Obsahuje-li láhev prázdný prostor obdařený kosmologickou konstantou, potom tím, že zátku vytahujeme, zvyšujeme energii láhve, protože zvětšujeme objem. Jediným zdrojem této dodatečné energie jsou svaly, které proto musely působit proti zápornému, tedy dovnitř vtahujícímu tlaku vyvolanému kosmologickou konstantou.) Stejně jako v případě homogenního pole má kosmologická konstanta za následek odpudivou gravitaci. Tím rozhodujícím však nejsou podobnosti samy o sobě, nýbrž vlastnosti, jež kosmologickou konstantu odlišují od homogenního pole.

Kosmologická konstanta je to, co napovídá její jméno – konstanta, tedy neměnné číslo dosazené do třetí řádky daňového přiznání obecné relativity, které zapříčiňovalo stejnou odpudivou gravitaci dnes i před miliardami let. Naopak hodnota pole se měnit může a obecně i bude. Zapnete-li mikrovlnnou troubu, změníte elektromagnetické pole vyplňující její vnitřek; přepne-li technik tlačítko u přístroje magnetické rezonance, změní tím i pole protékající dutinou přístroje. Guth si uvědomil, že inflační pole vyplňující prostor se může chovat podobně – může explozi zahájit a pak zase ukončit –, a tím lze zaručit, že odpudivá gravitace bude účinkovat jen krátkou dobu. To je to podstatné. Z pozorování plyne, že pokud se vesmír vůbec někdy velmi rychle nadouval, muselo se tak dít před miliardami let; poté muselo nastat mnohem pomalejší rozpínání, které plyne z podrobných astronomických měření. Takže velmi důležitým rysem inflačního scénáře je, že éra mohutné odpudivé gravitace byla jen dočasná.

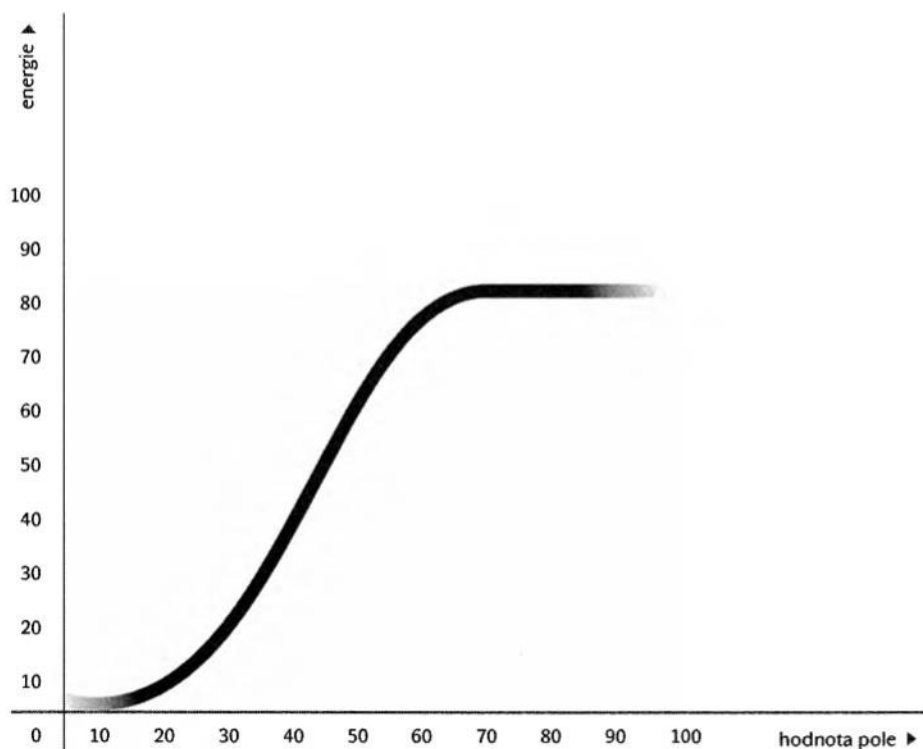
Mechanismus zahájení a ukončení inflační exploze se odvíjí od fyzikálních procesů původně popsanych v Guthově práci, ale později podstatně zdokonalených Lindem, Albrechtem a Steinhardtem. Dobrou analogií pro jejich vysvětlení je míček – nebo ještě lépe téměř kulový cvalík Otesánek – halabala posazený na jednu ze zasněžených šumavských hor. Fyzik by řekl, že Otesánek díky své poloze nese energii. Přesněji řečeno – *potenciální energii*, tedy uzamčenou energii, kterou může vypustit, a to nejspíše tak, že se skutálí dolů a přemění potenciální energii na energii pohybu (*kinetickou energii*). Ze zkušenosti víme, a fyzikální zákony to potvrzují, že jde o typickou situaci. Systém, který nashromáždil potenciální energii, využije všech příležitostí k tomu, aby ji uvolnil. Zkrátka, věci padají.

I energie uložená v nenulové hodnotě pole je potenciální energie: i ji lze vypustit – analogicky jako v Otesánkově případě. Právě jako je tempo nárůstu Otesánkovy potenciální energie určeno sklonem hory, po níž se škrábe

nahoru – ve vodorovnějších úsecích cesty se jeho potenciální energie mění při chůzi jen minimálně, protože se jeho výška téměř nemění, zatímco ve strmějších úsecích jeho potenciální energie roste prudce –, je potenciální energie pole popsána podobným tvarem, *křivkou potenciální energie*. Obrázek dole příklad takové křivky, určující závislost potenciální energie na hodnotě pole, ukazuje.

Po vzoru průkopníků inflace si teď představme, že ve svých nejranějších chvílích byl vesmír homogenně vyplněn inflatonovým polem, jehož hodnota odpovídala maximu křivky potenciální energie. Navíc si, jak nás tito fyzici nabádají, představme, že se v blízkosti maxima křivka zplošťuje do tvaru hladké „náhorní plošiny“ (jako na obrázku dole), což inflatonu dovoluje strávit neda-leko maxima hodně času. Co se stane za těchto hypotetických podmínek?

Stanou se dvě věci, obě klíčové. Zatímco inflaton setrvává na náhorní plošině, naplňuje prostor velkou potenciální energií a záporným tlakem, čímž pohání inflační expanzi. Ale právě jako Otesánek uvolní svou potenciální energii, skutálí-li se ze svahu, tak i inflaton uvolní svou potenciální energii, když jeho hodnota v každém bodě prostoru poklesne. A jak jeho hodnota klesá, energie a negativní tlak se postupně spotřebují a tím přivedou období



Energie obsažená v inflatonovém poli (svislá osa) pro dané hodnoty pole (vodorovná osa).

rychlého rozpínání ke konci. Stejně důležité je, že energie uvolněná inflatonovým polem se neztratí – místo toho, podobně jako vana naplněná párou, která kondenzuje do vodních kapek, se inflační energie srazí do lázně částic, které vyplní prostor. Tento dvoufázový proces – krátké, ale rychlé rozpínání a poté přeměna energie na částice – zrodil obří, homogenní vesmír zaplavený polotovary připravenými k tvorbě známých objektů, například galaxií a hvězd.

Přesné detaily závisejí na faktorech, které zatím nebyly určeny ani teoreticky, ani pozorováními (na počáteční hodnotě inflatonového pole, přesném tvaru křivky potenciální energie a tak dále),⁵ ale většina odrůd inflační teorie matematicky naznačuje, že inflatonová energie by poklesla v nepatrném zlomku sekundy, řádově za 10^{-35} sekundy. Přesto by za tento okamžik prostor narostl enormně, snad 10^{30} násobně, ne-li více. Jde o čísla natolik extrémní, že je těžko můžeme k něčemu přirovnat. Plyne z nich, že oblast menší než hrášek by za dobu, proti níž je mrknutí oka milion miliard miliard miliardkrát delší, byla rozfouknuta do oblasti větší, než je dnes pozorovatelný vesmír.

Jakkoli je velmi těžké si tato čísla představit, podstatné je, že oblast prostoru, z níž povstal pozorovatelný vesmír, byla natolik malá, že mohla předtím, než byla rapidní explozí roztažena do majestátních kosmických dimenzí, snadno dospět k homogenní teplotě. Inflační rozpínání a miliardy let následujícího kosmologického vývoje vedly k znatelnému poklesu teploty, kdežto homogenita ustanovená v době inflace se zachovala dodnes. Tím je vyřešena záhada, odkud se vzala homogenita vesmíru. Podle inflační teorie je stejnoměrná teplota v celém prostoru zákonitým jevem.⁶

Věčná inflace

Celá tři desetiletí od svého zrodu byla inflace pevnou součástí výzkumů kosmologie. Abyste si mohli udělat o výzkumu přesnější obrázek, měli byste si uvědomit, že inflace je myšlenková kostra, a ne specifická teorie. Badatelé ukázali, že existuje řada způsobů, jak z inflační kočky stáhnout kůži, a ty se liší v podrobnostech – třeba v počtu inflatonových polí, které přispívají k zápornému tlaku, v konkrétních křivkách potenciální energie, jimiž se řídí každé pole, a tak dále. Naštěstí mají tato pestrá ztělesnění inflace některé společné důsledky, takže jsme z nich i bez znalosti definitivní varianty mohli vyvodit univerzální závěry.

A jeden z nich, původně pochopený Alexandrem Vilenkinem z Tuftsovy univerzity a dále rozpracovaný dalšími, zvláště Andrejem Lindem, má obzvláštní důležitost.⁷ Po pravdě řečeno je jediným důvodem, proč jsem celou polovinu kapitoly strávil uváděním do inflační teorie.

V mnohých odrůdách inflační teorie není bleskové nafouknutí vesmíru jednorázovou událostí. Proces, jímž naše oblast vesmíru vznikla – rychlé

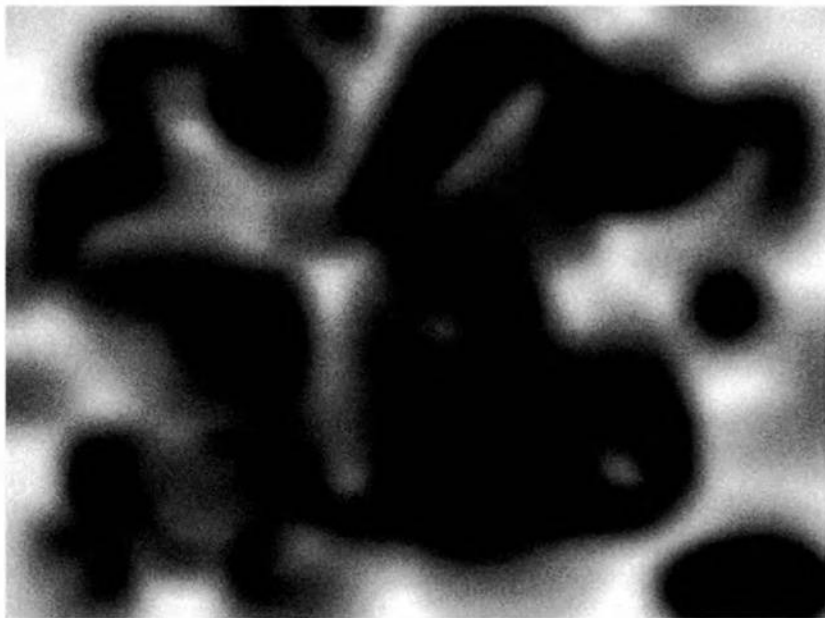
rozpínání prostoru později vystřídané přechodem k obyčejnějšímu, pomalejšímu rozpínání spojenému s produkcí částic –, se může naopak odehrávat opakovaně v různých odlehlých končinách vesmíru. Z ptačí perspektivy by byl vesmír poskládan z nespočetných extrémně oddělených oblastí, z nichž každá je dozvukem inflační salvy v části prostoru. Naše oblast, kdysi považovaná za *jediný* vesmír, by byla jen jednou z těchto oblastí, vznášející se v daleko větším objemu prostoru. Jestliže i v jiných oblastech existuje inteligentní život, tak i tamní obyvatelé jistě někdy považovali tu svou oblast za *jediný* vesmír. Proto nás inflační kosmologie vede vstříc naší druhé variaci na téma paralelních vesmírů.

Abychom tomu, odkud se bere *inflační multivesmír*, porozuměli, je na místě podívat se na dvě komplikace, které jsem v analogii s Otesánkem úmyslně ignoroval.

Zprvé, obraz Otesánka usazeného na vrcholu hory mně posloužil jako analogie inflatonového pole, ukrývajícího značnou potenciální energii a záporný tlak, pole přichystaného skutálet se do nižších hodnot. Ale zatímco Otesánek sedí pouze na jednom horském vrcholu, inflatonové pole má nějakou hodnotu v *každém* bodě prostoru. Teorie předpokládá, že inflatonové pole začíná na počátku na stejné hodnotě ve všech místech uvnitř oblasti. Lepším znázorněním inflatonového pole by tedy bylo něco trochu podivného: obrázek mnoha naklonovaných Otesáneků usazených na celé řadě horských vrcholů ležících těsně vedle sebe v celém prostoru.

Zadruhé, zatím jsme se téměř nedotkli *kvantového* aspektu kvantové teorie pole. Inflatonové pole je stejně jako všechno ostatní v našem kvantovém vesmíru podrobena kvantové neurčitosti. To znamená, že jeho hodnota je vystavena náhodnému kvantovému chvění, přičemž na okamžik trochu vzroste zde a klesne jinde. V každodenních situacích je kvantové chvění příliš slabé, takže si ho ani nevšimneme. Výpočty však ukazují, že intenzita chvění bude silnější, bude-li mít energie inflatonového pole vyšší hodnotu. A jelikož inflaton obsahoval extrémně vysoké množství energie během inflační éry, chvění v raném vesmíru bylo silné a dominantní.⁸

Měli bychom si proto vybavit nejen četu Otesáneků usazených na vrcholcích totožných hor, ale uvědomit si i to, že je každý z nich vystaven náhodné posloupnosti otřesů – silnějších na jednom místě, slabších na jiném, velmi silných na třetím. S takovými předpoklady teď můžeme určit, co se stane. Různé Otesánkovy klony zůstanou k horským vrcholům připoutány po různě dlouhou dobu. V některých oblastech setřesou silné záchvěvy všechny Otesánky ze svahů, slabší otřesy jinde shodí jen část Otesáneků, silné otřesy v další oblasti *vrátí* několik Otesáneků skutálevších se dolů na vrchol. Po určité době se terén přemění v náhodnou směs oblastí – podobných státům, které dohromady tvoří USA – a v některých z nich už na vrcholech žádní Otesánci nezbyvají, zatímco v jiných jsou stále bezpečně přišpendleni.



Různé oblasti, v nichž inflační pole sklouzlo ze svahu (tmavší barva), nebo zůstalo nahoře (světlejší šedá).

Náhodný charakter kvantových vibrací vede v případě inflatonového pole k podobnému závěru. Hodnota pole v každém bodě začíná vysoko na svahu potenciální energie. Kvantové chvění pak vyvolává otřesy. Díky nim, jak ilustruje obrázek nahoře, se vesmír rychle rozdělí na různé domény: v některých kvantové chvění srazí pole dolů pod svah, zatímco v jiných zůstane toto pole nahoře.

Zatím je vše jasné. Teď dávejte obzvláště pozor, neboť dospíváme k bodu, v němž se kosmologie od případu s Otesánky liší. Pole rozložené v horní části své energetické křivky ovlivňuje své prostředí mnohem viditelněji než podobně usazený Otesánek. Vzpomeneme-li si na stále opakované tvrzení – že homogenní energie a záporný tlak vytvářejí odpudivou gravitaci –, rychle se dovtípíme, že oblast, kterou pole prostupuje, se rozpíná fantastickou rychlostí. To znamená, že vývoj inflatonového pole v celém prostoru ovládají dva protichůdné děje. Kvantové vibrace tím, že pole občas z maxima srazí, *zmenšují* velikost prostoru, který je zaplaven vysokou energií pole. Inflační rozpínání naopak *zvětšuje* velikost prostoru napuštěného vysokou energií pole, protože nafukuje objem oblastí, kde pole zůstává vysoko.

Který z obou dějů zvítězí?

Ve velké většině variant inflační kosmologie je nárůst přinejmenším tak rychlý, jak rychlý je pokles. To proto, že pokud může být inflační pole příliš snadno sraženo z vrcholku, není většinou schopno vyvolat takovou inflační

expanzi, aby byl vyřešen problém horizontu; v kosmologicky úspěšných verzích inflace proto nárůst objemu vyhraje nad poklesem a zaručí, že objem prostoru s vysokou energií pole s časem roste. Uvědomíme-li si, že taková uspořádání pole vedou k další inflační expanzi, dojde nám, že jakmile inflace začne, už nikdy nemůže skončit.

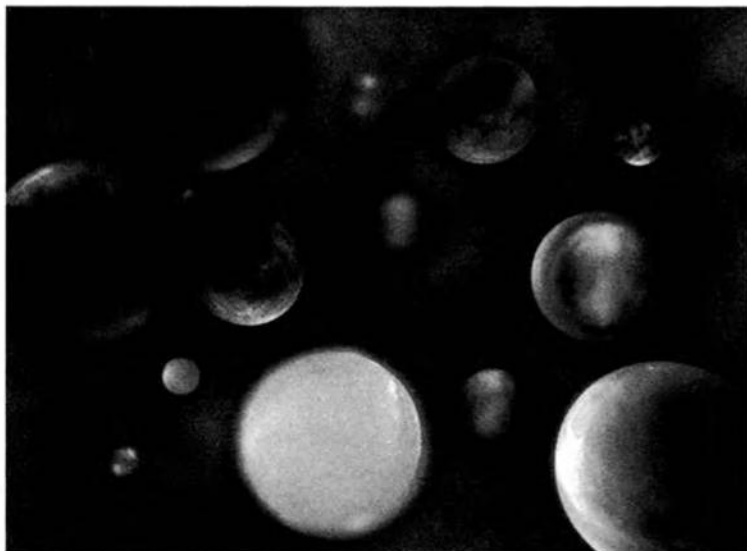
Podobá se to šíření virové epidemie. Abyste infekci vymýtili, potřebujete virus ničit rychleji, než se sám rozmnoží. Inflační virus se „rozmnožuje“ – vysoká hodnota pole vyvolává rychlé rozpínání prostoru, a proto napouští stále větší oblast prostoru stejně vysokou hodnotou pole –, a to vyšším tempem, než jakým soupeřící děj tuto oblast zmenšuje. Inflační virus tedy ve svém důsledku odolává jakékoli snaze o vymýcení.⁹

Ementál a vesmír

Ve svém souhrnu tyto poznatky znamenají, že inflační kosmologie kreslí zcela nový pohled na rozlohu reality, již lze nejnázorněji pochopit s pomocí prosté vizuální pomůcky. Představte si, že je vesmír gigantickou kostkou ementálského sýra, přičemž sýrové části odpovídají oblastem s vysokou hodnotou inflatonového pole, kdežto díry jsou místa, kde je tato hodnota nízká. Jinými slovy, díry jsou oblasti – jako ta naše –, které už opustily fázi superrychlého rozpínání a spolu s tím převedly energii inflatonového pole na lázeň částic, které se mohou v průběhu času zformovat v galaxie, hvězdy a planety. Naše předchozí zjištění se dají do ementálského jazyka přeložit tak, že kosmický sýr má stále více děr proto, že kvantové procesy na náhodných místech srážejí hodnotu inflatonu k nižším hodnotám. Zároveň s tím se sýrové oblasti zvětšují, protože jsou podrobeny inflačnímu rozpínání poháněnému vysokou hodnotou inflatonového pole, jemuž poskytují útočiště. Tyto dva děje v souhrnu ústí v trvale se rozpínající kostku kosmického sýra proděravělého neustále rostoucím množstvím děr. V obvyklejším názvosloví kosmologie se každé díře říká *vesmírná bublina* (nebo *vesmírná kapsa*).¹⁰ Každá z nich je otvorem v superrychle se nafukujícím prostoru vesmíru (obrázek na straně 59).

Nenechte se zmást malou velikostí mýdlových bublin, po nichž dostaly vesmírné bubliny své názorné jméno. Vesmírné bubliny malé nejsou; jsou tak obrovské, jako je celý nám známý vesmír. To, že může být jednou z oblastí začleněných v ještě větší kosmické struktuře – jednou bublinou v ohromné kostce kosmického sýra –, je podle inflačního nazírání důsledek fantastické rozlohy vesmíru jako celku. Totéž platí i pro ostatní bubliny. Každá by byla do stejné míry vesmírem – vesmírem dynamickým a gigantickým co do rozlohy – jako ta naše.

V určitých verzích inflační teorie inflace netrvá věčně. Pohrají-li si s takovými údaji, jako je počet inflatonových polí a jejich křivky potenciální energie, dokážou šikovní teoretici nastavit parametry vesmíru tak, že inflaton



Inflační multivesmír vzniká, když se vesmírné bubliny nepřetržitě rodí v neustále se rozpínajícím prostředí, vyplněném vysokou hodnotou inflačního pole.

v příhodnou dobu sklouzne z vrcholu všude. Takové modely jsou však spíše výjimkou než pravidlem. Náhodně zvolené verze inflace vytvářejí monstrózní počet vesmírných bublin, objevujících se v trvale se rozpínajícím prostoru. A proto platí, že je-li inflační teorie správná a je-li její vtělení ovládající náš vesmír věčné, jak mnohé teoretické rozborů naznačují, potom je inflační multivesmír nevyhnutelným důsledkem.

Změna perspektivy

V osmdesátých letech, když si Vilenkin uvědomil, že inflační rozpínání trvá navěky a dává povstat paralelním vesmírům, celý rozechvělý se vydal na MIT, aby o tom řekl Alanu Guthovi. Uprostřed jeho sdělení Guthovi poklesla hlava: usnul. To nemuselo být nutně špatným znamením; Guth totiž proslul tím, že proklimbá většinu fyzikálního semináře – řádka lidí na to pomrkáváním poukazovala i při mých přednáškách –, a pak v náhodný okamžik otevře oči a položí tu nejchytřejší otázku. Širší společenství fyziků však Vilenkinovy závěry nepřijalo o nic nadšeněji než Guth, a tak Vilenkin myšlenku nerozvíjel a přeorientoval se na jiný výzkum.

Od té doby se mínění vědecké obce velmi změnilo. Když Vilenkin přemýšlel o inflačním multivesmíru poprvé, byla správnost inflační teorie samotné podpořena jen hrstkou experimentálních argumentů. A tak i těm vědcům, kteří věnovali inflaci alespoň nějakou pozornost, připadaly úvahy o velké

sbírce paralelních vesmírů vytvořených inflačním rozpínáním jako vrstvení spekulací. Pozorování v dalších letech však postavila inflační teorii na mnohem pevnější půdu, hlavně zásluhou přesných měření reliktního záření.

Ačkoli byla pozorovaná homogenita reliktního záření jedním z hlavních podnětů pro inflační teorii, její původní navrhovatelé si uvědomili, že z rychlého rozpínání prostoru by nevzešlo *dokonale* homogenní záření. Proto tvrdili, že kvantověmechanické vibrace nafouknuté inflačním rozpínáním „pocukrovaly“ původně stejnorodý vesmír drobnými variacemi teplot, podobnými vlnkám na povrchu jinak hladkého rybníka. Ukázalo se, že tento jejich poznatek má grandiózní, dalekosáhlé důsledky.* Proč?

Kvantová neurčitost totiž způsobuje, že se pomyslná ručička ukazující velikost inflatonového pole chvěje. A skutečně, je-li inflační teorie správná, skončila exploze inflačního rozpínání v naší oblasti proto, že dostatečně velká kvantová fluktuace šťastnou náhodou téměř před 14 miliardami let srazila inflaton v našem okolí z blízkosti maxima. Tím ale příběh nekončí. S tím, jak se kulička graficky znázorňující hodnotu inflatonu kutálela po svahu k bodu, jenž signalizuje konec inflace v naší bublině, její polohu (tedy hodnotu inflatonu) ovlivňovaly kvantové vibrace. Toto chvění trochu zvýšilo hodnotu inflatonu na jednom místě a snížilo ji o kus vedle, jako vlnící se povrch peřiny, která se právě rozprostírá na vaší posteli. Tím se vytvořily drobné variace energie inflatonu, která zaplavuje prostor. Za normálních okolností jsou takové variace velice chabé a ovlivňují natolik malinké vzdálenosti, že nemají pro děje na kosmologických měřítkách žádný velký význam. Ale inflační rozpínání nemá s normálními okolnostmi nic společného.

Rozpínání prostoru je natolik rychlé, a to i v konečných stadiích inflační fáze, že mikroskopické délky nabudou makroskopických velikostí. Stejně jako můžete trpasličí zprávu naškrábanou na vyfouknutý balonek snáze přečíst, jestliže balonek napustíte vzduchem, tak se i vliv kvantových vibrací stane viditelným, když inflační rozpínání nesmírně nafoukne kosmickou tkaninu. Konkrétněji – drobné rozdíly ve velikostech inflačního pole způsobené kvantovým chvěním se přemění do variací teplot, které lze pozorovat v reliktním záření. Výpočty ukazují, že rozdíly teplot by nebyly obrovské – mohly by dosáhnout asi tisícinu stupně. Pokud je teplota v jedné oblasti 2,725 kelvinu, můžeme v důsledku roztaženého kvantového chvění na dalším, nedalekém, místě zaznamenat teplotu o něco chladnější, řekněme 2,7245 kelvinu, nebo o něco teplejší, například 2,7255 kelvinu.

Puntičkářsky přesná astronomická pozorování takové teplotní variace hledala. A našla je. Přesně jak teorie předpověděla, měly velikost asi tisícinu stup-

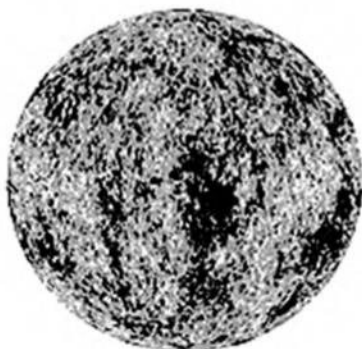
* Mezi vědci, kteří se na tomto poznání nejvíce podíleli, byl Vjačeslav Muchanov, Gennadij Čibisov, Stephen Hawking, Alexej Starobinskij, Alan Guth, So-Young Pi, James Bardeen, Paul Steinhardt a Michael Turner.

ně (viz obrázek dole). A ještě daleko působivější je to, že drobné variace teplot vykreslují na obloze vzorek, jehož vlastnosti lze do detailů vysvětlit teoretickými výpočty. Graf na straně 62 porovnává teoretické předpovědi, jak by se teplota měla lišit v závislosti na vzdálenosti mezi dvěma místy (ta se měří jako úhel mezi zornými paprsky ze Země), se skutečnými měřeními. Shoda je přímo úžasná.

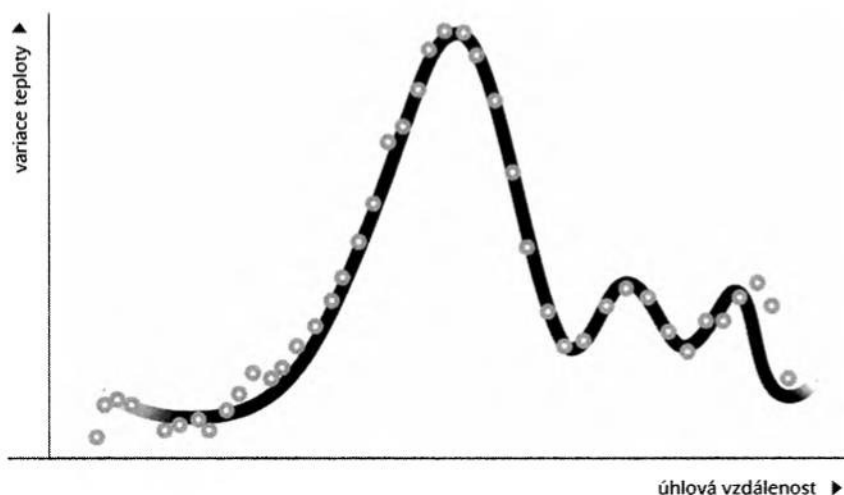
V roce 2006 byla Nobelova cena za fyziku udělena Georgi Smootovi a Johnu Matherovi, kteří vedli tým více než tisíce badatelů, jenž pomocí družice COBE – *Cosmic Background Explorer (Průzkumník kosmického pozadí)* – na začátku devadesátých let jako první tyto jemné variace teplot detekoval. Za posledních deset let přinášela stále nová a přesnější měření podobné údaje jako ty z uvedeného grafu a umožnila ještě mnohem přesnější ověření předpověděných variací teplot.

Do těchto výsledků vyústil napínavý příběh o objevech, které započaly poznatky Einsteina, Fridmana a Lemaîtrea, byly energicky popostrčeny výpočty Gamowa, Alphera a Hermana, vzkříšeny myšlenkami Dickeho a Peeblese a reálně pozorovány Penziasem a Wilsonem a které teď vyvrcholily prací celé armády astronomů, fyziků a inženýrů, jejichž kolektivním úsilím byly naměřeny fantasticky jemné otisky prstů, které vesmír zanechal na obloze před miliardami let.

I kdyby nás nezajímaly žádné výpočty, měli bychom být všichni vděční za skvrny na obrázku dole. Když se inflace blížila ke konci, vyvolaly v naší vesmírné bublině oblasti s drobným přebytkem energie (nebo ekvivalentně – podle $E = mc^2$ – oblasti s větším množstvím hmoty) o něco silnější gravitační přitažlivost, čímž přilákaly větší počet částic z okolí a tak ještě více zvýšily svou hmotnost. Tento mohutnější shluk proto nabaloval okolní hmotu ještě silněji, a tudíž ještě více bobtnal. V jisté chvíli se z takto nabalené sněhové koule vyklubaly chomáče hmoty a energie, z nichž se za miliardy let vyvinuly



Nesmírná prostorová rozloha inflačního kosmu nafukuje kvantové fluktuace z mikroskopické do makroskopické velikosti a to vyvolává pozorovatelné variace teplot v reliktním záření (tmavší kaňky jsou o něco chladnější než ty světlejší).



Vzorek teplotních rozdílů v reliktním záření. Na svislou osu jsou vyneseny odchylky teploty; odlehlost mezi dvěma místy (měřená jako úhel mezi oběma zornými paprsky při pohledu ze Země – větší úhly jsou nalevo, menší napravo) ukazuje vodorovná osa.¹¹ Plná čára zachycuje teoretickou křivku; pozorované údaje jsou zaznamenány kolečky.

galaxie a hvězdy v nich. Tak inflační teorie pozoruhodně propojuje nejmenší a největší struktury v kosmu. Samotná existence galaxií, hvězd, planet a života samotného pochází z mikroskopické kvantové neurčitosti, kterou zesílilo inflační rozpínání.

Teoretická podezdívka inflace je možná poněkud provizorní; inflaton koneckonců zůstává pouze hypotetickým polem, jehož existence bude muset být ještě v budoucnosti prokázána. Křivka jeho potenciální energie je předpokládána teoretiky, ale nebyla změřena experimentálně; inflaton musí z nějakého důvodu začít nedaleko vrcholu své křivky v celé oblasti prostoru a tak dále. Navzdory tomu všemu, a dokonce i v případě, že některé podrobnosti teorie poněkud kulhají, přesvědčil už soulad mezi teorií a pozorováními mnohé, že inflační schéma nám načepovalo nějakou tu pintu pravdy o vývoji kosmu. A protože tak mnoho odrůd inflace trvá navěky, takže produkují stále rostoucí počet vesmírných bublin, táhne teorie a pozorování za jeden provaz a nepřímě svědčí ve prospěch ambiciózního výroku, že existují paralelní světy druhé odrůdy.

Zážitky z inflačního multivesmíru

Mezi paralelními vesmíry v sešivaném multivesmíru neexistují žádné ostré hranice. Všechny vesmíry jsou součástí jediného prostoru, jehož vlastnosti se co do kvality příliš neliší od oblasti k oblasti. Překvapení jsou skryta v podrob-

nostech. Většina z nás by neočekávala, že se budou světy opakovat; většina z nás by neočekávala, že se čas od času setkáme s klony sebe sama nebo i s klony svých kamarádů a příbuzných. Kdybychom se však mohli vydávat na dostatečně daleké cesty, potkali bychom se s nimi.

V inflačním multivesmíru jsou jednotlivé vesmíry od sebe ostře odděleny. Každý je jakousi dírou v kosmickém síru, která je od dalších děr oddělena zónami, v nichž hodnota inflatonu zůstává vysoká. Protože tyto příhraniční oblasti stále prožívají inflační expanzi, jsou vesmírné bubliny hnány rychle od sebe, a to rychlostí úměrnou množství nafukujícího se prostoru mezi nimi. Čím dále od sebe jsou, tím vyšší rychlostí se rozpínají; dříve či později se vzdálené bubliny musejí od sebe vzdalovat nadsvětelnou rychlostí. Ani nekonečná délka života a dokonalá technika by k přemostění takové propasti nestačily. Neexistuje dokonce ani způsob, jak z jedné bubliny do druhé poslat signál.

Přesto si můžeme cestu do jedné nebo mnoha dalších vesmírných bublin představit. Co bychom na takovém výletě viděli? Poněvadž každá bublina je výsledkem stejného děje – pádu inflatonu z výšky v oblasti, v níž se inflační rozpínání zastaví –, řídí se všechny stejnou fyzikální teorií, a jsou tedy ovládnány stejnou množinou fyzikálních zákonů. Ale právě jako se chování identických dvojčat může zásadně lišit v důsledku rozdílů prostředí, v nichž byla dvojčata vychovávána, tak se identické zákony mohou v různých prostředích projevit podstatně odlišně.

Představte si třeba, že jedna z dalších vesmírných bublin vypadá skoro jako ta naše a je stejně jako ta naše poseta hvězdami a planetami. Liší se však v jednom. Její prostor je zaplaven magnetickým polem tisíckrát silnějším, než je pole v našem nejpokročilejším zařízení magnetické rezonance, polem, které nemůže být vypnuto žádným technikem. Takto silné pole by ovlivnilo chování mnoha předmětů. Nejenže by objekty obsahující železo měly ošklivý zvyk poletovat ve směru pole, dokonce i základní vlastnosti částic, atomů a molekul by se poněkud pozměnily. Dostatečně silné magnetické pole by kromě toho narušilo základní funkce buňky, a proto by se tam takový život, jaký známe, nemohl uchytit.

A přece jsou fyzikální zákony platné uvnitř zařízení magnetické rezonance shodné s těmi venku, a proto by fundamentální fyzikální zákony působící v tomto magnetickém vesmíru byly stejné jako ty naše. Odchytky v experimentálních výsledcích a pozorovatelných veličinách by vycházely jen z vlastností prostředí: ze silného magnetického pole. Talentovaní vědci v magnetickém vesmíru by se touto vlastností prostředí nenechali ošálit a nakonec by dospěli ke stejným matematickým rovnicím, jako jsme objevili my.

V posledních čtyřiceti letech dokázali badatelé něco podobného i v našem vesmíru. Nejvíce velebená teorie fundamentální fyziky, *standardní model částicové fyziky*, předpokládá, že jsme ponořeni v exotické mlze zvané *Higgsovo pole* (pojmenované po anglickém fyzikovi Peteru Higgsovi, který se v šedesátých

letech stal průkopníkem této myšlenky; dále k ní přispěl Robert Brout, François Englert, Gerald Guralnik, Carl Hagen a Tom Kibble). Higgsovo pole i magnetické pole jsou pole neviditelná, a tak mohou vyplnit prostor, aniž by se přímo prozradila. Ovšem podle moderní teorie částic se Higgsovo pole kamufluje mnohem dokonaleji než pole magnetické. Když se částice pohybují homogenním Higgsovým polem, které vyplňuje prostor, nezrychlují se ani nezpomalují a nejsou tlačeny k tomu, aby se pohybovaly po zvláštních trajektoriích, jak by se to dělo v silném magnetickém poli. Jsou ovlivněny nenápadněji, zato hlouběji.

Když fundamentální částice proplouvají Higgsovým polem, *získávají a udržují si hmotnost, kterou zaznamenaly experimenty*. Podle této teorie je odpor, kterým se elektron nebo kvark brání změně rychlosti, pokud na ně působí síla, zapříčiněn „drhnutím“ částice o Higgsův „sirup“. Takovému odporu říkáme hmotnost částice. Kdybyste mohli Higgsovo pole z nějaké oblasti odstranit, částice tudy procházející by se najednou staly nehmotnými. Kdybyste naopak dokázali v jiné oblasti velikost Higgsova pole zdvojnásobit, částice prolétávající touto oblastí by najednou získaly dvakrát větší hmotnosti než obvykle.*

Takové člověkem způsobené změny jsou hypotetické, protože energie potřebná k podstatné změně hodnoty Higgsova pole, ba i v malé oblasti, daleko přesahuje lidské kapacity. (Změny jsou hypotetické i proto, že existence Higgsových polí zůstává nejistá. Teoretici nedočkavě čekají na vysokoenergetické srážky protonů na Velkém hadronovém srážeci (LHC) a těší se na to, jak odkrojí malé chomáče Higgsova pole – Higgsovy částice o klidové energii 125 gigaelektronvoltů –, které mohou být objeveny v nejbližších letech.) Ale podle mnoha verzí inflační kosmologie by *Higgsovo pole přirozeně nabývalo odlišných hodnot v různých vesmírných bublinách*.

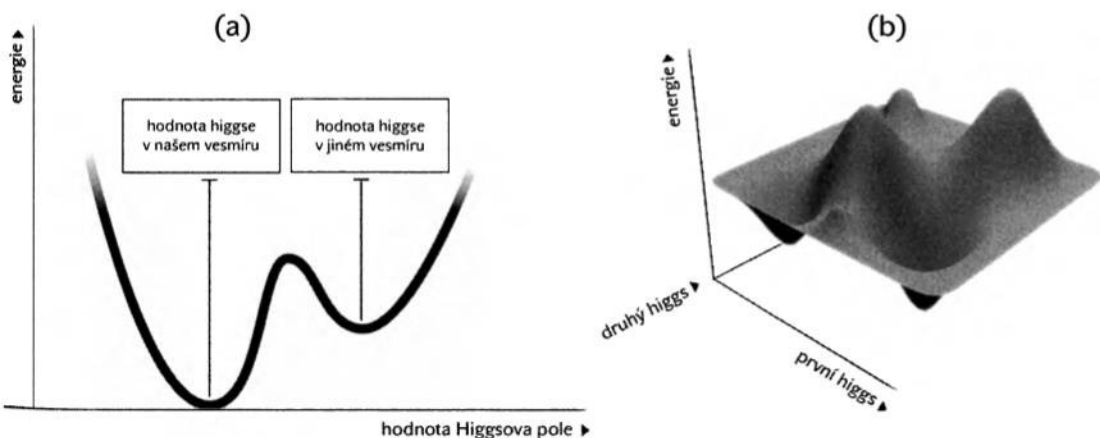
Právě jako v případě inflatonového pole závisí množství energie obsažené v Higgsově poli na hodnotách pole podle určité křivky. Podstatným rozdílem od energetické křivky inflatonového pole však je, že higgs nejčastěji nesedí na nulové hodnotě (jako na obrázku na straně 54), ale skutálí se spíše do jednoho z důlků znázorněných na obrázku *a* na straně 65. Představte si potom ranou fázi života dvou vesmírných bublin, naší i nějaké další. V obou se Higgsovo pole divoce mění na pozadí bouřlivé aktivity žhavého vesmíru. Když se vesmír rozpíná a ochlazuje, zklidňuje se i Higgsovo pole a jeho hodnota klouže k jednomu z důlků na obrázku *a* na straně 65. V našem vesmíru se jeho hodnota může usadit řekněme v levém důlku, čímž obdaří částice vlastnostmi známými z experimentálních pozorování. Zato v druhém vesmíru se

* Zdůrazňuji *fundamentální* částice, jako je elektron a kvark, protože velkou část hmotnosti složených částic, například protonů a neutronů (každý je složen ze tří kvarků), tvoří interakční energie mezi jejich stavebními bloky (tedy energie uložená v gluonech zprostředkujících silnou jadernou sílu – gluony totiž slepují kvarky uvnitř protonů a neutronů a výrazně tak hmotnost těchto složených částic zvyšují).

nakonec může Higgsovo pole usadit v pravém důlku. Stane-li se tak, pak by tento vesmír měl vlastnosti podstatně odlišné od našeho. Ačkoli by se oba vesmíry řídily stejnými zákony, co do hmotnosti a dalších vlastností částic by se lišily.

Dokonce i skromná změna vlastností částic by měla vážné důsledky. Kdyby byl elektron v jiné bublině několiknásobně těžší než v naší, elektrony a protony by měly sklon se slučovat a vytvářet neutrony a to by zabránilo vzniku dostatečného množství vodíku. Fundamentální síly – elektromagnetická síla, jaderné síly a (jak věříme) gravitace – také vděčí za svou existenci určitým částicím, které tyto síly zprostředkovávají. Změna vlastností částic proto vede i ke změně vlastností sil. Čím je například částice těžší, tím lenivěji se pohybuje a tím kratší vzdálenost dokáže odpovídající síla překlenout. Utváření a stabilita atomů v naší vesmírné bublině závisejí na vlastnostech elektromagnetické síly a dvou sil jaderných. Jakmile tyto síly podstatně změníte, atomy se rozpadnou nebo – a to je pravděpodobnější – vůbec nevzniknou. Znatelná změna vlastností částic by proto rozvrátila klíčové děje, které dávají našemu vesmíru tvář.

Graf *a* dole ilustruje pouze nejjednodušší případ – případ s jedním druhem Higgsova pole. Teoretičtí fyzici však zkoumali i složitější scénáře s několika Higgsovými poli (brzy uvidíme, že takové možnosti přirozeně vyvěrají z teorie strun), z nichž povstává stále rozmanitější množina různých vesmírných bublin. Příklad se dvěma Higgsovými poli je znázorněn na obrázku *b*. Stejně jako předtím představují jednotlivé prohlubně hodnoty Higgsových polí, k nimž může ta či ona vesmírná bublina směřovat



(a) Křivka potenciální energie pro Higgsovo pole má obvykle dvě prohlubně. Znamé vlastnosti našeho vesmíru jsou spojeny s tím, že se pole usadí v levém důlku; v jiném vesmíru si ovšem může vybrat důlek pravý, a to povede k odlišným fyzikálním vlastnostem.

(b) Příklad křivky potenciální energie v teorii se dvěma Higgsovými poli..



Protože se pole mohou v různých bublinách ustálit na různých hodnotách, vesmíry v inflačním multivesmíru mohou mít odlišné fyzikální vlastnosti, třebaže ve všech panují stejné fundamentální fyzikální zákony.

Tyto vesmíry prostoupené takovými exotickými hodnotami různých Higgsových polí by se od toho našeho značně lišily (jak schematicky ilustruje obrázek nahoře). Proto by výprava do inflačního multivesmíru byla riskantním podnikem. Mnohé z vesmírných bublin byste měli raději ze svého itineráře vyškrtnout, protože podmínky panující v nich nejsou slučitelné s biologickými procesy klíčovými pro přežití. Takové bubliny podtrhávají moudrost pořekadla o tom, že všude dobře, doma nejlíp. V případě inflačního multivesmíru by naše vesmírná bublina mohla dost dobře být jakousi ostrovní oázou života v gigantickém, ale nevládném kosmickém souostroví.

Vesmíry ve skořápce

Mohlo by se zdát, že kvůli podstatným rozdílům nelze mezi sešívány a inflačními vesmíry nalézt žádnou souvislost. Sešívaná odrůda vzniká v případě nekonečného objemu prostoru; inflační verze závisí na věčném inflačním rozpínání. Přesto mezi oběma typy existuje hluboké a báječně uspokojující spojení, jímž se uzavře kruh našeho vyprávění z předchozích dvou kapitol. Paralelní vesmíry pocházející z inflace totiž dávají povstat svým sešívaným bratříčkům. Tento proces má co do činění s časem.

Mezi mnoha podivnostmi, které odhalila Einsteinova práce, patří pružnost času k těm nejhůře uchopitelným. Zatímco každodenní zážitky nás přesvědčují o objektivní povaze plynutí času, teorie relativity ukazuje, že tento dojem

je klamným důsledkem života při nízkých rychlostech a slabé gravitaci. Pohybujete-li se téměř světelnou rychlostí nebo ponoříte-li se do silného gravitačního pole, obvyklé a univerzální pojetí času se vypaří. Proletíte-li kolem mě, budou události, které se podle mého názoru odehrály zároveň, z vašeho pohledu probíhat ve dvou různých okamžicích. Jste-li zavěšeni nedaleko okraje černé díry, za hodinu odměřenou vašimi hodinkami uběhne monumentálně delší čas na hodinkách mých. A nejde o žádné finty kouzelníkovy nebo podvody hypnotizérovy. Plynutí času závisí na údajích toho, kdo měří – na dráze, po níž se pohybuje, a na gravitaci, kterou pociťuje.¹²

Když tento fakt vztáhneme na celý vesmír nebo na naši bublinu v inflačním kontextu, okamžitě se vynoří otázka: Jak se může takový poddajný čas shodovat s pojmem absolutního kosmologického času? Bez zábran mluvíme o „věku“ našeho vesmíru, ale jelikož se galaxie pohybují rychlostmi, jež jsou určeny jejich vzdálenostmi, nestává se relativita plynutí času noční můrou každého potenciálního kosmického časoměřiče? Řečeno bez obalu, používáme nějaké konkrétní hodiny, když mluvíme o tom, že náš vesmír je „14 miliard let starý“?

Ano, používáme. A naše přísné zkoumání tohoto kosmického chronometru zároveň odhalí souvislost mezi paralelními vesmíry inflačního a sešivaného druhu.

Všechny metody měření času jsou založeny na pozorování změn nějakého konkrétního fyzikálního systému. U klasických nástěnných hodin sledujeme změnu v poloze ručiček. U slunečních hodin pozorujeme změnu polohy Slunce na nebi. Datování uhlíkem 14 je založeno na zkoumání podílu hmotnosti původního vzorku, který se radioaktivně rozpadl na dusík. Historické tradice a snad i pohodlnost nás nutí věnovat pozornost otáčení a obíhání Země, z nichž pramení obvyklé a jednoduché fyzikální pojmy „den“ a „rok“. Ale přemýšlíme-li o celém širším všehomíru, nabízí se nám ještě jedna, užitečnější metoda, jak určovat čas.

Viděli jsme, že v důsledku inflačního rozpínání vznikají obrovské oblasti s vlastnostmi v průměru homogenními. Změříme-li teplotu, tlak a průměrnou hustotu hmoty ve dvou velkých, ale oddělených částech vesmírné bubliny, hodnoty se nebudou lišit. Tyto hodnoty se s časem mohou měnit, ale homogenita na velkých měřítkách zaručuje, že změny *zde* jsou stejné jako změny *tam*. Důležitým příkladem změn je postupný pokles hustoty hmoty v naší vesmírné bublině během její miliardy let trvající historie, jež má na svědomí neúnavné rozpínání prostoru, ale jelikož k této změně došlo homogenně, nebyla stejnorodost bubliny na obrovských vzdálenostech narušena.

To je důležité, protože stejně jako klesající podíl uhlíku 14 v organické hmotě umožňuje měřit plynutí času na Zemi, nabízí nám trvale se zmenšující hustota hmoty nástroj, jak měřit plynutí času v celém prostoru. A protože ke změně dochází všude, je hustota hmoty globálním standardem plynutí času

v celé naší bublině. Jestliže všichni pilně seřizují své hodinky na průměrnou hustotu hmoty (a dělají to znovu po každé cestě k černé díře a po každém letu téměř světelnou rychlostí), zůstane synchronnost našich chronometrů zachována v celé vesmírné bublině. Mluvíme-li o věku vesmíru – tedy věku naší bubliny –, míníme tím výsledek měření toku času s pomocí takto kosmicky seřizovaných hodin; pouze vůči nim je kosmický čas smysluplný pojem.

Stejně úvahy – až na detail – se vztahují i na nejranější okamžiky života naší vesmírné bubliny. Obyčejná hmota ještě nebyla vytvořena, a proto nemůžeme mluvit o její průměrné hustotě v prostoru. Místo toho bylo zásobárnou energie vesmíru inflatonové pole – s energií, která může být za okamžik převedena na dobře známé částice –, takže je na místě si představit, že hodiny se nařizují podle hustoty energie inflatonového pole.

A energie inflatonu je podle energetické křivky určena hodnotou inflatonového pole. Abychom mohli určit, kolik je v určitém místě hodin, musíme tedy znát hodnotu inflatonu v daném místě. Říkáme, že dva stromy jsou stejně staré, mají-li stejný počet letokruhů, a že dva vzorky ledovcové usazeniny jsou stejně staré, obsahují-li stejné procento radioaktivního uhlíku. Podobně platí, že *dvě místa v prostoru prožívají tentýž okamžik času tehdy, má-li v nich inflatonové pole stejnou hodnotu*. Tak v naší vesmírné bublině nastavujeme a synchronizujeme hodiny.

Proč o tomhle všem mluvím? Proto, že vztáhneme-li tyto principy na ementál inflačního multivesmíru, plyne z pozorování jeden instinktivně velmi nerosozumitelný důsledek. Hamlet pronesl slavnou větu: „Mohl bych být zavřen ve skořápce od ořechu, a přitom se považovat za krále nekonečného prostoru.“ Podobně každá vesmírná bublina se zdá prostorově *konečná* zvenku, ale *nekonečná* zevnitř. A to je podivuhodný poznatek. Nekonečnost prostoru je přesně tím, co potřebujeme pro sešívání paralelní vesmír. A tak můžeme sešívání multivesmír včlenit do inflačního popisu.

Extrémní nepoměr mezi pohledem pozorovatele uvnitř a pozorovatelem venku pramení z toho, že zásadně odlišně pojímají čas. O kousek dál uvidíme, co zdaleka není očividné, totiž že *to, co vnější pozorovatel vnímá jako nekonečný čas, se pozorovateli uvnitř jeví jako nekonečný prostor v každém okamžiku času*.¹³

Prostor ve vesmírné bublině

Pro lepší pochopení si představte Čestmíra, rychle se vznášejícího v rozpínavící se oblasti prostoru vyplněné inflatonem, jak pozoruje vznik nedaleké vesmírné bubliny. Zaměří-li svůj inflatonoměřič na nadouvající se bublinu, je schopen přímo sledovat vyvíjející se hodnotu inflatonového pole. Ačkoli je tato oblast – díra v kosmickém ementálu – třírozměrná, je snazší zkoumat pole na jednorozměrné křivce podél jejího průměru. Čestmír to tak dělá a zaznamenává údaje z obrázku na straně 69. Každá nová řádka nahoře uka-

70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70
80	70	60	50	40	30	20	10	20	30	40	50	60	70	80
90	80	70	60	50	40	30	20	30	40	50	60	70	80	90
100	90	80	70	60	50	40	30	40	50	60	70	80	90	100
100	100	90	80	70	60	50	40	50	60	70	80	90	100	100
100	100	100	90	80	70	60	50	60	70	80	90	100	100	100
100	100	100	100	90	80	70	60	70	80	90	100	100	100	100
100	100	100	100	100	90	80	70	80	90	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	90	80	90	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Každá řádka zachycuje hodnotu inflatonu v jednom okamžiku z pohledu pozorovatele venku. Vyšší řádky odpovídají pozdějším okamžikům. Sloupce označují polohy v prostoru. Bublina je ta oblast prostoru, kde inflace v důsledku poklesu hodnoty inflatonu skončila. Světější čtverečky navíc vypovídají o hodnotě inflatonového pole v bublině. Z pohledu vnějšího pozorovatele roste velikost bubliny neomezeně.

zuje hodnoty inflatonu v následujícím okamžiku času měřeného z Čestmírova pohledu. A jak je zjevné z obrázku, Čestmír vidí, že velikost vesmírné bubliny – v obrázku světlejší místa, na nichž hodnota inflatonu už klesla – s časem roste.

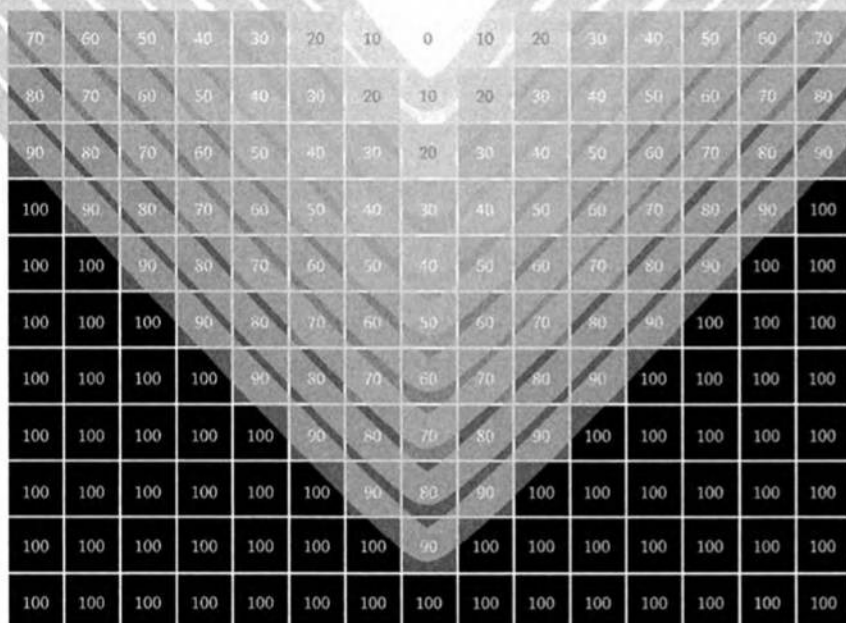
A teď zaměřte svou pozornost na Oskara. Zkoumá stejnou vesmírnou bublinu, ale zevnitř; s vlastním inflatonoměříčem se usilovně věnuje svým vlastním přesným astronomickým měřením. Na rozdíl od Čestmíra lpí Oskar na definici času, která se odvíjí od hodnoty inflatonu. To je zásadní pro závěr, k němuž se blížíme, a tak je třeba, abyste to náležitě docenili. Chcete-li, představte si, že každý ve vesmírné bublině nosí hodinky, které ukazují hodnotu inflatonu. Oskar se rozhodne uspořádat večírek. Dá svým hostům pokyn, aby se dostavili do jeho domu ve chvíli, kdy jejich hodinky ukážou hodnotu inflatonu 60. Protože hodinky všech jsou synchronizovány se stejným, celosvětovým standardem – hodnotou inflatonového pole –, večírek proběhne bez zádrhelů. Všichni se objeví ve stejný okamžik, protože jsou naladěni na stejnou definici synchronnosti.

Na základě těchto poznatků může Oskar snadno vypočítat velikost bubliny v každý okamžik času. Je to doslova hračka pro děti: stačí mu pospojovat

čtverečky podle čísel. Propojí-li všechny body, v nichž má inflatonové pole stejnou číselnou hodnotu, označí všechna místa v bublině, která přísluší stejnému okamžiku času. Jeho času. Času člověka uvnitř.

Obrázek dole to jasně prozrazuje. Každá křivka, spojující body se stejnou hodnotou inflatonového pole, představuje celý prostor v určitém okamžiku v čase. Jak je z obrázku jasné, pokračuje každá křivka nekonečně daleko, což znamená, že je velikost vesmírné bubliny podle jejích obyvatel *nekonečná*. To odráží skutečnost, že nekonečný čas podle pozorovatelů venku, spojený s nekonečným počtem Čestmírových řádek v obrázku na straně 69, se projevuje jako nekonečný prostor v každém okamžiku pro pozorovatele, který se jako Oskar nachází uvnitř bubliny.

To je dalekosáhlý poznatek. V 2. kapitole jsme zjistili, že sešívání multivesmír byl podmíněn nekonečnou rozlohou prostoru, tedy něčím, co může a nemusí existovat, jak jsme uvedli. Teď vidíme, že každá bublina v inflačním multivesmíru je prostorově konečná zvenku, zato prostorově nekonečná zevnitř. Odpovídá-li inflační multivesmír skutečnosti, potom by obyvatelé bubliny –



Stejná informace jako ta na obrázku předešlém podle někoho, kdo žije uvnitř bubliny. Hodnoty inflatonu, které se shodují, odpovídají témuž okamžiku, a proto se zakreslené křivky rozprostírají všemi body prostoru, které existují ve zvolený okamžik času. Menší hodnoty inflatonu odpovídají pozdějším okamžikům. Všimněte si, že křivky by šlo prodloužit jakkoli daleko, a proto je prostor z hlediska obyvatel bubliny nekonečný.

například my – byli nejen součástí inflačního multivesmíru, ale i multivesmíru sešíváního.¹⁴

Když jsem se poprvé dozvěděl o sešívání a inflačním multivesmíru, právě ten inflační na mě zapůsobil coby věrohodnější. Inflační kosmologie řeší řadu dlouhodobých záhad, přičemž její předpovědi souhlasí s pozorováními. A vzhledem k tomu, co jsem uvedl, je inflace přirozeně dějem, který nikdy nekončí; buduje jednu vesmírnou bublinu za druhou. Jednu z nich obýváme i my. Sešívání multivesmír, jehož existence závisí na nekonečnosti vesmíru, naopak skutečnosti odpovídat nemusí, protože náš vesmír může být konečným konečný, byť velmi velký. Teď jsme však viděli, že vesmírné bubliny ve věčné inflaci, jestliže se správně analyzují z pohledu jejich obyvatel, jsou prostorově nekonečné. Inflační paralelní vesmíry plodí i vesmíry sešívání.

Kosmologická teorie, jež nejlépe vysvětluje dostupná kosmologická data, nás vede k představě, že obýváme jen jeden z obrovské inflační soustavy paralelních vesmírů, z nichž každý poskytuje útočiště své vlastní sbírce sešívání paralelních vesmírů. Nejmodernější výzkum vykresluje vesmír nejen jako množinu paralelních vesmírů, ale dokonce jako celou kolekci paralelních vesmírů. Naznačuje, že realita není jen rozsáhlá, ale že je neuvěřitelně rozsáhlá.

Kapitola čtvrtá

Sjednocování přírodních zákonů

Na cestě ke strunové teorii

Kořeny moderní kosmologie od velkého třesku až k inflaci vycházejí z jednoho vědeckého semínka: z Einsteinovy obecné teorie relativity. Svou novou teorií gravitace Einstein převrátil vládnoucí představu rigidního a nezměnitelného času a prostoru; věda si najednou musela zvyknout na kosmos dynamický. K revolucím takové velikosti dochází zřídka. Einstein přesto snil o zdolání ještě vyšších vrcholů. S matematickým arzenálem a geometrickou intuicí, které nashromáždil do dvacátých let, si vytyčil úkol vypracovat *jednotnou teorii pole*.

Tímto pojmem Einstein mínil systém rovnic, který by všil všechny síly přírody do jediného, jednoduššího matematického gobelínu. Místo abychom měli jednu sadu zákonů pro určité jevy a jinou pro další, chtěl slít všechny tyto zákony do hladkého celku. Podle hodnocení dějin měla desetiletí Einsteinových intenzivních snah o sjednocení jen malý dopad na fyziku – sen to byl vznešený, jen načasování bylo předčasné –, ale další vědci přijali Einsteinův sen za svůj a mílovými kroky se blížili k jeho uskutečnění, přičemž nejrafinovanějším návrhem je *strunová teorie* neboli *teorie strun*.

Moje předchozí knihy *Elegantní vesmír* a *Struktura vesmíru* se věnovaly historii a zásadním rysům strunové teorie. V následujících letech čelila tato teorie přívalu pochybností ze strany veřejnosti. Není se čemu divit. Nehledě na veškerý pokrok čeká tuto teorii stále úkol vyslovit definitivní předpovědi, jejichž experimentální ověření ji může potvrdit, nebo vyvrátit. Protože tři následující typy multivesmíru, s nimiž se setkáme (v 5. a 6. kapitole), vyrůstají ze strunověteoretické perspektivy, obrátíme pozornost nejen na současný stav teorie, ale i na vyhlídky, že bude podložena údaji z experimentů a pozorování. Takový bude cíl této kapitoly.

Stručná historie sjednocení

V dobách, kdy snil o sjednocení Einstein, tvořila seznam známých sil jen gravitace, popsaná jeho vlastní obecnou teorií relativity, a elektromagnetismus, popsaný Maxwellovými rovnicemi. Einstein si představoval, že obě sady

zákonů sloučí do jediné matematické věty, která by vyjadřovala, jak fungují všechny síly v přírodě. Svou jednotnou teorii spojoval s velkými nadějemi. Považoval – a právem – Maxwellovu práci na sjednocení z 19. století za prototyp hodnotného příspěvku k lidskému myšlení. Před Maxwellem představovaly elektrina proudící drátem, síla vyvíjená magnetem v ruce dítěte a světlo plynoucí ze Slunce na Zemi tři oddělené a spolu nesouvisející jevy. Maxwell odhalil, že ve skutečnosti tvoří vzájemně propletenou vědeckou trojici. Elektrické proudy *vytvářejí* magnetická pole, magnety pohybující se v blízkosti drátu *vzbuzují* elektrické proudy a vlnící se elektrická a magnetická pole se *projevují* jako světlo. Einstein očekával, že jeho vlastní práce bude v Maxwellově programu slučování úspěšně pokračovat dalším – a možná i tím posledním – krokem vstříc jednotnému popisu zákonů přírody, popisu, který by sjednotil elektromagnetismus s gravitací.

Nebyl to skromný úkol a Einstein ho nebral na lehkou váhu. Měl jedinečnou schopnost hluboko se vnořit do úkolu, který si předsevzal, a v posledních letech života se otázka sjednocení sil stala jeho hlavní posedlostí. Jeho osobní sekretářka a ochránkyně Helen Dukasová, která s ním strávila v princetonské nemocnici jeho předposlední den, 17. duben 1955, vzpomínala, jak Einstein, upoutaný na lůžko, ale cítící se trochu lépe, požádal o papír s rovnicemi, na němž donekonečna pracoval s matematickými symboly v uhasínající naději, že z nich jednou vykrystalizuje jednotná teorie pole. Východu Slunce se Einstein nedočkal. Jeho poslední rukopis na sjednocení žádné nové světlo nevrhl.¹

Málokterý ze současníků sdílel s Einsteinem takovou vášň pro sjednocení. Od půli dvacátých let do poloviny let šedesátých odhalovali fyzici, vedeni kvantovou mechanikou, záhady atomu a učili se, jak spoutat a využít jeho skrytou sílu. Lákavá vidina, že od sebe odtrhnou stavební bloky hmoty, byla naléhavá a neodolatelná. Třebaže mnozí souhlasili s tím, že sjednocení je chvályhodný úkol, bylo pro ně v době, kdy teoretici a experimentátoři s rukama v pracovních rukavicích odkrývali zákony mikroskopického světa, stále jen vedlejším zájmem. Einsteinův skon úsilí o sjednocení zcela zastavil.

Einsteinův neúspěch se stal ještě zřetelnějším, když z následujícího výzkumu vyplynulo, že jeho pátrání po jednotě bylo příliš úzce zaměřené. Nejenže podcenil roli kvantové fyziky (věřil, že kvantová mechanika bude jednotnou teorií překonána, proto není třeba kvanta už od začátku začleňovat), jeho práce opominula i další dvě síly, objevené experimentálně: *silnou jadernou sílu* a *slabou jadernou sílu*. Ta první poskytuje silné lepidlo, které drží atomová jádra pohromadě, ta druhá je kromě jiného zodpovědná za radioaktivní rozpad. Sjednocení by tedy muselo skloubit nejen dvě, ale hned čtyři síly; Einsteinův sen se zdál ještě vzdálenější.

Situace se obrátila na sklonku šedesátých let a v sedmdesátých letech. Tehdy si fyzici uvědomili, že metody kvantové teorie pole, kterou dříve úspěšně aplikovali na elektromagnetickou sílu, nabízejí i popis slabé a silné jaderné

síly. Všechny tři negravitační síly tedy bylo možné popsat stejným matematickým jazykem. Podrobné analýzy těchto teorií – zvláště ty v člancích Sheldona Glashowa, Stevena Weinberga a Abduse Salama, pozdějších nobelovských laureátů, jakož i pozdější poznatky Glashowa a jeho harvardského kolegy Howarda Georgiho – odkryly vztahy naznačující možnou jednotu elektromagnetické, slabé a silné jaderné síly. Po Einsteinově vzoru teoretici o téměř půlstoletí později tvrdili, že tyto tři zdánlivě odlišné síly mohou ve skutečnosti být projevy jediné, monolitické síly přírody.²

Byly to úctyhodné kroky ke sjednocení, ale v popředí optimistického plánu fyziků se tyčil jeden mrzutý problém. Když vědci aplikovali metody kvantové teorie pole i na čtvrtou sílu přírody, gravitaci, matematika jim prostě přestala fungovat. Výpočty obsahující jak kvantovou mechaniku, tak Einsteinův obecněrelativistický popis gravitačního pole končily skřípavými výsledky, jakousi nesmyslnou matematickou hatmatilkou. Přes úspěchy kvantové mechaniky a obecné teorie relativity v jejich přirozených sférách vlivu, tedy v říši malého a velkého, obnažoval podivný produkt vzešlý ze snahy o jejich sjednocení hlubokou trhlinu v našem chápání přírodních zákonů. Ukáže-li se, že zákony, které jste shromáždili, jsou vzájemně neslučitelné, potom – očividně – tyto zákony nemohou být správné. Sjednocení bývalo úkolem podloženým jen esteticky; teď se však stalo logickou nezbytností.

Polovina osmdesátých let přinesla další stěžejní pokrok. Tehdy pozornost světových fyziků přitáhl nový přístup, *teorie superstrun*. Ten utlumil nepřátelství mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou a oživil tak naději, že gravitaci lze vtěsnat pod sjednocený kvantověmechanický deštník. Započala éra superstrunového sjednocování. Výzkum probíhal v intenzivním tempu a tisíce stránek odborných časopisů rychle zaplnily výpočty, které daly reálnou tvář mnohým aspektům tohoto přístupu a vystavěly základy pro jeho systematickou formulaci. Vynořila se působivá a spleťtá matematická struktura, ale řada vlastností teorie superstrun (nebo krátce *teorie strun*) zůstala zahalena tajemstvím.³

V polovině devadesátých let však začali teoretici, kteří usilovali o vyjasnění tohoto tajemství, přicházet s výsledky, jež ze strunové teorie udělaly jednoho z hlavních hrdinů vyprávění o multivesmíru. Badatelé už dlouho věděli, že se matematické metody uplatňované při rozboru teorie strun dovolávají řady aproximací, a proto jsou zralé k náhradě metodami ušlechtlejšími. Jakmile se některá z těchto vylepšení stala realitou, uvědomili si fyzici, že matematika otevřeně naznačuje, že náš vesmír by mohl být součástí multivesmíru. Matematika strunové teorie fakticky vypovídala o tom, že náš vesmír by mohl být částí nejen jednoho druhu multivesmíru, ale multivesmírů mnoha druhů.

Abychom zcela tyto přesvědčivé, ale spory vyvolávající poznatky pochopili a seriózně ocenili jejich úlohu v našem pokračujícím hledání hlubokých zákonů kosmu, musíme se vrátit o něco zpět a nejdříve vyhodnotit současný stav teorie strun.

Staronový pohled na kvantovou teorii pole

Začněme s pečlivější analýzou tradičního, velmi úspěšného rámce kvantové teorie pole. Tím se připravíme na strunové sjednocení a zvýrazníme tak i zásadní souvislosti mezi těmito dvěma přístupy k formulování přírodních zákonů.

Klasická fyzika, jak jsme viděli v 3. kapitole, popisuje pole jako druh mlhy, která prostupuje určitou oblastí prostoru a která může být nosičem poruch – vln a zčeření. Kdyby měl například Maxwell popsat světlo, které teď osvětluje tento text, asi by pookřál zaníceným výkladem o elektromagnetických vlnách, které produkuje Slunce i nedaleká žárovka a které se linou prostorem na své cestě k potištné stránce. Popsal by pohyb vln matematicky, čísly určujícími sílu a směr pole v každém bodě prostoru. Vlnící se pole odpovídá vlnícím se číslům: číselná hodnota pole v každé oblasti prostoru pravidelně roste a zase klesá.

Vztáhneme-li principy kvantové mechaniky na pojem pole, dospějeme ke kvantové teorii pole, teorii charakterizované dvěma novými podstatnými rysy. Už jsme se s oběma setkali, ale zaslouží si, abychom si je osvěžili. Zaprvé, kvantová neurčitost způsobuje, že se hodnota pole v každém bodě prostoru náhodně chvěje – vzpomeňte si na inflatonové pole v inflační kosmologii. Zadruhé, kvantová mechanika ukazuje, že pole lze rozdělit na nekonečně malé částice známé jako *kvanta* pole v podobném smyslu, v jakém je voda složena z molekul H_2O . Kvanty elektromagnetického pole jsou fotony, a tak by kvantový teoretik Maxwellův klasický popis žárovky pozměnil – řekl by, že žárovka vysílá rovnoměrný proud částic čítající 100 miliard miliard fotonů za sekundu.

Desítky let výzkumu prokázaly, že tyto vlastnosti kvantové mechaniky aplikované na pole mají zcela univerzální platnost. Každé pole je podrobena kvantovému chvění. A každé pole je spojeno s určitým druhem částice. Elektrony jsou kvanta elektronového pole. Kvarky jsou kvanta kvarkového pole. Aby si fyzici toto spojení nějak přiblížili, představují si občas částice jako uzly nebo husté hrudky v polích s nimi spojených. Nehledě na tuto vizuální pomůcku popisuje kvantová teorie pole tyto částice jako tečky nebo body, které nezabírají žádný objem a nemají žádnou vnitřní strukturu.⁴

Naši důvěru v kvantovou teorii pole podporuje jeden podstatný fakt: neexistuje jediný experimentální výsledek, který by se přičil jejím předpovědím. Naopak – měřená data potvrzují, že rovnice kvantové teorie zachycují chování částic s ohromující přesností. Nejpůsobivější příklad nabízí kvantová teorie pole pro elektromagnetickou sílu, *kvantová elektrodynamika*. S její pomocí fyzici provedli podrobné výpočty magnetických vlastností elektronu. Výpočty to nebyly nijak snadné, jejich nejpropracovanější verze zabraly fyzikům desítky let. Ale stály za to. Jejich výsledky se shodují s opravdovými měřeními na více než *deset* platných číslic, což znamená téměř nepředstavitelný souhlas teorie s experimentem.

Po takovém úspěchu byste mohli očekávat, že kvantová teorie pole poskytne matematický rámec pro porozumění všem silám v přírodě. A právě to skupinka slavných fyziků také očekávala. Ke konci sedmdesátých let už měli tito vizionáři za sebou práci, z níž vyplynulo, že silná i slabá jaderná síla skutečně bez problémů zapadnou pod společný deštník kvantové teorie pole. Obě síly lze přesně popsat v řeči polí – silných a slabých jaderných polí –, které se vyvíjejí a působí na sebe navzájem podle matematických pravidel kvantové teorie pole.

Ale jak jsem upozorňoval ve svém shrnutí historie, právě část této skupiny fyziků si rychle uvědomila i to, že se zbývající silou v přírodě, s gravitací, to bude mnohem složitější. Kdykoli se rovnice obecné relativity smísily s těmi z kvantové teorie, matematika se zadrhla. Použijte kombinované rovnice k výpočtu kvantové pravděpodobnosti nějakého fyzikálního procesu – jako třeba šance, že se dva elektrony od sebe odrazí, přičemž chcete započítat jak jejich elektromagnetické odpuzování, tak i gravitační přitahování –, a většinou se dočkáte odpovědi *nekonečno*. Zatímco některé veličiny ve vesmíru, například objem prostoru a množství hmoty, která ho může vyplňovat, mohou být nekonečné, pravděpodobnosti takovými veličinami nejsou. Podle definice musí velikost pravděpodobnosti ležet mezi 0 a 1 (nebo mezi 0 % a 100 %). Nekonečná pravděpodobnost neznamená, že se něco dost možná nebo určitě stane; je to stejný nesmysl, jako kdybychom mluvili o třináctém měsíci v roce. Nekonečná pravděpodobnost nám posílá jasný matematický vzkaz: kombinované rovnice jsou nesmysl.

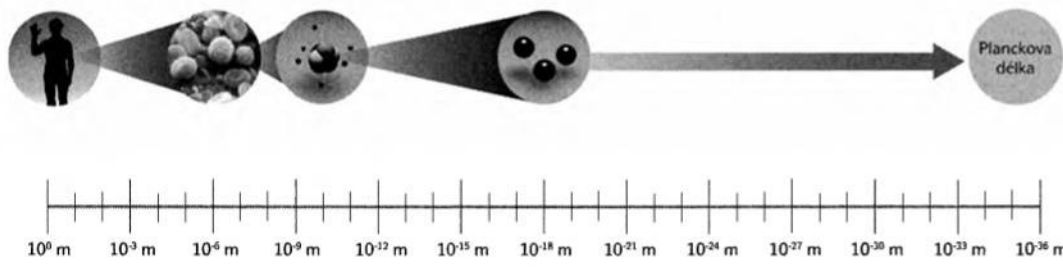
Fyzici vystopovali, že tento problém vyvěrá z chvění vyžadovaného kvantovou neurčitostí. Vyvinuli matematické metody k rozboru vibrací silných, slabých a elektromagnetických polí, ale když stejné metody aplikovali na pole gravitační – pole, které řídí zakřivení časoprostoru samotného –, zjistili, že nefungují. Proto zůstala matematika nasáknuta takovými protimluvy, jakými nekonečné pravděpodobnosti jsou.

Abyste pochopili, proč tomu tak je, představte si, že vlastníte starý dům v San Francisku. Občas může být pro vás těžké zpacifikovat některé z nájemníků, kteří pořádají divoké večírky, ale nemusíte se bát, že jejich veselí naruší strukturální celistvost nemovitosti. V případě zemětřesení ovšem čelíte něčemu mnohem vážnějšímu. Fluktuační tří negravitačních sil – polí, která jsou nájemníky v domě zvaném časoprostor –, se podobají chronickým pořadatelům mejdanů ve vašem domě. S jejich halasnými vibracemi muselo zápasit celé pokolení teoretických fyziků, než v sedmdesátých letech dokončili práce na matematických metodách schopných popsat kvantové vlastnosti negravitačních sil. Fluktuační gravitačního pole se ovšem od těch negravitačních kvalitativně liší. Podobají se spíše zemětřesení. Protože je gravitační pole všito do tkaniny samotného časoprostoru, jeho kvantové chvění otřásá celou struk-

turou skrz naskrz. Při snaze analyzovat takové vše prostupující vibrace matematické metody zkolabovaly.⁵

Celá léta fyzici od toho problému odvraceli zrak, protože vyplave na povrch pouze za nejextrémnějších podmínek. Gravitace nabývá na důležitosti u objektů velmi hmotných, kdežto kvantová mechanika je podstatná pro objekty titěrné. K vzácnostem patří objekty jak malinké, tak velmi těžké – a proto k popisu vyžadují obecnou relativitu i kvantovou mechaniku. Přesto jejich příklady najdeme. Když kvantovou mechaniku a gravitaci zkombinujeme, abychom si s nimi posvětili na velký třesk nebo na černé díry, tedy na situace, v nichž jsou extrémní hmotnosti stlačeny do malého prostoru, matematika se v kritickém bodě rozboru rozpadne a ponechá bez odpovědi naše otázky o tom, jak se zrodil vesmír a jak může končit v drtícím středu černé díry.

Navíc – a tohle fyziky opravdu od problému odradilo – lze kromě obecných příkladů černých děr a velkého třesku spočítat, jak těžký a jak malý musí fyzikální systém být, aby podstatnou roli hrála gravitace i kvantová mechanika. Dospěli k výsledku, že asi 10^{19} násobná hmotnost jednoho protonu, takzvaná *Planckova hmotnost*, musí být stlačena do objemu asi 10^{-105} krychlového metru (přibližně do koule o poloměru 10^{-35} metru, do takzvané *Planckovy délky*, graficky znázorněné obrázkem dole).⁶ Kvantová gravitace se tedy ujímá vlády až v podmínkách, které jsou milion miliardkrát extrémnější než ty, které můžeme zkoumat i s nejvýkonnějšími urychlovači dnešního světa. Takto obrovitá rozloha nezmapovaného území by mohla být poseta novými poli a jejich odpovídajícími částicemi – a kdoví čím ještě. Sjedení gravitace s kvantovou mechanikou vyžaduje výpravu z říše běžných energií do světa energií extrémních, při níž pochopíme známé i neznámé děje ze širokého rozsahu možných vzdáleností a energií, intervalu, jehož většina je experimentálně nedostupná. Tento nesmírně ambiciózní plán mnozí vědci považovali za nedosažitelný.



Planckova délka, kde gravitace a kvantová mechanika stojí tvář v tvář, je asi 100 milionů miliardkrát (10^{17}) kratší než libovolná oblast, která byla zkoumána experimentálně. Každá dlouhá svislá čára značí 1 000násobný pokles velikosti; proto se graf vejde na list papíru, ale vizuálně se tím bagatelizuje obrovský interval měřitek. Abyste se lépe vcítili do situace, představte si, že zvětšíte-li atom do velikosti pozorovatelného vesmíru, natáhne stejné zvětšení Planckovu délku pouze do výšky průměrného stromu.

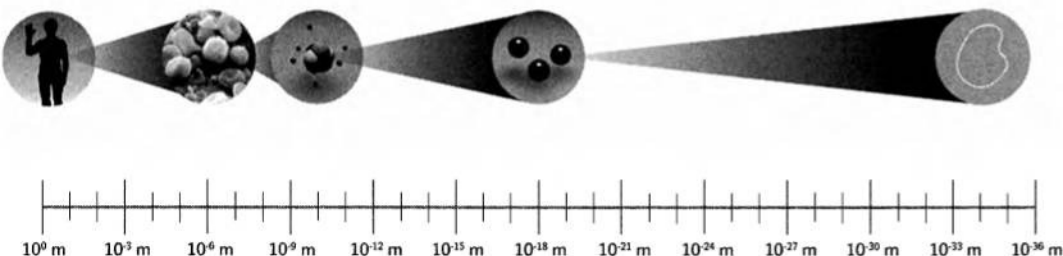
Snadno tedy pochopíte to překvapení i skepsi, které panovaly v polovině osmdesátých let, když začaly kolovat zvěsti o zásadním teoretickém pokroku na cestě k sjednocení, který vzešel z přístupu známého jako strunová teorie.

Teorie strun

Ačkoli je strunová teorie pověstná svou odstrašující obtížností, její základní myšlenku není těžké pochopit. Viděli jsme, že standardní pohled na svět před touto teorií považoval za základní stavební kameny přírody bodové částice – tečky bez vnitřní struktury – řídicí se rovnicemi kvantové teorie pole. Každý nový druh částice je spojen s novým druhem pole. Teorie strun tyto předpoklady zpochybňuje tvrzením, že částice nejsou body, ale spíše drobná vlákna připomínající struny (jako na obrázku dole). Když se dobře podíváte na libovolnou částici dříve považovanou za elementární, nakonec podle strunové teorie uvnitř spatříte vibrující strunu. Pohleďte do hloubi elektronu, a najdete tam strunu; nakoukněte dovnitř kvarku, a naleznete zase strunu.

Kdybyste mohli provádět stále přesnější měření, nakonec si podle teorie všimnete, že struny uvnitř různých druhů částic jsou totožné – to je vůdčí motiv strunového sjednocení –, ale vibrují podle různých šablon. Elektron je lehčí než kvark a to podle teorie strun znamená, že struna v elektronu vibruje méně energicky než struna v kvarku (to znovu odráží ekvivalenci energie a hmotnosti vtělenou do rovnice $E = mc^2$). Elektron také nese elektrický náboj, jehož velikost převyšuje náboj kvarku, a tuto odlišnost lze přeložit do dalších, jemnějších rozdílů mezi vibračními pohyby strun v obou částicích. Stejně jako různé vibrační pohyby strun na kytarě vyluzují různé tóny, vedou odlišné vibrace vláken v teorii strun k různým vlastnostem částic.

Teorie nás v podstatě přivádí k představě, že vibrující struny nejenže dikují vlastnosti, které má mít hostitelská částice, ale že struny samotné jsou čas-



Podle strunové teorie jsou fundamentálními stavebními kameny hmoty, které začnou být viditelné na Planckově škále, vlákna připomínající struny. Kvůli omezenému rozlišení našich přístrojů se nám tyto struny jeví jako body.

tice. Vzhledem k miniaturní velikosti struny – řádově 10^{-35} metru – neumějí ani dnešní nejpokročilejší experimenty rozlišit nebudovou strukturu strun. Velký hadronový srážec (LHC), který sráží částice s energiemi asi desettisíckrát převyšujícími klidovou energii protonu, může analyzovat vzdálenosti až do 10^{-21} metru; to je délka rovná miliontině miliardtiny tloušťky vlasu, ale stále o mnoho řádů *větší* než vzdálenosti srovnatelné s Planckovou délkou, kde se podle strunové teorie odehrávají nové jevy. Stejně jako Země vypadá při pohledu z Pluta jako tečka, i struny, třebaže je studujeme s nejdokonalejším částicovým urychlovačem dnešního světa, vypadají jako body. Nicméně podle teorie strun částice *jsou* struny.

To je strunová teorie v kostce.

Struny, body a kvantová gravitace

Teorie strun má řadu dalších podstatných vlastností a proměny, jimiž prošla od té doby, co byla poprvé navržena, významně obohatily popis částic v řeci základních faktů, které jsem zatím nastínil. Ve zbytku této kapitoly (ale i v 5., 6. a 9. kapitole) se dozvíte něco o nejvýznamnějších výsledcích v oboru, nejdříve však musím zdůraznit tři obecně platné poznámky.

Zaprvé, když fyzik navrhne model přírody založený na kvantové teorii pole, musí uvést, která pole bude obsahovat. Při výběru jsou jeho vodítky experimentální omezení (každý známý druh částice fyzikovi předpisuje začlenit odpovídající kvantové pole) i teoretické ohledy (hypotetické částice a s nimi spojená pole, jako je inflatonové a Higgsovo pole, jsou zavedeny proto, aby vyřešily otevřené problémy nebo vyjasnily matoucí záležitosti). Nejdůležitějším příkladem je *standardní model*, pro svou schopnost přesně popsat hojnost dat nasbíraných částicovými urychlovači po celém světě považovaný za vrcholný výdobytek částicové fyziky 20. století, který obsahuje *padesát sedm* různých kvantových polí (pole odpovídající elektronu, neutrinu, fotonu, různým druhům kvarků – kvarku up, kvarku down, kvarku charm a tak dále). Standardní model je nepopíratelně nesmírně úspěšný, ale mnozí z fyziků cítí, že skutečně fundamentální popis vesmíru by neměl vyžadovat takto těžkopádný sortiment ingrediencí.

Vzrušujícím rysem strunové teorie je, že se částice vynořují z teorie samotné: různé druhy částic mají původ v různých šablonách vibračního pohybu strun. A protože každý druh vibrace určuje vlastnosti odpovídající částice, má teorie strun kapacitu vysvětlit *všechny* vlastnosti *všech* částic. Má tedy potenciál a vzbuzuje naděje, že předčí kvantovou teorii pole tím, že všechny vlastnosti částic odvodí matematicky. Nejenže by se tím úplně všechno dostalo pod sjednocující deštník vibrujících strun, ale také by to zaručilo, že všechna budoucí „překvapení“ – třeba objev nějakého momentálně neznámého druhu částice – budou od počátku do teorie strun zabudována a budou

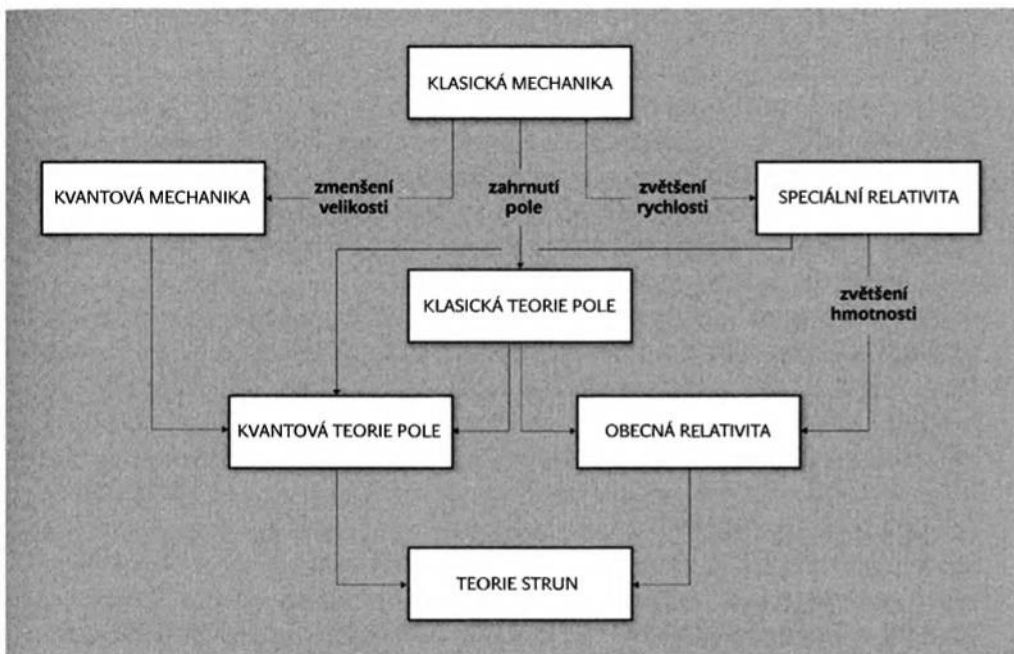
v principu přístupná prostřednictvím dostatečně trpělivého výpočtu. Strunová teorie neskládá stále úplnější popis přírody kousek po kousku, hledá úplný popis všeho od samého počátku.

Zadruhé, mezi možnými vibracemi struny je jedna, kterou přesné vlastnosti předurčují k tomu, stát se kvantovou částicí gravitačního pole. Ačkoli se teoretické pokusy spojit gravitaci a kvantovou mechaniku před strunovou teorií nesetkaly s úspěchem, výzkum byl schopen odhalit vlastnosti, které musí hypotetická částice spojená s kvantovým gravitačním polem – *graviton* – mít. Práce vedly k závěru, že graviton musí být nehmotný a elektricky neutrální a musí mít kvantověmechanickou vlastnost známou jako *spin 2*. (Velmi zhruba by se graviton měl otáčet kolem osy jako setrvačnický, a to dvakrát rychleji než foton.)⁷ Jedni z prvních teoretiků strun – John Schwarz, Joël Scherk a nezávisle na nich i Tamiaki Yoneya – překvapivě zjistili něco pozoruhodného: že totiž na seznamu možných vibrací struny byla jedna, jejíž vlastnosti se shodovaly s gravitonem. A to přesně. Když byly v polovině osmdesátých let předloženy přesvědčivé argumenty, že teorie strun je matematicky konzistentní kvantověmechanickou teorií (zejména v pracích Johna Schwarze a jeho spolupracovníka Michaela Greena), z přítomnosti gravitonů plynulo, že *strunová teorie je tou dlouho hledanou kvantovou teorií gravitace*. To je ten vůbec největší úspěch v životopisu teorie strun a hlavní důvod, proč rychle zaujala prominentní postavení ve světové vědě.^{*8}

Zatřetí, jakkoli radikálním návrhem strunová teorie je, vyvíjela se podle ctěného scénáře z učebnic dějin vědy. Úspěšné teorie většinou nepošlou své předchůdkyně coby zastaralé myšlenky na skládku, přijmou spíše své předchůdkyně za své, přičemž zásadně rozšíří paletu fyzikálních jevů, které lze přesně popsat. Speciální teorie relativity rozšiřuje naše chápání do říše vysokých rychlostí; obecná teorie relativity nám dovoluje postoupit ještě dále, do říše obrovských hmotností (domény silných gravitačních polí); kvantová mechanika a kvantová teorie pole rozšiřují chápání fyziky do říše nepatrných vzdáleností. Pojmy, které tyto teorie zavádějí, a nové jevy, které odhalují, se nepodobají ničemu z minulosti. Přesto když se tyto teorie aplikují na obvyklé situace s běžnými rychlostmi, velikostmi a hmotnostmi, redukují se na popis vypracovaný před začátkem 20. století – na Newtonovu klasickou mechaniku, klasickou teorii pole Faradaye a Maxwella a dalších.

* Chcete-li se seznámit s tím, jak strunová teorie překonává potíže, které mařily starší pokusy spojit gravitaci s kvantovou mechanikou, nahlédněte do 6. kapitoly *Elegantního vesmíru*; stručný přehled nabízí poznámka 8. Spokojíte-li se s ještě kratším shrnutím, pak si všimněte, že zatímco bodová částice se nachází v jediném bodě, struna je kvůli své délce trochu rozprostřena po prostoru. Toto její rozprostření následně zředí divoké kvantové vibrace na krátkých vzdálenostech, které byly překážkou při předchozích pokusech. Na sklonku osmdesátých let už řada pádných argumentů podporovala názor, že teorie strun úspěšně skloubí obecnou relativitu s kvantovou mechanikou; ještě novější poznatky (9. kapitola) odstranily poslední pochyby o tomto úspěšném spojení.

Strunová teorie je potenciálně dalším a možná i posledním krokem v tomto vývoji. V *jediném* rámci je schopna se vypořádat s relativitou i kvanty. Navíc – a měli byste se posadit, chcete-li si tuto větu vyslechnout do konce – tak činí způsobem, který zahrnuje všechny objevy učiněné před jejím zrodem. Teorie založená na vibrujících vláknech nemá zdánlivě moc společného s portrétem gravitace podle obecné teorie relativity, který se odvíjí od zakřiveného prostoru. Nicméně když aplikujete matematiku strunové teorie na situaci, v níž gravitace hraje roli, zato kvantová mechanika ne (na hmotný objekt, jako je Slunce, jehož rozměry jsou veliké), vyskočí na vás Einsteinovy rovnice. Vibrující vlákna se od bodových částic liší. Ale kdykoli aplikujete matematiku teorie strun na situaci, v níž záleží na kvantové mechanice, ale ne na gravitaci (na malou skupinku strun, které nevibrují s příliš vysokou frekvencí, nepohybují se nijak rychle a nenatahují se příliš daleko; mají nízkou energii – nebo ekvivalentně nízkou hmotnost –, takže gravitace nehraje téměř žádnou roli), matematika strunové teorie dokonale napodobí matematiku kvantové teorie pole.



Grafické znázornění vztahů mezi hlavními paradigmaty teoretické fyziky. Úspěšné nové teorie v historii rozšiřovaly oblast platnosti svých předchůdkyň (na vyšší rychlosti, větší hmotnosti, kratší vzdálenosti), zatímco dokonale navazovaly na starší teorie, pokud byly aplikovány na méně extrémní fyzikální podmínky. Strunová teorie se tomuto scénáři pokroku nezpronevřuje: rozšiřuje oblast platnosti předchozích teorií, přičemž se v méně extrémních podmínkách redukuje na obecnou relativitu a kvantovou teorii pole.

To názorně shrnuje schéma na straně 81, v němž jsou zaznamenány logické souvislosti mezi hlavními teoriemi, jež fyzici vyvinuli od Newtonových dob. Teorie strun mohla vyžadovat kvalitativní, tlustou čáru za minulostí. Mohla se postavit mimo graf zachycený v tomto obrázku. Ale kupodivu se tak nestalo. Je totiž natolik revoluční, že překročila bariéry, které omezovaly fyziku 20. století, zároveň je ale natolik konzervativní, že bez potíží absorbovala všechny objevy za poslední tři staletí.

Prostorové rozměry

A teď se podívejme na něco podivnějšího. Přechod od bodů k vláknům je jen částí inovací, které teorie strun zavádí. V raných dnech této teorie se fyzici setkávali se zkázonosnými matematickými vadami (*kvantovými anomáliemi*), které s sebou přinášely takové nepřijatelné procesy, jako je samovolný vznik nebo zánik energie. Pokud podobné problémy navrženou teorii postihnou, fyzici obvykle reagují hbitě a zostra. Teorii zahodí do koše. A opravdu, mnoho lidí si v sedmdesátých letech myslelo, že právě takto je třeba se se strunami vypořádat. Jen malá hrstka badatelů vytrvala a ukázala, že je možný i jiný přístup.

Učinili totiž oslňující objev – zjistili, že problematické vlastnosti teorie byly spojeny s počtem prostorových rozměrů. Jejich výpočty odhalily, že kdyby měl vesmír více než jen tři rozměry, s nimiž se každodenně setkáváme – více než obvyklé rozměry zleva vpravo, zezadu dopředu a shora dolů –, potom je možné rovnice teorie strun od problematických kazů očistit. Konkrétně ve vesmíru s devíti rozměry prostoru a s jedním rozměrem času lze rovnice strunové teorie zbavit všech problémů.

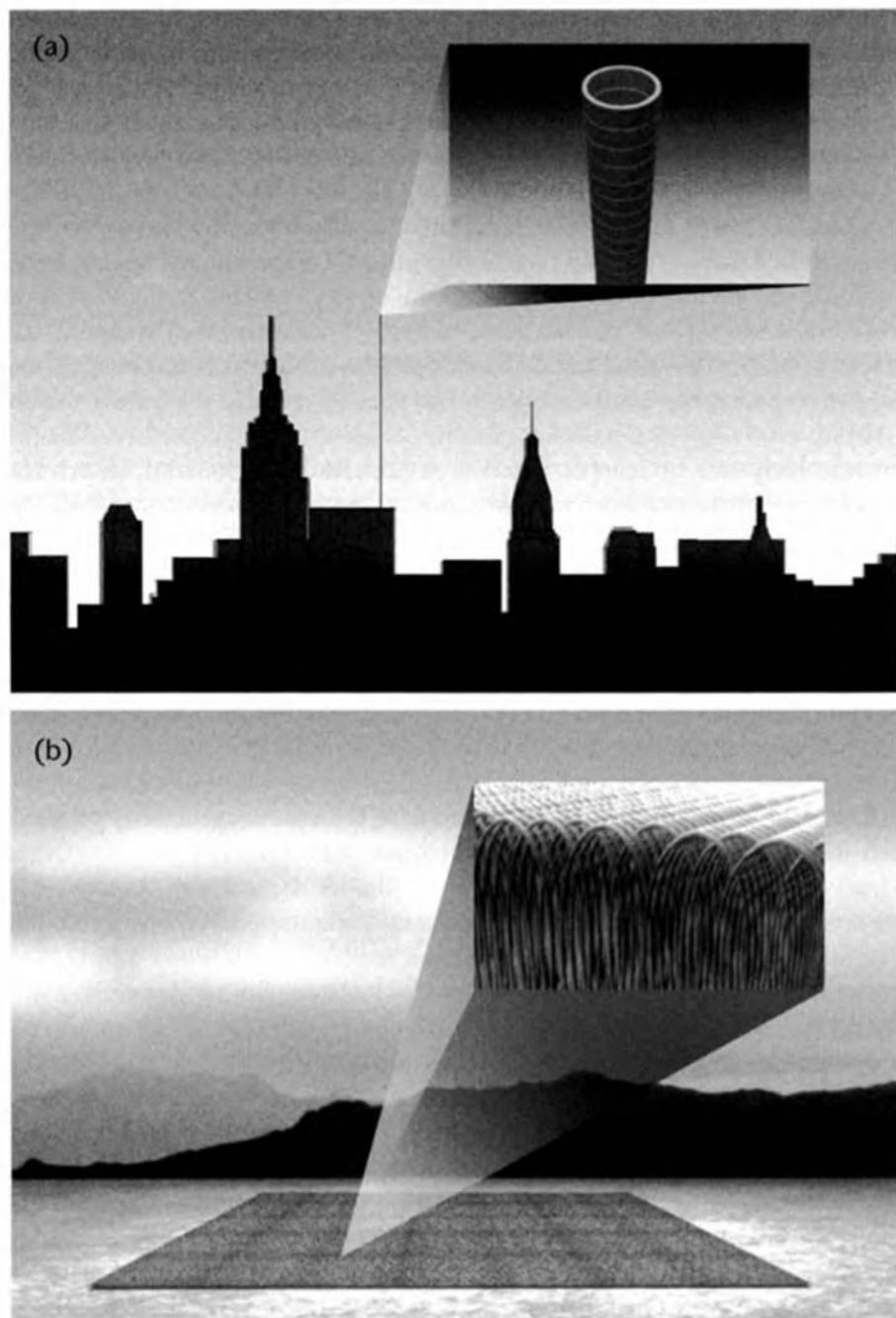
Byl bych moc rád, kdybych uměl laickým jazykem vysvětlit, proč tomu tak je, ale já to nedokážu a nikdy jsem ani nepotkal nikoho, kdo by to dovedl. Pokusil jsem se o to v *Elegantním vesmíru*, ale tam jsem jen v obecných rysech nastínil, jak počet rozměrů ovlivňuje vlastnosti strunových vibrací, neukázal však, odkud se bere specifické číslo deset. Přesto nabídnu krátké matematické shrnutí i zde. Jedna rovnice ve strunové teorii obsahuje příspěvek tvaru $(D-10)$ krát (*průšvih*), kde D představuje počet rozměrů časoprostoru a *průšvih* je matematický výraz, který vede k jevům způsobujícím nesnáze, například k narušení zákona zachování energie zmíněného před okamžikem. Ptáte-li se, proč má rovnice přesně tento tvar, pak vám bohužel žádné jednoduché a srozumitelné vysvětlení bez složité matematiky nabídnout nemůžu. Klíčovým postřehem ale je, že má-li časoprostor deset rozměrů a nikoli čtyři, jak bychom mohli očekávat, příspěvek se rovná nulakrát *průšvih*. A protože nulakrát cokoli je nula, problém se ve vesmíru s deseti rozměry časoprostoru vypoří. K takovému závěru matematika nakonec vede. Opravdu. A proto také strunoví teoretici vesmír s více než čtyřmi rozměry časoprostoru obhajují.

Navzdory tomu se vám možnost dodatečných prostorových rozměrů, jestliže jste se s ní nikdy nesetkali, bude zdát bláznivá, a to nehledě na vaše odhodlání následovat matematiku, kamkoli nás chce zavést. Prostorové rozměry nemohou zmizet jako klíčky od auta nebo jako jedna z vašeho oblíbeného páru ponožek. Kdyby měl vesmír více než délku, šířku a výšku, určitě by si toho už někdo všiml. Kupodivu však nemusel. Dokonce už na začátku 20. století se v sérii vizionářských článků německého matematika Theodora Kaluzy a švédského fyzika Oskara Kleina objevila originální myšlenka, že mohou existovat rozměry, které se před našimi zraky dokážou šikovně ukrývat. Práce obou ukázala, že na rozdíl od obvyklých prostorových rozměrů, které se rozpínají přes velké a snad i nekonečné vzdálenosti, mohou existovat i takové rozměry, které můžeme jen těžko spatřit, tak jsou malinké a svinuté.

Abyste něco takového mohli pochopit, představte si obyčejné brčko na pití. Pro naše účely však bude lepší, když mu ponecháme jeho tloušťku, ale odvážně ho protáhneme do stejné výšky, jakou má mrakodrap Empire State Building. Povrch tohoto dlouhého brčka má (jako povrch všech brček) dva rozměry. Jedním je dlouhý svislý rozměr, druhým krátký kruhový rozměr obtáčející se kolem brčka. A teď si představte, že se na brčko díváte z druhého břehu řeky Hudson (jako na obrázku *a* na straně 84). Protože je brčko tak tenké, vypadá jako svislá čára táhnoucí se od země až k nebesům. Protože jste od něho tak daleko, chybí vašemu zraku dostatečná ostrost, aby zachytil jeho malinký kruhový rozměr, ačkoli existuje v každém bodě podél jeho svislé délky. Proto chybně usoudíte, že povrch brčka je jednorozměrný, nikoli dvourozměrný.⁹

Další vizuální pomůcku nám poskytne obří koberec rozprostřený po slanis-kách ve státě Utah. Z letadla koberec vypadá jako plochý povrch se dvěma rozměry, které se rozprostírají od severu k jihu a od východu k západu. Snete-li se však padákem dolů a prohlédnete-li si koberec zblízka, uvědomíte si, že je jeho povrch utkáno z husté příze: ke každému bodu podkladu koberce jsou navázány drobné bavlněné smyčky. Koberec má teď dva velké a dobře viditelné rozměry (sever/jih a východ/západ), ale navíc i jeden malý rozměr (kruhové smyčky), který je těžší zpozorovat (obrázek *b* na straně 84).

Kaluza s Kleinem přišli s myšlenkou, že podobný rozdíl mezi velkými a snadno viditelnými rozměry a drobnými a skrytými rozměry může existovat i v případě tkaniny samotného prostoru. Důvodem, proč jsme si všichni vědomi obvyklých tří rozměrů prostoru, by pak byla jejich obrovská (a snad i nekonečná) velikost, analogická výšce brčka nebo vodorovnému severo-j jižnímu a východo-západnímu rozměru koberce. Kdyby byl ovšem dodatečný rozměr prostoru svinutý jako kruhový obvod brčka nebo jako smyčky v koberci, ale do mimořádně nepatrných rozměrů – milionkrát nebo miliardkrát menších než atom –, mohl by být stejně všudypřítomný jako známé rozprostírající se rozměry, a přesto by mohl zůstat za hranicemi detekčních možností našich nejsilnějších zvětšovacího zařízení. Takové rozměry by se opravdu mohly ztratit.



(a) Povrch vysokého brčka má dva rozměry: svislý rozměr je dlouhý a dobře viditelný, zatímco kruhový rozměr je drobný a je ho těžší spatřit. **(b)** Gigantický koberec má tři rozměry; severo-jihní a východo-západní rozměry jsou velké a dobře viditelné, zatímco kruhový rozměr, přízi koberce, je těžší zaregistrovat, protože je malý.

Taková byla *Kaluzova-Kleinova teorie*, tvrzení, že náš vesmír má kromě těch tří rozměrů, které známe z běžného života, i rozměry další (obrázek na straně 86).

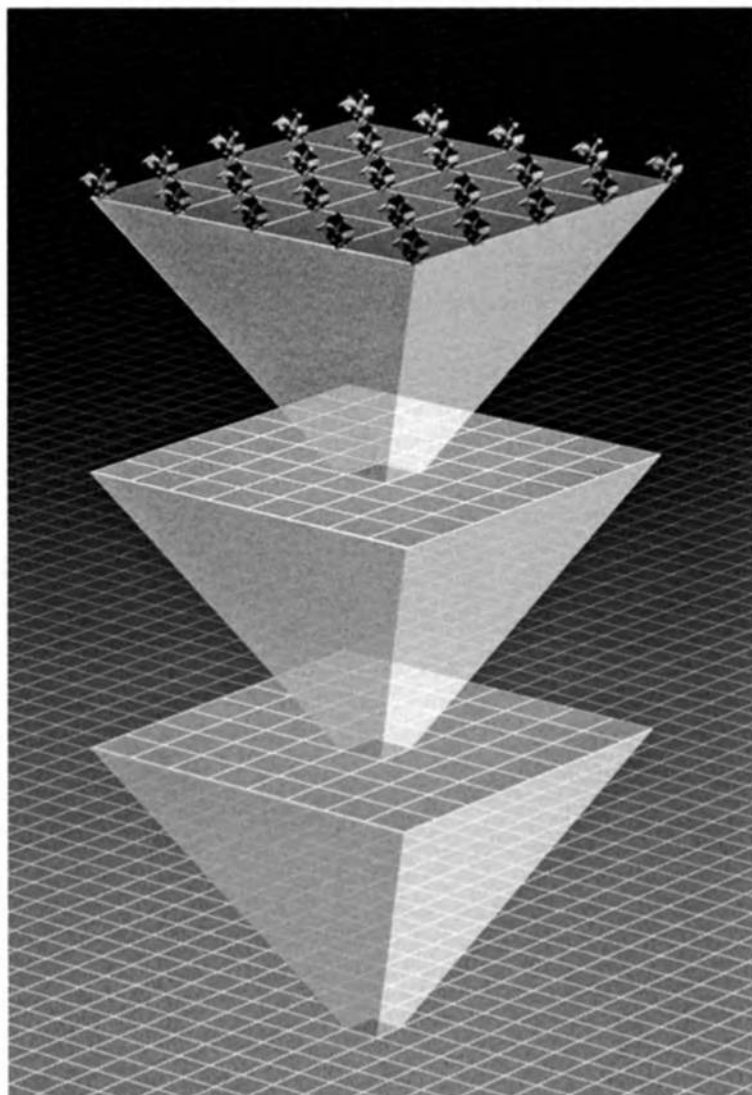
Tímto řetězcem úvah bylo dokázáno, že představa existence „extra“ rozměrů prostoru, jakkoli neobvykle zní, není vůbec absurdní. To je dobrý začátek, ale svádí k podstatné otázce: Proč by se někdo ve dvacátých letech minulého století uchyloval k podobně exotické myšlence? Kaluza byl motivován poznatkem, k němuž dospěl krátce poté, co Einstein publikoval obecnou teorii relativity. Zjistil, že jediným tahem pera – doslova – mohl Einsteinovy rovnice pozměnit tak, aby se jimi řídil i vesmír s jedním dodatečným rozměrem. A když tyto pozměněné rovnice rozebral, dospěl k výsledkům natolik senzačním, že (podle vyprávění jeho syna) zapomněl na své obvyklé rezervované chování, oběma rukama praštil do stolu, prudce se postavil a zapěl árii z *Figarovy svatby*.¹⁰ V pozměněných rovnicích našel rovnice, jimiž Einstein už dříve popsal gravitaci v obvyklých třech prostorových rozměrech a v jednom rozměru časovém. Ale protože jeho nová formulace obsahovala dodatečný rozměr prostoru, našel Kaluza i dodatečnou rovnici. *Podíval se, a ejhle, v rovnici rozpoznal přesně tu, jíž Maxwell o půl století dříve popsal elektromagnetické pole.*

Kaluza ukázal, že ve vesmíru s dodatečným rozměrem lze gravitaci i elektromagnetismus vysvětlit jako zvlnění prostoru. Gravitace se projevuje vlnami ve směru dobře známých tří prostorových rozměrů, zatímco elektromagnetismus je spojen s vlnami ve směru rozměru čtvrtého. Kaluzova hypotéza okamžitě vyvolala naléhavou otázku: Proč tento čtvrtý rozměr nevidíme? Právě tady zanechal svou první stopu Klein. Přišel s vysvětlením, jež jsme už zmínili: že rozměry mimo těch, které běžně vnímáme, mohou, jsou-li dostatečně malé, unikat našim smyslům i našim přístrojům.

V roce 1919, když se o programu sjednocení s dodatečnými rozměry dozvěděl Einstein, zaváhal. Ohromila ho myšlenka, která fyziku posunovala blíže k jeho snu o sjednocení, ale zvláštnost tohoto přístupu ho odrazovala. Několik let rozvažoval – přičemž zabraňoval publikaci Kaluzova článku –, ale nakonec se mu myšlenka zalíbila a stal se jedním z nejvýraznějších zastánců skrytých prostorových rozměrů. Ve svém vlastním výzkumu sjednocení sil se k tomuto motivu opakovaně vracel.

Nehledě na Einsteinovo požehnání ukázal následný výzkum, že Kaluzův-Kleinův program naráží na řadu překážek, z nichž nejvýznamnější byla neschopnost modelu začlenit do své matematické struktury podrobné vlastnosti částic hmoty, například elektronů. Chytré způsoby, jak se tomuto problému vyhnout, jakož i různá zobecnění a obměny původního Kaluzova-Kleinova modelu byly rozpracovávány s přestávkami několik desítek let, ale protože fyzici neobjevili žádný způsob, jak se všem úskalím vyhnout, myšlenku sjednocení skrze dodatečné rozměry někdy v polovině čtyřicátých let víceméně opustili.

O třicet let později vstoupila na scénu teorie strun. Vesmír s více než třemi rozměry matematika strunové teorie nejen dovolovala, ona jej přímo *vyžadovala*.



Kaluza-Kleinova teorie předpokládá, že ke každému bodu v dobře známých třech rozměrech jsou připojeny drobné dodatečné rozměry. Pokud bychom mohli tkaninu prostoru pořádně zvětšit, domnělé dodatečné rozměry bychom spatřili. (Kvůli lepší názornosti jsou v kresbě dodatečné rozměry připojeny pouze k bodům ve čtvercové síti.)

Strunová teorie tak pro fyziku připravila nové jeviště, na němž bylo možné realizovat Kaluzův-Kleinův program. Na otázku „Proč jsme ještě požadované dodatečné rozměry neviděli, když je teorie strun dlouho hledanou jednotnou teorií?“ odpověděli už Kaluza a Klein: tyto rozměry se vyskytují všude kolem nás, ale jsou zkrátka natolik malé, že je vidět nemůžeme. Strunová teorie vzkří-

silu Kaluzův-Kleinův program a v polovině osmdesátých let byli badatelé po celém světě povzbuzeni k víře, že je jen otázkou času – a podle nejnadšenějších zastánců poměrně krátkého času –, než teorie strun poskytne úplnou teorii veškeré hmoty a všech sil.

Velká očekávání

V raných dnech strunové teorie docházelo k pokroku natolik rychlému, že bylo téměř nemožné si udržet kontakt se všemi novými výsledky. Mnozí tehdejší atmosféru srovnávali s dvacátými lety 20. století, kdy fyzici vzali útokem nově objevenou říši kvant. Při takovém vzrušení lze pochopit, že někteří teoretici mluvili o bleskovém rozřešení hlavních problémů teoretické fyziky: spojení gravitace s kvantovou mechanikou, sjednocení všech sil přírody, vysvětlění vlastností hmoty, určení počtu prostorových rozměrů, vyjasnění singularit černých děr a rozluštění původu vesmíru. Jak však ostřílenější badatelé očekávali, byla taková očekávání unáhlená. Teorie strun je předmět natolik bohatý, rozsáhlý a matematicky obtížný, že i dnes, téměř tři desetiletí po počáteční euforii, náš výzkum dovedl jen na začátek cesty k poznání. A poněvadž je říše kvantové gravitace asi 100 milionů miliardkrát kratší než cokoli, co dnes můžeme zkoumat experimentálně, střízlivé odhady mluví o tom, že to bude cesta opravdu dlouhá.

Kde se na této cestě dnes nacházíme? Ve zbytku kapitoly shrnu nejsoučasnější chápání několika klíčových oblastí (přičemž uschovám otázky týkající se tématu paralelních vesmírů na podrobnější výklad v následujících kapitolách) a zhodnotím dosavadní úspěchy a nevyřešené problémy.

Strunová teorie a vlastnosti částic

Jednou z nejhlubších otázek celé fyziky je, proč mají částice přírody takové vlastnosti, jaké mají. Proč má například elektron právě takovou hmotnost a kvark up má právě takový elektrický náboj? Tato otázka vyvolává pozornost nejen proto, že je zajímavá sama o sobě, ale i kvůli provokujícímu faktu, na který jsem už poukázal. Kdyby částice měly vlastnosti odlišné – kdyby byl například elektron o něco těžší či lehčí nebo kdyby elektrické odpuzování mezi elektrony bylo o něco silnější či slabší –, jaderné procesy, které pohánějí hvězdy, jako je naše Slunce, by byly narušeny nebo zastaveny. A bez hvězd by byl vesmír velmi odlišný.¹¹ Vyhroceněji řečeno, komplexní posloupnost událostí, které umožnily zrod života na Zemi, by nemohla nastat bez slunečního svitu a tepla.

To nás přivádí k velkému úkolu: s užitím pera, papíru, snad i počítače a nejlepšího chápání fyzikálních zákonů, které máme k dispozici, spočítat vlastnosti částic a ukázat, že se shodují s naměřenými hodnotami. Kdybychom tento

úkol uměli splnit, udělali bychom jeden z nejdůležitějších kroků všech dob vstříc porozumění, proč je vesmír takový, jaký je.

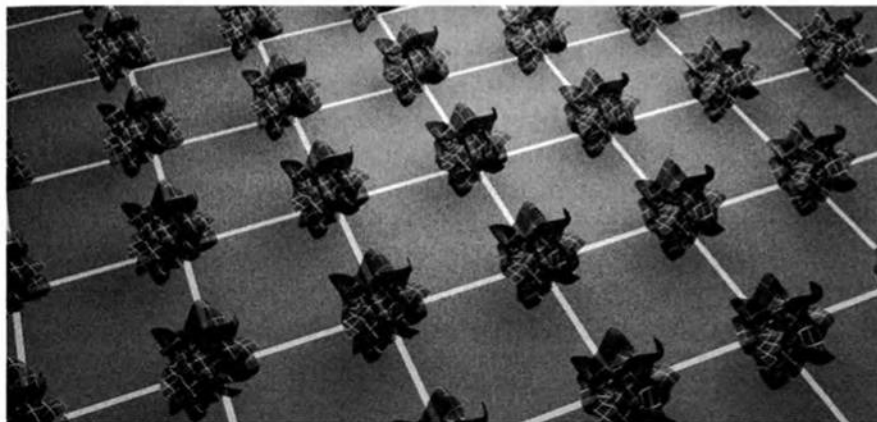
S kvantovou teorií pole tento vrchol zdolat nelze. A to ani v budoucnu. Kvantová teorie pole totiž vyžaduje, aby se měřené vlastnosti částic zadaly jako vstup – jsou to vlastnosti, které jsou součástí definice teorie –, a proto se může šťastně adaptovat na široký interval hmotností a nábojů.¹² S imaginárním světem, kde by byla hmotnost nebo náboj elektronu větší nebo menší než v našem, by se kvantová teorie pole vypořádala bez mrknutí oka; stačilo by seřadit hodnotu parametru v rovnicích teorie.

Má teorie strun na víc?

Jednou z nejkrásnějších vlastností strunové teorie (a tento její rys, když jsem ji studoval, mě nejvíce okouznil) je fakt, že vlastnosti částic jsou *určeny velikostí a tvarem dodatečných rozměrů*. Protože struny jsou tak miniaturní, nevíbrují pouze ve třech velkých rozměrech, známých z každodenního života, chvějí se i ve směru drobných, svinutých rozměrů. A právě jako toky vzduchu proudícího žestovým nástrojem vzbuzují vibrace určené geometrickým tvarem nástroje, vibrují struny v teorii strun podle šablon předurčených geometrickým tvarem svinutých rozměrů. Nezapomeneme-li, že charakter vibrační strun určuje takové vlastnosti částic, jako je hmotnost a elektrický náboj, vidíme, že tyto vlastnosti jsou určeny geometrií dodatečných rozměrů.

Takže kdybyste přesně věděli, jak dodatečné rozměry teorie strun vypadají, urazili byste notný kus cesty směrem k předpovědění detailních vlastností vibrujících strun a tím i detailních vlastností elementárních částic, které se z vibrační strun rodí. Překážkou je, a to už dlouhá léta, že zatím nikdo nebyl – a stále není – schopen přesný tvar dodatečných rozměrů určit. Rovnice strunové teorie matematicky omezují možnou geometrii dodatečných rozměrů a požadují, aby náležely do konkrétní množiny zvané *Calabiho-Yauovy tvary* (nebo v matematickém žargonu *Calabiho-Yauovy variety*), nesoucí jména matematiků Eugenia Calabiho a Shing-Tung Yaua, kteří zkoumali jejich vlastnosti dlouho předtím, než byla objevena důležitá úloha, kterou hrají ve strunové teorii (obrázek na straně 89). Potíž je v tom, že Calabiho-Yauova varieta není jen jediná. Podobně jako různé hudební nástroje vyluzují různé zvuky, i dodatečné rozměry přicházejí v celé pestré paletě velikostí a tvarů (a s různými velikostmi dalších veličin – na ty si posvítíme v další kapitole), a proto předepisují strunám různé druhy vibrační a tím i odlišné vlastnosti částic. *Neexistence jediného správného popisu dodatečných rozměrů je tím hlavním kamenem úrazu, který strunovým teoretikům zabraňuje vytvořit definitivní předpověď.*

Když jsem se v polovině osmdesátých let začínal věnovat teorii strun, byla známa jen hrstka Calabiho-Yauových tvarů, takže mnozí věřili, že je bude možné všechny prozkoumat a nalézt souhlas se známými fyzikálními jevy. Moje doktorská práce byla jedním z prvních kroků tímto směrem. O pár let později, to už jsem byl postdoktorand (mým vedoucím byl Yau, po němž se



Detailní záběr tkaniny prostoru podle teorie strun s konkrétním příkladem dodatečných rozměrů svinutých do jednoho z Calabiho-Yauových tvarů. Podobně jako příze na podkladu koberce by i Calabiho-Yauovy tvary byly přichyceny ke každému bodu v obvyklých třech velkých prostorových rozměrech (které jsou znázorněny jako dvourozměrná čtvercová síť), ale v zájmu názornosti jsou tyto tvary přikresleny pouze do průsečíků ve čtvercové síti.

jmenují Calabiho-Yauovy tvary), se počet Calabiho-Yauových tvarů rozrostl do několika tisíc, což vyčerpávající rozbor ztížilo – ale na takovou práci existují postgraduální studenti. Jak čas běžel, stránky v Calabiho-Yauově katalogu se dále rozmnožovaly; jak uvidíme v 5. kapitole, dnes je jich více než písku na pláži. Na všech plážích. Kdekoli. A o hodně víc. Na matematický rozbor každého možného tvaru dodatečných rozměrů musíme zapomenout. Teoretici strun tedy raději pokračovali v hledání matematického předpisu, který by vybral konkrétní Calabiho-Yauovu varietu jako „tu správnou“. Zatím žádný z nich neslavil úspěch.

A tak pokud jde o vysvětlení vlastností fundamentálních částic, na proměnu vkládaných nadějí ve skutky stále čekáme. V tomto smyslu zatím strunová teorie žádné vylepšení ve srovnání s kvantovou teorií pole nenabízí.¹³

Mějte ale na paměti, že hlavní předností teorie strun je její schopnost vyřešit *ústřední* dilema teoretické fyziky 20. století a utišit bouřlivé nepřátelství mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou. Na půdě strunové teorie se z kvantové mechaniky a obecné relativity konečně staly harmonicky sehrané společnice. V *tomto* kontextu představuje teorie strun vítální krok vpřed, protože nás přenáší přes klíčové překážky, které znepříjemňovaly výzkum standardními metodami kvantové teorie pole. Kdyby nám jednou lepší porozumění matematice strunové teorie umožnilo vybrat správný tvar dodatečných rozměrů, který by dovolil vysvětlit i všechny pozorované vlastnosti částic, byl by to fenomenální triumf. Neexistuje však záruka, že teorie strun může tento sen splnit. Ale ani nemá povinnost to učinit. Kvantová teorie pole se sice

právem stala hrdinkou chvalozpěvů, a přesto fundamentální vlastnosti částic vysvětlit nedokáže. Třeba ani strunová teorie nebude v tomto směru úspěšná. Převyšuje-li však kvantovou teorii pole v jednom důležitém ohledu, totiž v začlenění gravitace, už to samotné je monumentální úspěch.

Jak uvidíme v 6. kapitole, ve vesmíru zaplněném paralelními světy – jehož existenci naznačuje moderní interpretace teorie strun – by mohlo být skutečně chybou doufat, že matematika vybere jediný možný tvar dodatečných rozměrů. Spíše různé tvary dodatečných rozměrů poskytují hojnou rozmanitost vesmírů, které mohou osídlit multivesmír, odvozený od strun podobně, jako je mnohost různých druhů molekuly DNA zdrojem rozmanitosti života na Zemi.

Strunová teorie a experiment

Je-li typická struna tak malá, jak naznačuje obrázek na straně 78, potom bychom k pozorování jejího nenulového objemu – hlavní vlastnosti, která ji odlišuje od bodu – potřebovali urychlovač asi milion miliardkrát silnější, než je Velký hadronový srážec (LHC). Při použití nejmodernější techniky by takový urychlovač musel mít rozměry galaxie a spotřeboval by každou sekundu energii, která by celé civilizaci stačila na tisíciletí. Nedojde-li k nějaké zásadní revoluci v technice, pak je jisté, že na všech dostupných urychlovačích o mnohem menší energii budou struny vždycky vypadat jako bodové částice. Tohle je experimentální ztělesnění teoretické skutečnosti, kterou jsem už zmínil: při nízkých energiích se matematika teorie strun transformuje do matematiky kvantové teorie pole. Pokud je strunová teorie správnou fundamentální teorií, pak bude dokonale napodobovat kvantovou teorii pole v široké paletě proveditelných experimentů.

To je dobrá zpráva. Přestože kvantová teorie pole není vybavena na to, aby zkombinovala obecnou teorii relativity s kvantovou mechanikou nebo aby předpověděla fundamentální vlastnosti částic přírody, umí vysvětlit dlouhou řadu experimentálních výsledků. Pro tento účel se do ní musejí zadat měřené vlastnosti částic jako vstup (čísla, která určují volbu polí a energetických křivek v kvantové teorii pole) a teprve poté lze za pomoci matematiky kvantové teorie pole předpovídat chování částic v dalších experimentech, většinou těch na urychlovačích. Výsledky jsou extrémně přesné, a proto také celá pokolení částicových fyziků přijala kvantovou teorii pole za svůj primární nástroj.

Volba polí a energetických křivek v kvantové teorii pole odpovídá volbě tvaru dodatečných rozměrů ve strunové teorii. Specifická komplikace, s níž se teoretici strun potýkají, ovšem tkívá v tom, že matematika přiřazující vlastnosti částic (například jejich hmotnosti či náboje) tvarům dodatečných rozměrů je mimořádně spleťtá. To do značné míry znemožňuje analýzu v opačném směru – tedy při využití experimentálních dat k rekonstrukci tvaru dodatečných rozměrů v podobném smyslu, jako je možné z experimentů zrekonstruovat

energetické křivky v kvantové teorii pole. Jednoho dne možná nabudeme teoretického umu a vyčteme tvar dodatečných rozměrů teorie strun z experimentálních dat, ale zatím toho schopni nejsme.

V nedaleké budoucnosti tedy zůstanou nejslibnější strategií, jak spojit teorii strun s měřeními daty, předpovědi, k jejichž vysvětlení sice tradičnější metody postačí, ale které je možné mnohem přirozeněji a přesvědčivěji vysvětlit za pomoci strunové teorie. Můžete třeba spekulovat o tom, že jsem tato slova natukal prsty na nohou, ale daleko přirozenějším a přesvědčivějším vysvětlením – jehož správnost můžu potvrdit – by bylo, že jsem zaměstnal prsty na rukou. Podobné úvahy vztažené na experimenty shrnuté v tabulce na následující dvoustraně mohou posílit naše přesvědčení o správnosti strunové teorie.

O něco podobného se snaží experimenty od těch na srážeči LHC (který hledá supersymetrické částice a náznaky existence dodatečných rozměrů) přes pokusy „na stole“ (měření gravitační přitažlivosti na vzdálenostech miliontin metru a kratších) až k astronomickým pozorováním (hledání konkrétních druhů gravitačních vln a jemných variací teplot v reliktním záření). Tabulka vysvětluje jednotlivé strategie, ale jejich společné poselství lze shrnout jednoduše. Pozitivní výsledek kteréhokoli z těchto experimentů by šlo vysvětlit i bez strunové teorie. Například supersymetrie (první položka v tabulce) byla sice objevena při teoretických rozborech teorie strun, ale od té doby byla začleněna i do nestrunových teorií. Objev supersymetrických částic by tedy potvrdil část strunové teorie, ale nebyl by to corpus delicti, nepopíratelný důkaz, který vymýtí všechny pochyby o strunové teorii. Stejně tak by našel přirozený domov ve strunové teorii dodatečné prostorové rozměry, ale i ty se mohou stát součástí nestrunových teorií – nakonec ani sám Kaluza nepracoval na strunové teorii, když svou myšlenku původně formuloval. Nejpriznivějším možným výsledkem pokusů z uvedené tabulky by tedy byla celá kupa pozitivních výsledků, které by ukázaly, že kousky strunové skládačky do sebe začínají zapadat. Nestrunová vysvětlení by se pod tlakem pozitivních výsledků začala hroutit podobně jako smyšlenka o tom, že jsem tuto knihu natukal prsty na nohou.

Negativní experimentální výsledky by přinesly mnohem méně užitečných informací. Nezdár úsilí o nalezení supersymetrických částic by mohl vypovídat o tom, že žádné takové částice neexistují, ale mohl by znamenat i to, že jsou příliš těžké na to, aby je vyrobil ba i Velký hadronový srážeč (LHC); neúspěšné hledání známek dodatečných rozměrů by mohlo být známkou toho, že neexistují, ale mohlo by znamenat i to, že jsou příliš malé na to, abychom se k nim dostali za pomoci dnešních technologií; nenalezení drobných černých děr by mohlo znamenat, že gravitační síla na krátkých vzdálenostech neroste, ale i to, že naše urychlovače jsou příliš slabé na to, aby se zavrtaly dostatečně hluboko do mikroskopického terénu, kde je nárůst velikosti gravitační síly značný; nezdár v hledání otisků strun při pozorování gravitačních

Experimenty a pozorování, které mají naději propojit teorii strun s daty.

EXPERIMENTÁLNÍ POZOROVÁNÍ	VYSVĚTLENÍ
<p>Supersymetrie</p>	<p>Předpona „super“ je odvozena od <i>supersymetrie</i>, matematické vlastnosti, která má jeden jasný důsledek: pro každý známý druh částic musí existovat druh partnerský, který se vzhledem k jeho totožným nábojům chová stejně v elektrických a jaderných polích. Teoretici mají podezření, že tyto částice dosud unikají detekci proto, že jsou těžší než jejich známé protějšky, a tak leží mimo dosah intenzivně využívaných urychlovačů. Velký hadronový srážecí (LHC) bude disponovat dostatečnou energií k tomu, aby je vytvořil, a tak řada fyziků chová naději, že brzy můžeme stanout na prahu objevu supersymetrických vlastností přírody.</p>
<p>Dodatečné rozměry a gravitace</p>	<p>Poněvadž je prostor prostředím, jímž se přenáší gravitace, větší počet rozměrů poskytuje gravitaci více místa k jejímu šíření. Inkoust se rozředí, pokud ho přilijeme do větší nádoby s vodou, a stejně tak síla gravitace se rozředí, jestliže se rozptýlí do přidávaných rozměrů prostoru – tím lze vysvětlit, proč se gravitace zdá tak slabá (když zvedáte šálek kávy, vaše svaly přemohou gravitační působení celé planety). Kdybychom mohli měřit sílu gravitace na vzdálenostech kratších, než je velikost dodatečných rozměrů, zachytili bychom tuto sílu předtím, než se rozptýlí, a zjistili bychom, že je silnější. V posledních letech bylo možné měřit gravitaci na stále kratších vzdálenostech, až na jednom mikrometru (10^{-6} metru), zatím se však nevyskytla žádná odchylka od velikosti gravitační síly, kterou očekáváme ve světě se třemi prostorovými rozměry. Kdyby se taková odchylka objevila, fyzici by posouvali své experimenty k ještě kratším vzdálenostem a nakonec by přesvědčivý důkaz dodatečných rozměrů našli.</p>
<p>Dodatečné rozměry a chybějící energie</p>	<p>Kdyby dodatečné rozměry existovaly, ale byly by mnohem kratší než mikrometr, nešlo by je detekovat v experimentech, které měří sílu gravitace přímo. Velký hadronový srážecí (LHC) však nabízí další způsob, jak jejich existenci odhalit. Trosky z čelních srážek párů extrémně rychlých protonů mohou být vychýleny z našich obvyklých velkých rozměrů ve směru rozměrů dodatečných (v takovém případě by těmi troskami pravděpodobně byly částice gravitace, <i>gravitony</i>; proč, naznačím později). Kdyby se tak stalo, tyto trosky by odnesly energii ven, a proto by detektory naměřily, že po srážce byla celková energie o něco nižší než před ní. Chybějící energie by pak mohla zvýšit přesvědčení fyziků, že dodatečné rozměry existují.</p>

EXPERIMENTÁLNÍ POZOROVÁNÍ	VYSVĚTLENÍ
<p>Dodatečné rozměry a malé černé díry</p>	<p>Černé díry se obvykle popisují jako pozůstatky velmi hmotných hvězd, které už vyčerpaly jaderné palivo a zkolabovaly pod svou vlastní vahou. Tato jejich charakteristika však není dostatečně obecná. Černou dírou se může stát cokoli, je-li to dostatečně stlačeno. Jestliže navíc existují dodatečné rozměry prostoru, z nichž plyne, že gravitace je na velmi krátkých vzdálenostech silnější, bylo by jednodušší černé díry vytvořit, protože silnější gravitační pole znamená, že k vytvoření stejné gravitační síly stačí menší stlačení. Dokonce i dva protony, které se srazí při rychlostech obvyklých u LHC, mohou být schopny napěchovat dostatečnou energii do dostatečně malého objemu, a tím vyvolat zrod černé díry. Byla by to jen malinká černá dírka, ale zanechala by po sobě nezaměnitelný otisk. Matematické rozbory, s nimiž začal Stephen Hawking, ukazují, že drobnou černé díry by se rychle rozprskly ve spršky lehkých částic; jejich stopy by mohly nalézt detektory urychlovače.</p>
<p>Gravitační vlny</p>	<p>Přestože jsou struny malé, mohli byste některou z nich hodně natáhnout, kdybyste ji nějak šikovně uchopili. Museli byste zatáhnout silou odpovídající tíze 10^{20} tun, abyste její vnitřní napětí překonali, ale k dalšímu natahování struny by stačilo spotřebovat dostatek energie. Teoretici našli exotické situace, v nichž by astrofyzikální procesy mohly tuto energii poskytnout a vyrobit tak dlouhé struny táhnoucí se prostorem. Takové struny by mohly být detekovatelné, i kdyby se nacházely velmi daleko od Země. Výpočty ukazují, že při vibracích vytvářejí dlouhé struny vlny v časoprostoru – gravitační vlny – s velmi charakteristickým tvarem, a proto představují velmi jasný pozorovatelný signál. Velmi citlivé detektory, které v následujících desetiletích nebo i dříve budou vybudovány na Zemi – a s dostatkem peněz i ve vesmíru –, by mohly takové vlny zachytit.</p>
<p>Reliktní záření</p>	<p>Reliktní záření už ukázalo svou užitečnost při výzkumu kvantové fyziky: poskytlo nám informaci o variacích teploty záření pocházejícího z kvantového chvění, které se roztáhlo při rozpínání prostoru. (Vzpomeňte si na analogii s drobnou zprávou načmáranou na scvrklém balonku, která se stane čitelnou, jakmile balonek nafoukneme.) V době inflace je roztahování prostoru tak ohromné, že i nejjemnější otisky, snad i ty, které třeba zanechají struny, se mohou dostatečně roztáhnout, aby je šlo zachytit – například sondou Planck Evropské kosmické agentury. Úspěch nebo neúspěch závisí na chování strun v nejranějších okamžicích života vesmíru – na povaze zprávy, kterou zaznamenaly na vyfouknutý kosmický balonek. Fyzici se už pochlubili různými nápady a provedli rozmanité výpočty. Teoretici teď čekají, až promluví samotná data.</p>

vln nebo reliktního záření může znamenat, že je teorie strun chybná, ale může být třeba jen symptomem toho, že její otisky jsou příliš nenápadné a dnešními přístroji těžko změřitelné.

Ani ty nejslibnější pozitivní výsledky dnes probíhajících experimentů by tedy téměř určitě neměly sílu definitivně strunovou teorii dokázat, zatímco negativní výsledky by nenabídlly dostatečně pádné důkazy, aby ji vyvrátily.¹⁴ Ale nepochopte mě špatně. Kdybychom našli stopy existence dodatečných rozměrů, supersymetrie, malinkých černých děr nebo zachytili jakékoli další potenciální signály, byl by to obrovský okamžik v hledání jednotné teorie. Zvýšilo by to právem naši důvěru v to, že se po matematické stezce ubíráme správným směrem.

Strunová teorie, singularity a černé díry

Ve velké většině situací se kvantová mechanika a gravitace navzájem šťastně ignorují, protože kvantovou mechaniku zajímají malé věci, jako jsou molekuly a atomy, a gravitaci zase velké objekty, například hvězdy a galaxie. V případech takzvaných *singularit* jsou však obě teorie nuceny vzdát se své izolace. Singularity v libovolném fyzikálním kontextu, ať už reálném nebo hypotetickém, je natolik extrémní (kvůli velké hmotnosti, malé velikosti, ohromnému zakřivení prostoru nebo dírák či trhancům v tkanině časoprostoru), že kvantová mechanika s obecnou relativitou selže a plodí výsledky podobné chybovým hláškám, které kalkulačky zobrazují při dělení nulou.

Jakákoli navržená kvantová teorie gravitace by slavila úspěch, kdyby kvantovou mechaniku a gravitaci spojila tak, že by odstranila singularity. Výsledná matematika by neměla zkolabovat nikdy – ani v okamžiku velkého třesku či ve středu černé díry,¹⁵ a proto by měla poskytnout smysluplný popis situací, které dlouho mátlly badatele. A právě tady učinila teorie strun nejpůsobivější kroky vpřed, když zkrotila rozrůstající se seznam singularit.

V polovině osmdesátých let si uvědomil tým sestávající z Lance Dixona, Jefa Harveyho, Cumruna Vafy a Edwarda Wittena, že jisté konkrétní praskliny v tkanině prostoru (známé jako *orbifoldové singularity*), které obracejí Einsteinovu matematiku v trosky, pro teorii strun žádný problém nepředstavují. Klíčem k úspěchu je fakt, že zatímco bodové částice do těchto prasklin mohou zapadnout, struny nikoli. Protože struny jsou objekty rozkládající se v prostoru, mohou do praskliny narazit, mohou se kolem ní ovinout nebo se k ní přilepit, ale tyto mírumilovné interakce nijak zdraví rovnic strunové teorie neohrožují. To je důležité; nikoli proto, že takovými prasklinami je sužován vesmír kolem nás – může i nemusí být –, ale proto, že teorie strun tím řeší úkol, jehož splnění od kvantové teorie gravitace očekáváme: popisuje situace, s nimiž se obecná relativita a kvantová mechanika samy vypořádat nedokážou, a to bez jakýchkoli vnitřních rozporů.

V devadesátých letech jsme s Paulem Aspinwallem a Davidem Morriso-
nem – a nezávisle na nás Edward Witten – našli ještě extrémnější singula-
rity (známé jako *flopové singularity*), v nichž je sférická část prostoru stlačena
do nekonečně malého objemu, s nímž si strunová teorie také dovede poradit.
V tomto případě lze její úspěch heuristicky vysvětlit tak, že pohybující se stru-
na může vytvořit obrannou bariéru kolem stlačené oblasti prostoru podob-
ně, jako lze s pomocí obruče vytvořit válcovou mýdlovou bublinu. Výpočty
ukázaly, že takový „strunový štít“ anuluje jakékoli potenciálně katastrofální
důsledky, čímž zaručuje absenci jakýchkoli patologických jevů – podobných
chybám typu „1 děleno 0“ – dokonce i v případě, kdy by se obvyklé rovnice
obecné relativity sesypaly.

V následujících letech badatelé ukázali, že i řadu dalších a složitějších sin-
gularit (s názvy jako *konifolds*, *orientifolds*, *enhanced* a podobně) má strunová
teorie plně pod kontrolou. Seznam situací, které by patrně přiměly Einsteina,
Bohra, Heisenberga, Wheelera a Feynmana k výroku, že „prostě nevíme, co
se děje“, u nichž však teorie strun přichází s úplným a konzistentním popi-
sem, se tedy prodlužuje.

To představuje velký pokrok. Ale před strunovou teorií stále stojí úkol
vypořádat se se singularitami v černých dírách a se singularitou velkého
třesku, tedy s úkolem zapeklitějším, než byly ty už zmíněné. Teoretici vyna-
ložili mnoho úsilí, aby tohoto cíle dosáhli, a podstatně pokročili. Jednou
větou lze situaci shrnout tak, že jim ještě zbývá notný kus cesty, než tyto
nejzáhadnější a z experimentálního hlediska nejdůležitější singularity zcela
pochopí.

Na jednu související záhadu týkající se černých děr už však vrhla nové svět-
lo posloupnost revolučních objevů z nedávné doby. Jak se dozvíte v 9. kapi-
tole, práce Jacoba Bekensteina a Stephena Hawkinga ze sedmdesátých let
ukázaly, že černé díry obsahují zcela konkrétní množství nepořádku, experty
nazývaného *entropie*. Podle základní fyziky určuje nepořádek černé díry počet
náhodných přeuspořádání vnitřností černé díry ve stejném smyslu, v jakém je
nepořádek v zásuvce s ponožkami určen počtem možných permutací obsa-
hu. Byť se fyzici sebevíc snažili, dlouho nedokázali pojmenovat vnitřnosti
černé díry, natožpak spočítat možné způsoby, jak je lze přerovnat. Cestu ze
slepé uličky našli strunoví teoretici Andrew Strominger a Cumrun Vafa.
Smícháním všeho chuti různých ingrediencí ze strunové teorie (s některými
se setkáme v 5. kapitole) zkonstruovali matematický model nepořádku v čer-
né díře, a to model natolik průzračný, že mohli vypočítat přesnou velikost
entropie. Výsledek, k němuž dospěli, souhlasil zcela přesně s Bekensteinovou
a Hawkingovou odpovědí. Ačkoli jejich práce nechala některé hluboké otáz-
ky (například explicitní určení totožnosti mikroskopických stavebních kame-
nů černé díry) bez odpovědi, poskytla první spolehlivý kvantověmechanický
výpočet nepořádku černé díry.¹⁶

Pozoruhodný pokrok při objasňování dějů odehrávajících se v okolí singularit i entropie černých děr naplnil obec fyziků odůvodněnou důvěrou v to, že časem se jim podaří rozlousknout i zbývající záhady černých děr a velkého třesku.

Teorie strun a matematika

Nalezení spojitosti s údaji z experimentů nebo pozorování je jediným způsobem, jak rozhodnout, zda strunová teorie popisuje přírodu správně. Ukázalo se, že jde o cíl zatím nedosažitelný. Navzdory veškerému pokroku zůstává teorie strun disciplínou ryze matematickou. Není však pouhým spotřebitelem matematiky. Některé z jejích nejceněnějších výsledků naopak matematiku *obohatily*.

Když Einstein začátkem 20. století pracoval na obecné teorii relativity, proslavil se i tím, že ve snaze nalézt matematicky přesný jazyk pro popis zakřiveného časoprostoru prohledával matematické archivy. Rané geometrické poznatky takových matematiků, jako byl Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann a Nikolaj Lobačevskij, se pro něj staly důležitým odrazovým můstkem. V jistém smyslu dnes strunová teorie pomáhá splácet Einsteinův intelektuální dluh tím, že pohání rozvoj nové matematiky. Lze to doložit celou řadou důkazů, ale vyberu jeden, který dobře reprezentuje povahu matematických výdobytků teorie strun.

Obecná teorie relativity ustanovila pevné propojení mezi geometrií časoprostoru a pozorovanými fyzikálními jevy. Einsteinovy rovnice spolu s informací o rozdělení hmotnosti a energie v určité oblasti prostoru vám napoví, jaký bude mít výsledný časoprostor tvar. Různá fyzikální prostředí (s různým uspořádáním hmotnosti a energie) vedou k časoprostorům odlišného tvaru; různé časoprostory odpovídají fyzikálně odlišným prostředím. Co byste pocítili, kdybyste spadli do černé díry? Zjistíte to, vypočítáte-li vlastnosti jednoho geometrického tvaru, který Karl Schwarzschild objevil při svém studiu sférických řešení Einsteinových rovnic. A co když se ta černá díra rychle otáčí kolem své osy? Proveďte tytéž výpočty s geometrií časoprostoru nalezenou v roce 1963 novozélandským matematikem Royem Kerrem. V obecné relativitě do sebe *jin* geometrie a *jang* fyziky organicky zapadají.

Strunová teorie tento závěr obohacuje ještě jedním překvapivým poznatkem. Ukazuje, že mohou existovat *různé* tvary časoprostoru, a přesto vedou k fyzikálně nerozlišitelným popisům reality.

Jak tomu rozumět? Od starověku až do epochy moderní matematiky jsme modelovali geometrické tvary jako množiny bodů. Třeba pingpongový míček jsme považovali za množinu bodů na jeho povrchu. A před strunovou teorií byly i základní stavební kameny hmoty modelovány jako body, bodové částice; tato shoda mezi základními ingrediencemi odrážela soulad mezi geome-

trií a fyzikou. Jenže základními stavebními kameny podle teorie strun body nejsou. Jsou jimi struny. To naznačuje, že fyzikální projevy teorie strun by měly být spojeny s novým typem geometrie, která není založena na bodech, ale spíše na smyčkách. A této nové geometrii se říká *strunová geometrie*.

V čem že je nová? Představte si strunu pohybující se prostorem s nějakým geometrickým tvarem. Všimněte si, že se struna může chovat přesně jako bodová částice – lehce plachtit z místa na místo, narážet do stěn, proplovat peřejemi, probíhat údolními a tak dále. V jistých situacích však struna může udělat i něco zcela originálního. Představte si, že prostor (nebo jeho část) má tvar povrchu dlouhého válce. Struna se pak může namotat kolem takového kusu prostoru stejně, jako se gumička na vlasy může napnout okolo plechovky s limonádou. Svě vyhublé tělo uloží v prostoru způsobem, který je bodové částici jednoduše zapovězen. Takové „navinuté“ struny pocítují tvar prostoru jinak než jejich „nenavinuté“ kolegyně. Kdybyste zvýšili tloušťku válce, navinutá struna by se musela protáhnout, zatímco nenavinutá struna pohybující se po povrchu nikoli. Proto jsou také navinuté a nenavinuté struny ovlivněny odlišnými vlastnostmi tvaru prostoru podle toho, jak se pohybují.

Takový poznatek je velmi zajímavý, protože vede k překvapivému a zcela neočekávanému závěru. Strunoví teoretici našli zvláštní páry geometrických tvarů, v nichž má prostor zcela odlišné vlastnosti podle toho, jestliže si ho „osahávají“ nenavinuté nebo navinuté struny. Ale – a to je pointa – pokud tento tvar prozkoumáme oběma způsoby, jak s navinutými, tak s nenavinutými strunami, nelze oba tvary od sebe rozlišit. Co vidí nenavinuté struny v jednom prostoru, to vidí navinuté struny v prostoru druhém a naopak – a z toho pramení totožné kolektivní popisy obou tvarů, které lze dát dohromady, vypíšeme-li všechny možné fyzikální jevy, které mohou podle strunové teorie nastat v obou prostorech.

Podobné dvojice geometrických tvarů představují šikovní matematický nástroj. Když se v obecné teorii relativity zajímáte o nějakou fyzikální vlastnost, musíte provést matematický výpočet, který stojí na konkrétním geometrickém tvaru odpovídající situaci, již studujete. Ve strunové teorii je však existence párů fyzikálně ekvivalentních geometrických tvarů známkou toho, že máte ještě jednu možnost: můžete výpočty provést s jedním i s druhým tvarem páru. A mimořádně dobrou zprávou je, že ačkoli je zaručeno, že s oběma tvary se doberete stejně odpovědi, matematické detaily cesty vedoucí k odpovědi se mohou podstatně lišit. V celé paletě situací se matematicky nesmírně obtížné výpočty dějů v jednom tvaru prostoru převedou na nadmíru jednoduché výpočty dějů v druhém tvaru. A jakákoli metoda, která složité matematické výpočty zjednoduší, má samozřejmě velkou hodnotu.

Během let matematici a fyzici s pomocí tohoto složitě-jednoduchého slovníku vyřešili částečně nebo úplně mnoho matematických problémů. Jeden, k němuž mám citový vztah, má co do činění s počítáním sfér, které lze zabalit

(konkrétním matematickým způsobem) do daného Calabiho-Yauova tvaru. Matematici se o tuto otázku zajímali už dávno. Tehdy ale zjistili, že tento problém až na nejjednodušší případy přesahuje lidské možnosti. Vezměte si třeba Calabiho-Yauovu varietu z obrázku na straně 89. Je-li sféra zabalena do tohoto tvaru, může se na část variety navinout několikrát, podobně jako může laso několikanásobně ovinout sud. Kolika způsoby lze tedy navinout sféru na tento tvar, má-li být navinuta řekněme pětkrát? Kdybyste tuto otázku položili matematikům, patrně by si odkašlali, upnuli zrak na svou obuv a rychle by vás opustili kvůli neodkladné schůzce. Strunová teorie však takové překážky odstranila. Tím, že takové výpočty transformovala na mnohem jednodušší výpočty na přidruženém Calabiho-Yauově tvaru, dovolila teoretikům strun vyspat z rukávu odpovědi, které matematikům vyrazily dech. Kolik je tedy sfér pětinasobně navinutých do Calabiho-Yauova tvaru z obrázku na straně 89? 229 305 888 887 625. A co když jsou sféry navinuty desetinasobně? Dvacetinasobně? Tato čísla se stala prvními vlaštovkami, s jejichž přiletem se otevřela celá nová kapitola dějin matematických objevů.¹⁷

Ať už tedy teorie strun představuje správný přístup k popisu fyzikálního vesmíru nebo ne, získala si už pověst účinného nástroje, s nímž lze zkoumat vesmír matematický.

Stav strunové teorie: zhodnocení

Tabulka na dalších stranách, vycházející z předchozích čtyř podkapitol, shrnuje zprávu o stavu teorie strun, přičemž přidává několik pozorování, o nichž jsem v textu zatím pomlčel. Vykresluje teorii strun jako produkt ve stadiu vývoje, který už dosáhl ohromujících úspěchů, ale ještě neprošel nejdůležitějším typem zkoušky: experimenty. Proto také než bude nalezena její přesvědčivá souvislost s experimenty nebo pozorováními, zůstane teorií spekulativní. Nalézt takové souvislosti je obrovský úkol, třebaže obtížnost tohoto úkolu nezávisí pouze na teorii strun. Jakýkoli pokus sjednotit gravitaci s kvantovou mechanikou vstupuje do pojmového světa, který daleko překračuje schopnosti i toho nejmodernějšího experimentálního výzkumu. To nijak nepřekvapuje; vzhledem k tomu, že jde o výzkum vysoce ambiciózní, očekávali fyzici od samotného počátku, že nebude snadné tyto teorie ověřovat. Posouvání hranic vědění a hledání odpovědí na některé z nejhlubších otázek vznášených za posledních několik tisíc let lidského uvažování je impozantní projekt, který pravděpodobně nelze dokončit přes noc. A patrně ani za několik desetiletí.

Když hodnotí stav své disciplíny, tvrdí mnozí strunoví teoretici, že nezbytným dalším krokem je formulovat rovnice teorie v jejich nejpřesnějším, nejužitečnějším a nejuniverzálnějším tvaru. Velká část výzkumu v prvních desetiletích teorie, asi do poloviny devadesátých let, stavěla na přibližných rovnicích, které – alespoň podle mínění mnohých – mohly kvalitativní vlast-

nosti teorie odhalit, ale byly příliš hrubé na odvození jemnějších předpovědí. Nedávný vývoj (o němž si ještě povíme) prohloubil naše chápání více, než bylo v moci přibližných metod. Ačkoli se definitivní předpovědi získat nepodařilo, vynořil se nový pohled na teorii. Vzešel z posloupnosti poznatků, které nabízejí novou perspektivu možných důsledků teorie, k nimž patří i nové druhy paralelních světů.

Shrnutí zprávy o stavu strunové teorie.

ÚKOL	JE TO ÚKOL NUTNÝ?	STAV
<p>Sjednotit gravitaci a kvantovou mechaniku</p>	<p>Ano Prvním úkolem je sloučit obecnou relativitu a kvantovou mechaniku.</p>	<p>Výborný Řada výpočtů a poznatků ukazuje, že teorie strun úspěšně spojuje obecnou relativitu s kvantovou mechanikou.¹⁸</p>
<p>Sjednotit všechny síly</p>	<p>Ne Sjednocení gravitace s kvantovou mechanikou nutně nevyžaduje sjednocení s dalšími silami přírody.</p>	<p>Výborný Ačkoli není plně sjednocená teorie nezbytně nutná, byla dlouho cílem fyzikálního výzkumu. Strunová teorie dosahuje tohoto cíle tím, že popisuje všechny síly stejným způsobem – jejich kvanty jsou struny, vykonávající konkrétní druhy vibrací.</p>
<p>Začlenit revoluce z předchozího výzkumu</p>	<p>Ne V principu se nemusí úspěšná teorie příliš podobat úspěšným teoriím z minulosti.</p>	<p>Výborný Třebaže pokrok nemusí nutně probíhat postupně a plynule, historie ukazuje, že tomu tak obvykle bývá; úspěšné nové teorie do sebe většinou začlení úspěchy z minulosti jakožto limitní případy. Teorie strun začleňuje podstatné zvraty, které v minulosti úspěšně posunuly fyziku vpřed.</p>

Shrnutí zprávy o stavu strunové teorie.

ÚKOL	JE TO UKOL NUTNÝ?	STAV
<p>Vysvětlit vlastnosti částic</p>	<p>Ne Je to cíl ušlechtilý, a kdyby byl dosažen, zásadně by prohloubil naše chápání vesmíru – není však pro úspěšnou teorii kvantové gravitace bezpodmínečně nutný.</p>	<p>Nelze určit; chybějí předpovědi Teorie strun má jako teoretická kostra převyšující kvantovou teorii pole potenciál vysvětlit vlastnosti částic. Zatím se však tento potenciál neproměnil ve skutečnost; příliš velký počet možných tvarů dodatečných rozměrů znamená, že vlastnosti částic nejsou určeny jednoznačně. V současnosti neexistuje způsob, jak z kandidátů vybrat ten jediný správný tvar.</p>
<p>Experimentální potvrzení</p>	<p>Ano Je to jediný způsob, jak určit, zda je teorie správným popisem přírody.</p>	<p>Nelze určit; chybějí předpovědi Tohle je nejdůležitější kritérium; strunová teorie zatím podle tohoto kritéria nemohla být ověřena. Optimisté doufají, že experimenty na Velkém hadronovém srážeci (LHC) a pozorování pomocí dalekohledů instalovaných do kosmických družic mají kapacitu posunout teorii strun mnohem blíže k empirickým údajům. Neexistuje však záruka, že dnešní technologie má dostatečnou sílu, aby tohoto cíle dosáhla.</p>

ÚKOL	JE TO ÚKOL NUTNÝ?	STAV
<p>Vyhledit singularity</p>	<p>Ano Kvantová teorie gravitace by měla rozumně popsat, co se děje se singularitami, které se mohou alespoň v principu podle fyzikálních zákonů vyskytnout.</p>	<p>Výborný Došlo zde k náramnému pokroku; jevy v okolí řady singularit teorie strun pochopila. Stále se potýká se singularitami velkého třesku a černých děr.</p>
<p>Entropie černých děr</p>	<p>Ano Entropie černé díry je charakteristickou veličinou, k jejímuž určení se musí obecná teorie relativity sladit s kvantovou mechanikou.</p>	<p>Výborný Strunová teorie bez zaváhání vypočítala velikost entropie a úspěšně potvrdila výsledek, jenž byl poprvé odvozen v sedmdesátých letech.</p>
<p>Příspěvky matematice</p>	<p>Ne Správné teorie přírody nemají povinnost obohacovat matematiku.</p>	<p>Výborný Třebaže nové matematické poznatky nejsou k potvrzení správnosti teorie strun nutné, takové poznatky byly nalezeny a prokázaly dalekosáhlost matematických základů teorie.</p>

Kapitola pátá

Vesmíry vznášející se v nedalekých dimenzích

Brány a cyklické multivesmíry

Před lety jsem jednou večer ve své pracovně na Cornellově univerzitě připravoval závěrečný test pro studenty prvního ročníku; měli ho podstoupit nazítří ráno. Protože to byl kurz pro studenty, kteří chtějí promovat s významáním, chtěl jsem je trochu probudit k životu náročnějším úkolem. Bylo už ale pozdě a já měl hlad, a tak jsem místo srovnávání různých možných úkolů sáhl ke standardnímu problému, s nímž se už většina setkala, ale upravil jsem ho, zformuloval jako test a vyrazil jsem domů. (O podrobnosti teď nejde, ale v podstatě šlo o to, předpovědět pohyb žebříku, který je opřeno o zed' a postupně sklouzává dolů. Moje úprava spočívala v proměnné hustotě žebříku podél jeho délky.) Když jsem pak během ranní zkoušky sám zasedl k řešení, zjistil jsem, že moje zdánlivě nepatrná úprava zadání problém mimořádně ztížila. Původní problém šlo vyřešit tak na půlce stránky, na ten nový jsem jich spotřeboval šest. Píšu sice velkými písmeny, ale určitě mi rozumíte.

Tato nenápadná příhoda bývá spíše pravidlem než výjimkou. Učebnicové příklady jsou velmi zvláštní; bývají pečlivě navrženy tak, aby je šlo rozumným úsilím vyřešit. Ale když tyto učebnicové příklady jen trochu modifikujete, změníte předpoklady nebo eliminujete zjednodušení, stanou se z nich úkoly velmi obtížné, ne-li téměř neřešitelné. Zkrátka, snadno se mohou stát stejně složitými jako rozbor obvyklých situací v reálném světě.

Faktem je, že velká většina jevů, od pohybů planet k interakcím částic, je prostě příliš složitá na to, aby je bylo možné popsat matematicky s dokonalou přesností. Úkolem teoretického fyzika je spíše zjistit, které komplikace může v daném kontextu pustit z hlavy, aby dospěl k zvladatelné matematické formulaci, jež stále ještě obsahuje podstatné podrobnosti. Při předpovídání pohybu Země byste spíše měli zahrnout gravitaci Slunce; započtete-li i působení Měsíce, tím lépe, ale matematická obtížnost značně vzroste. (V 19. století věnoval francouzský matematik Charles-Eugène Delaunay dva devítisetstránkové svazky spletitostem v gravitačním tanci Slunce, Země a Měsíce.) Chcete-li postoupit ještě dále a plně zakomponujete vliv všech ostatních planet, analýza začne být neskutečně obtížná. Naštěstí lze u většiny aplikací bez problémů ignorovat všechny vlivy kromě toho slunečního, protože účinek

ostatních těles v naší sluneční soustavě na pohyb Země je minimální. Takové aproximace ilustrují moje nedávné tvrzení, že umění fyziky spočívá ve správném rozhodnutí, co má člověk ignorovat.

Ale jak praktikující fyzici dobře vědí, aproximace nejsou pouze efektivním nástrojem pokroku; čas od času přinášejí i riziko. Komplikace, jež pro zodpovězení jedné otázky hrají jen nepatrnou roli, někdy značně ovlivní zodpovězení otázky jiné. Kapka deště sotva ovlivní velký balvan, ale když tento balvan balancuje na hraně útesu, může jej ona kapka deště snadno popostrčit k pádu a nastartovat lavinu. Aproximace, která by kapku deště přehlédla, by opominula podstatný detail.

V polovině devadesátých let objevili strunoví teoretici něco podobajícího se této kapce. Zjistili, že různé matematické aproximace běžně používané k analýze teorie strun přehlížely některé životně důležité fyzikální jevy. A když byly vyvinuty a aplikovány přesnější matematické metody, mohli se tito teoretici konečně zbavit okovů aproximací – a před jejich očima vyvstaly v plné kráse mnohé neočekávané vlastnosti teorie. Byly mezi nimi i nové druhy paralelních vesmírů; zvláště jeden – ten možná experimentálně nejpřístupnější.

Jak překonat aproximace

Každá hlavní a dobře zavedená disciplína teoretické fyziky – klasická mechanika, elektromagnetismus, kvantová mechanika a obecná relativita – je definována nějakou rovnicí nebo soustavou rovnic. (Není nutné, abyste rovnice znali, ale některé z nich jsem uvedl v poznámkách.)¹ Potíž je v tom, že vždycy – s výjimkou nejjednodušších situací – je řešení těchto rovnic mimořádně obtížné. Proto také fyzici rutinně situaci zjednodušují – ignorují například gravitaci Pluta nebo předpokládají, že je Slunce dokonale kulaté –, čímž si výpočty usnadňují a přibližná řešení mají rázem na dosah.

Po dlouhou dobu čelil výzkum ve strunové teorii ještě větší překážce. Samotné hledání ústředních rovnic bylo natolik obtížné, že fyzici našli jen jejich přibližné verze. A dokonce i přibližné rovnice byly natolik spletité, že byly nutné další zjednodušující předpoklady, aby dospěli k řešení, a tak výzkum závisel na aproximacích k aproximacím. V devadesátých letech se ale situace podstatně zlepšila. Skupina strunových teoretiků v několika navazujících článcích ukázala, jak mantinely aproximací překročit a docílit bezkonkurenčního nadhledu a bezprecedentní jasnosti.

Abyste získali cit pro aproximace, bez nichž se dlouho strunová teorie neobešla, představte si Stanislava, který si hodlal vsadit dva týdny po sobě v loterii, a hrdě proto spočítal pravděpodobnost výhry. Vypráví Šárce, že má naději 1 ku miliardě vyhrát každý týden, bude-li však sázet dvakrát, vzrostou jeho šance na 2 ku miliardě, tedy 0,00000002. Šárka se zlomyslně uculí: „Seš docela *blízko*, Stanislave.“ „Jo, chytračko. Co míníš tím *blízko*?“ „Přestřelils,“ míní

ona. „Když vyhraješ poprvé, druhá účast v loterii tvé naděje na výhru nezvětší; už jsi přece vyhrál. Když vyhraješ dvakrát, budeš jistě mít víc peněz, ale protože jsi chtěl zjistit, zda vůbec vyhraješ, na druhé výhře v případě té první už nezáleží. Takže když chceš dostat přesný výsledek, musíš odečíst pravděpodobnost, že vyhraješ v *obou* týdnech – 1 ku miliardě krát 1 ku miliardě, tedy 0,000000000000000001. Proto je správný výsledek 0,000000001999999999. Co ty na to, Stanislave?“

Odmyslíme-li si Šárčino sebeuspokojení, je její metoda příkladem toho, co fyzici nazývají *perturbativní* nebo *poruchovou metodou*. Pro snadnější výpočet je často nejjednodušší začít s prvním odhadem, započítávajícím jen nejocividnější příspěvky – to je Stanislavův výchozí bod –, a potom promyslet situaci podruhé a započítat jemnější detaily a pozměnit nebo „perturbovat“ první odhad, jak to dělala Šárka. Tento postup lze snadno zobecnit. Kdyby Stanislav plánoval sázet v deseti následujících týdenních slosováních, poprvé by odhadl, že má naději 10 ku miliardě – čili 0,00000001 – vyhrát. Ale stejně jako v předchozím případě započítává tento odhad nesprávně několikanásobné výhry. Když se do počítání pustí Šárka, správně odečte případy, kdy Stanislav vyhrál dvakrát – řekněme v prvním a druhém slosování nebo v prvním a třetím či v druhém a čtvrtém. Takové úpravy neboli korekce jsou úměrné, jak Šárka správně poznamenala, 1 ku miliardě krát 1 ku miliardě. Existuje však ještě menší naděje, že Stanislav vyhraje třikrát; v třetím kole Šárka vezme do úvahy i to a přidá modifikace úměrné 1 miliardtině násobené sama sebou třikrát čili 0,000000000000000000000001. Ve čtvrté fázi výpočtu udělá totéž s ještě menší nadějí čtyřnásobné výhry a tak dále. Každý její nový příspěvek je mnohem menší než ty předchozí, takže v určité chvíli Šárka výsledek posoudí jako dostatečně přesný a oznámí padla.

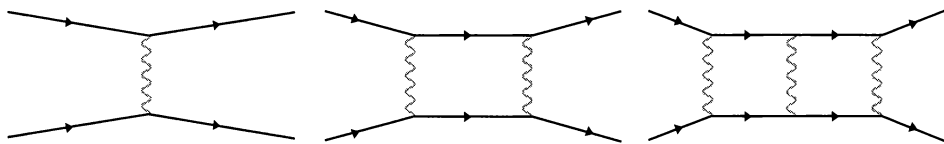
S výpočty ve fyzice i v mnoha dalších vědních disciplínách se často postupuje analogickým způsobem. Když se zajímáte o to, jak pravděpodobné je, že dvě částice letící v opačných směrech trubkami Velkého hadronového srážče (LHC) do sebe narazí, v prvním přiblížení si představíte, že do sebe narazí jen jednou a hned od sebe odskočí (přičemž „náraz“ neznamená, že se musejí přímo dotknout, ale spíše že jediná „kulka“ zprostředkovávající sílu, například foton, je vyslána jednou z částic a pohlcena druhou). Druhé přiblížení bere do úvahy možnost, že částice do sebe narazí dvakrát (jsou mezi nimi vystřeleny dva fotony); třetí korekce započte případy, kdy do sebe částice narazí třikrát a tak dále (obrázek na straně 105). A tato poruchová metoda stejně jako v případě loterie funguje dobře, klesá-li pravděpodobnost stále většího množství interakcí částic – podobně jako naděje na stále větší mnohonásobnou výhru – strmě s tím, jak tento počet roste.

V příkladě s loterií je pokles určen pravděpodobností další výhry, tedy koeficientem 1 ku miliardě; ve fyzikálním případě je pravděpodobnost každé další srážky menší o numerický koeficient známý jako *vazbová konstanta*, jehož

hodnota určuje pravděpodobnost, že jedna částice vystřelí silonosnou kulku a druhá ji pohltí. U částic ovládaných elektromagnetickou silou, například u elektronů, se experimentálním měřením zjistilo, že vazbová konstanta spojená s fotonovými kulkami je asi 0,0073.² Pro neutrina, ovládaná slabou jadernou silou, je vazbová konstanta asi 10^{-6} . Pro kvarky, složky protonů, které se prohánějí ve srážce LHC a jejichž interakci řídí silná jaderná síla, je vazbová konstanta jen o něco menší než 1. Nejde o čísla tak malá, jako je 0,000000001 z příkladu s loterií, ale když například 0,0073 násobíme stejným číslem, výsledek se rychle zmenší. Po jedné iteraci dostaneme 0,0000533 a po dvou asi 0,000000389. Tím se vysvětluje, proč teoretici jen zřídkakdy podstupují trápení spojené s výpočtem mnohonásobné srážky elektronů. Výpočty zahrnující mnoho srážek jsou neobyčejně komplikované a jejich dílčí výsledky tak malé, že můžete zastavit po několika vystřelených fotonech, a dojdete stále k mimořádně přesnému celkovému výsledku.

Aby bylo jasno, fyzici by samozřejmě byli raději, kdyby získali zcela přesné výsledky. V případě mnoha výpočtů je však matematika natolik složitá, že je poruchová metoda tím nejlepším možným řešením. Naštěstí pro malé vazbové konstanty mohou přibližné výpočty nabídnout předpovědi, které s experimenty souhlasí mimořádně dobře.

Podobná poruchová metoda byla dlouho úhelným kamenem výzkumu strunové teorie. Z teorie vyplývá existence čísla zvaného *strunová vazbová konstanta* (anglicky *string coupling* nebo *string coupling constant*), které určuje naději, že se jedna struna odrazí od druhé. Ukáže-li se, že teorie je správná, budeme moci strunovou vazbovou konstantu jednoho dne změřit stejně dobře jako vazbové konstanty vyjmenované výše. Protože je však takové měření zatím jen vysloveně hypotetické, hodnotu strunové vazbové konstanty neznáme. Přestože strunoví teoretici neměli několik desítek let k dispozici žádné experimentální údaje, předpokládali, že je strunová vazbová konstanta malé číslo. Do jisté míry se podobali opilci, který své klíče hledá zásadně pod lampou, protože malá strunová vazbová konstanta dovoluje vrhnout jasné světlo



Dvě částice (znázorněné dvěma rovnými čarami v levé části každého z diagramů) interagují tím, že na sebe vystřelí různé „kulky“ (částice zprostředkovávající síly a znázorněné vlnitými čarami) a zase se od sebe odrazí (dvě rovné čáry napravo). Každý diagram přispívá k celkové pravděpodobnosti, že se částice od sebe odrazí. Čím více kulek je při mnohonásobném odrazu vyměněno, tím menší je příspěvek procesu k celkové pravděpodobnosti.

poruchové analýzy na jejich výpočty. Protože řada úspěšných fyzikálních strategií z doby před strunovou teorií *má* nízkou vazbovou konstantu, měli bychom v naší analogii připustit, že opilec vlastně prohledává osvětlené místo z docela dobrého důvodu – proto, že tam totiž v minulosti klíče často našel. V každém případě tento předpoklad umožnil řadu matematických výpočtů, které nejenže vyjasnily základní procesy vzájemných interakcí strun, ale rozluštily i nejedno tajemství fundamentálních rovnic, na nichž předmět stojí.

Je-li strunová vazbová konstanta nízká, dá se od těchto přibližných výpočtů očekávat, že přesně odrážejí fyziku teorie strun. Ale co když není? Vysoká vazbová konstanta by znamenala, že na rozdíl od příkladů s loterií a se srážkami elektronů jsou další a další upřesnění prvního odhadu stále *větší*, a proto člověk nemá nikdy právo výpočet zastavit. Tisíce výpočtů, které byly v poruchovém schématu provedeny, by pozbyly platnosti; roky výzkumu by přišly vniveč. K tomu je nutné přičíst strach, že i při nízké, ale zas ne příliš nízké strunové vazbové konstantě přehlížely vaše aproximace, alespoň za některých okolností, jemné, ale zásadní fyzikální jevy, jevy podobné dešťové kapce, která dopadne na balvan.

Počátkem devadesátých let se o těchto nepříjemných otázkách příliš nevědělo. V druhé polovině desetiletí však mlčení vystřídal ruch. Když začali badatelé těžit z takzvaných *dualit*, našli nové metody, s nimiž mohli poruchové aproximace obejít.

Dualita

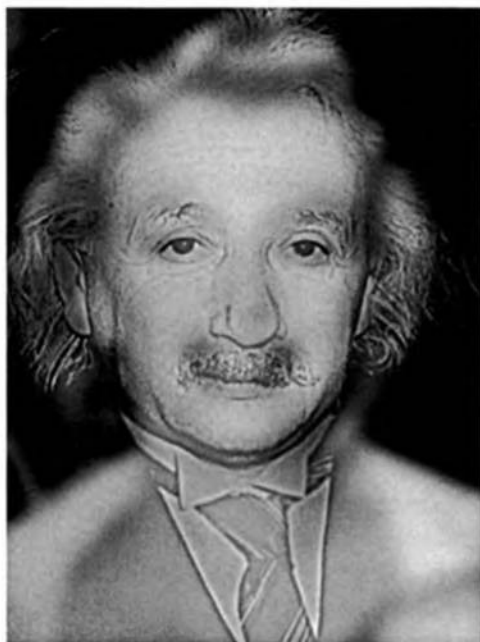
V osmdesátých letech si teoretici uvědomili, že strunová teorie není jediná, ale že existuje pět různých verzí, jimž dali chytlavá jména: teorie strun *typu I*, *typu IIA*, *typu IIB*, *heterotická-O* a *heterotická-E*. Zatím jsem ještě tuto komplikaci nezmínil, protože ačkoli výpočty ukázaly, že se tyto teorie v podrobnostech liší, všech pět spojují jisté hrubé rysy – vibrující struny a dodatečné rozměry prostoru –, na něž jsme se zatím soustředili. Ale teď jsme se už přiblížili k bodu, kdy se těchto pět variací strunové teorie dostane do popředí.

Po celá léta – když chtěli analyzovat každou z teorií strun – fyzici spoléhali na poruchové metody. Pokud pracovali se strunovou teorií typu I, předpokládali, že její vazbová konstanta je nízká, a prováděli několikafázové výpočty podobné těm, s nimiž Stanislav a Šárka rozebírali výhry v loterii. Kdykoli pracovali s heterotickou-O teorií strun nebo kteroukoli další, dělali totéž. Ale jakmile se dostali za hranice nízké vazbové konstanty, nezbylo jim než pokrčit rameny, rozpřáhnout ruce a připustit, že jimi použitá matematika je natolik matná, že žádné spolehlivé poznatky neposkytuje.

Tak tomu bylo až do jara 1995. Tehdy Edward Witten rozčeřil mínění společenství strunových teoretiků sérií šokujících výsledků. Čerpal z prací takových vědců, jako je Joe Polchinski, Michael Duff, Paul Townsend, Chris

Hull, John Schwarz, Ashoke Sen a další, a předložil pádné důkazy, že strunoví teoretici mohou bezpečně vyloučit za hranice nízké vazbové konstanty. Wittenova ústřední myšlenka byla prostá a mocná. Přišel s tvrzením, že když se vazbová konstanta v kterékoli odrůdě teorie strun nastavuje na stále vyšší hodnotu, teorie se – pozoruhodně – spojitě promění v něco veskrze známého: v jednu z ostatních odrůd strunové teorie, ovšem se stále menší vazbovou konstantou. Tak když je například vazbová konstanta ve strunové teorii typu I vysoká, teorie se transformuje na heterotickou-O teorii strun s vazbovou konstantou nízkou. A to znamená, že ona pětice strunových teorií se přece jen od sebe příliš neliší. Každá z verzí se zdá být jiná, zkoumá-li se v omezeném kontextu – při nízké hodnotě její konkrétní vazbové konstanty –, ale když se toto omezení zruší, každá teorie strun se transformuje v ty ostatní.

Nedávno jsem se setkal se skvostným obrázkem. Zblízka na něm rozeznáte portrét Alberta Einsteina, ze střední vzdálenosti vypadá jako něco mezi tím, kdežto z velké dálky z něho na vás hledí Marilyn Monroeová (obrázek dole). Kdybyste viděli jen obrázky v obou extrémních situacích, měli byste důvod si myslet, že jste se dívali na dva samostatné obrázky. Když si však vytrvale prohlédnete obrázek v celém intervalu vzdáleností, neočekávaně zjistíte, že Einstein a Monroeová jsou aspekty jednoho a téhož portrétu. Analogicky i analýza dvou teorií strun v extrémním případě, v němž obě mají nízkou



Zblízka na obrázku vidíme Alberta Einsteina. Zdály se na nás dívá Marilyn Monroeová. (Obrázek vytvořila Aude Olivová z Massachusettského technického institutu, MIT.)

vazbovou konstantu, naznačuje, že se od sebe liší stejně jako Albert a Marilyn. Kdybyste se v tomto místě zastavili – stejně jako to léta dělali strunoví teoretici –, došli byste jistě k závěru, že studujete dvě oddělené teorie. Jestliže však obě teorie prozkoumáte v celém intervalu možných hodnot jejich vazbových konstant, zjistíte, že spojitě přecházejí jedna v druhou – stejně jako Albert přechází v Marilyn a naopak.

Přeměna Einsteina v Monroeovou je zábavná, ale přeměna jedné strunové teorie v další má dalekosáhlé důsledky. Plyne z ní, že když poruchové výpočty v jedné strunové teorii nelze provést, protože její vazbová konstanta je příliš vysoká, lze je řádně převést do jazyka jiné odrůdy teorie strun, v níž bude poruchová metoda fungovat, protože její vazbová konstanta je nízká. Fyzici tomuto přechodu mezi zdánlivě odlišnými teoriemi říkají *dualita*. Tento pojem se stal jedním z všudypřítomných motivů moderního výzkumu strunové teorie. Dualita tím, že poskytuje dva matematické popisy týchž fyzikálních jevů, zdvojnásobuje náš výpočetní zbrojní arzenál. Výpočty neskutečně obtížné z jednoho pohledu začnou být snadno proveditelné z pohledu druhého.*

Witten prohlásil, a další fyzici od té doby vypracovali důležité podrobnosti, že všechny teorie strun jsou propojeny sítí takových dualit.³ Jejich zastřešení nebo sjednocení, nazývané *M-teorie* (brzy uvidíme proč), kombinuje poznatky všech pěti formulací, které jsou k sobě různými dualitami přišity. Samotná existence takového sjednocení nám umožňuje lépe pochopit každou z teorií strun. Například o všech teoriích strun se dozvídáme, že obsahují mnohem více než jen struny, a tento závěr hraje podstatnou úlohu pro téma této knihy.

Brány

Když jsem začal teorii strun studovat, položil jsem si stejnou otázku, jakou jsem v následujících letech dostal od mnoha dalších: Proč hrají struny tak privilegovanou úlohu? Proč se fyzici soustřeďují na fundamentální stavební kameny, které mají jen délku? Koneckonců teorie samotná požaduje, aby aréna, v níž se tyto ingredience pohybují – prostorové rozměry vesmíru –, měla rozměrů devět, takže proč se nemluví o objektech ve tvaru dvourozměrných plachet nebo třírozměrných hrudek či jejich vícerozměrných sestřiček? Odpověď, kterou jsem se jako postgraduální student v osmdesátých letech dozvěděl a kterou jsem sám často dával, když jsem předmět do poloviny devadesátých let vyučoval, zněla, že matematika popisující fundamentální objekty s více než jedním prostorovým rozměrem trpěla fatálními nedostatky (například kvantovými procesy, které probíhají se zápornou pravděpodobností, což je matematicky nesmyslný výsledek). Když se ale stejná matematika aplikuje

* Můžete to považovat za velkolepé zobecnění výsledků, jichž jsme se dotkli ve 4. kapitole a v nichž různé tvary dodatečných rozměrů mohou vést k fyzikálně totožným modelům.

na struny, tyto inkonzistence se pokrátí a zbude po nich popis fyzikálních jevů, který smysl dává.*⁴ Struny rozhodně tvořily kategorii samy o sobě.

Nebo to tak alespoň vypadalo.

Když fyzici, vyzbrojeni novými výpočetními metodami, začali analyzovat své rovnice mnohem důkladněji, došli k paletě neočekávaných výsledků. Jedním z nejpřekvapivějších bylo zjištění, že objekty odlišné od strun byly z teorie vyloučeny příliš ukvapeně. Fyzici si uvědomili, že matematické problémy spojené s analýzou vícerozměrných stavebních bloků, například disků a hrudek, jimiž se jejich eliminace zdůvodňovala, byly pouhými pozůstatky použitých aproximací. Metodami přesnějšími prokázala malá armáda teoretiků, že se stavební kameny s různými počty rozměrů *skrývají* v matematických stínech strunové teorie.⁵ Poruchové metody byly na to, aby tyto nové ingredience odhalily, příliš hrubé, ale nové metody to konečně dokázaly. Ke konci devadesátých let už bylo nadmíru jasné, že teorie strun není teorií, která zahrnuje pouze struny.

Rozbory prokázaly existenci objektů ve tvaru házecích talířů nebo létajících koberců, které mají dva prostorové rozměry: *membrán* (jeden význam písmena „M“ v M-teorii), také nazývaných *dvoubřány*. Těch objektů však bylo více. Byly mezi nimi i objekty se třemi prostorovými rozměry, takzvané *tříbřány*, objekty se čtyřmi prostorovými rozměry, *čtyřbřány*, a tak dále, a dokonce *devítibřány*. Matematika nenechala nikoho na pochybách, že všechny tyto entity mohou, právě tak jako struny, vibrovat a kroutit se; a opravdu, struny je v tomto kontextu nejlepší považovat za *jednobřány* – jednu odrůdu položek v neočekávaně dlouhém seznamu základních stavebních kamenů teorie.

Související objev, který stejně jako brány vyvedl z míry ty, kdo většinu svého profesionálního života strávili vyvíjením teorie, spočíval ve zjištění, že prostorových rozměrů, které teorie vyžaduje, vlastně není devět, ale deset. Zahrneme-li časový rozměr, má časoprostor dohromady jedenáct rozměrů. Jak je to možné? Vzpomeňte si na úvahu o „(D-10) krát *průšvih*“ ze 4. kapitoly, s níž jsme se dopracovali k závěru, že strunová teorie vyžaduje deset časoprostorových rozměrů. Matematická analýza vedoucí k tomuto výsledku byla i tentokrát založena na poruchovém schématu aproximací, předpokládajícím, že je strunová vazbová konstanta nízká. Pak příliš nepřekvapí, že tato aproximace přehlédla jeden z prostorových rozměrů teorie. Witten totiž ukázal důvod: velikost do té doby neznámého desátého prostorového rozměru je přímo ovládána velikostí vazbové konstanty. Tím, že zvolili nízkou vazbovou konstantu, zároveň badatelé nevědomky donutili tento nový rozměr, aby byl také malý – tak malý, že zůstal neviditelný pro matematiku samotnou.

* To nebyl důsledek tajemné matematické shody okolností, ale toho, že struny jsou v precizním matematickém smyslu tvary velmi symetrické. A právě tato jejich symetrie nekonzistence odstranila. Podrobnosti jsou v poznámce 4.

Přesnější metody toto selhání napravily a odkryly vesmír strunové/M-teorie s deseti prostorovými rozměry a jedním rozměrem časovým čili dohromady s jedenácti rozměry časoprostoru.

Nemůžu zapomenout na všudypřítomné ohromené pohledy a vytřeštěné oči na mezinárodní konferenci o strunové teorii konané na Univerzitě jižní Kalifornie v roce 1995, na níž Witten poprvé ohlásil některé z těchto výsledků, tedy první výstřely revoluce, které dnes říkáme druhá superstrunová.* Pro naše vyprávění o multivesmíru budou nejdůležitější brány. S jejich pomocí se badatelé dostali k nové odrůdě paralelních vesmírů.

Brány a paralelní světy

Nejčastěji si struny představujeme jako ultramalinké objekty: právě kvůli této jejich vlastnosti je obtížné je testovat. Jak jsme ale zmínili ve 4. kapitole, nemusí nutně jít o struny nepatrné. Jejich délka je totiž určena jejich energií. Energie spojená s hmotnostmi elektronů, kvarků a dalších známých částic je tak nízká, že odpovídající struny by skutečně byly drobounké. Když však do struny napumpujete dostatek energie, roztáhne se. Na Zemi ani zdaleka nemáme takové nástroje, s nimiž by to bylo možné, ale toto omezení je dané dnešním stavem technologií. Odpovídá-li strunová teorie skutečnosti, dokáže pokročilá civilizace natáhnout struny do jakékoli velikosti. I přirozené kosmologické jevy mohou dát povstat dlouhým strunám; ty se například mohou navinout okolo části prostoru, jež se při kosmologickém rozpínání nafoukne, a proto se takto uvízlé struny natáhnou také. Jednou z možných a hledaných experimentálních známek, shrnutých tabulkou na straně 92 a 93, jsou gravitační vlny, které mohou být vyslány strunami vibrujícími v dalekých končinách vesmíru.

I vícerozměrné brány mohou být, stejně jako struny, velké. A tím se otvírá zcela nový možný strunový pohled na kosmos. Představte si strunu dlouhou stejně jako elektrický kabel, který se táhne, kam až lze dohlédnout. K tomu přidejte velkou dvoubránu podobnou obřím ubrusu nebo gigantické vlajce, jejíž povrch je nekonečný. Obě tyto představy lze snadno umístit do třírozměrného prostoru, který známe z běžného života.

Je-li tříbrána ohromně velká, a třeba i nekonečně velká, situace se mění. Taková tříbrána by *vyplnila* prostor, který obýváme, podobně jako voda vyplňuje obrovské akvárium. Kvůli její všudypřítomnosti je tedy vhodnější takovou tříbránu považovat nikoli za objekt umístěný někde v našich třech prostorových rozměrech, ale za substrát prostoru samotného. Tuto tříbránu bychom mohli obývat stejně, jako rybičky obývají vodu v akváriu. Prostor, přinejmen-

* Za první revoluci jsou považovány práce Johna Schwarzera a Michaela Greena, které v roce 1984 odstartovaly moderní epochu disciplíny.

ším ten, v němž žijeme, by tedy měl mnohem materiálnější strukturu, než si obecně představujeme. Prostor by se stal věcí, objektem či entitou – tříbránou. Když běžíme nebo procházíme se, když žijeme a dýcháme, pohybujeme se uvnitř tříbrány. Strunoví teoretici tomu říkají *scénář bránových světů*.

Tímto pojmem vstupují paralelní vesmíry do strunové teorie.

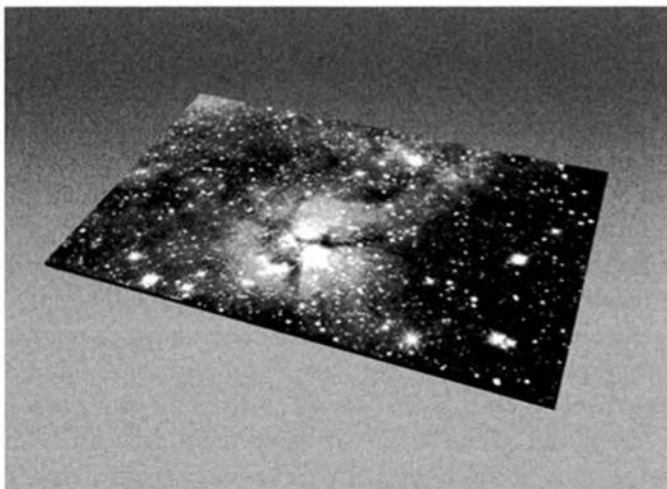
Zatím jsem se soustředil na vztah mezi tříbránami a třemi prostorovými rozměry. To proto, že jsem chtěl nalézt styčné body se známým světem každodennosti. Podle teorie strun však existuje více prostorových rozměrů. V takovém vícerozměrném objemu lze nalézt dostatek prostoru pro více než jednu tříbránu. Můžeme opatrně začít se dvěma obřími tříbránami. Představit si takovou situaci je pro vás třeba těžké. Pro mě určitě ano. Evoluce nás natrénovala v rozpoznávání objektů, které pro nás představují příležitost nebo nebezpečí a které se nalézají přímo *uvnitř* třírozměrného prostoru. A proto si sice můžeme snadno vybavit dva obyčejné třírozměrné objekty, které okupují dvě oblasti prostoru, ale málokdo si dokáže představit dvě koexistující, ale nezávislé entity, které zcela vyplňují třírozměrný prostor. Vizuální pomůckou, která náš výklad o scénáři bránových světů zjednoduší, je vygumování jednoho prostorového rozměru, takže pak můžeme přemýšlet o životě na gigantické dvoubráně. A aby byla vaše představa ještě konkrétnější, představte si tuto dvoubránu jako obří a mimořádně tenký krajíc chleba.*

Měli byste si uvědomit, že tento krajíc chleba obsahuje všechno, co jsme tradičně nazývali vesmírem – souhvězdí Orionu, mlhovinu Koňská hlava i Krabí mlhovinu, celou Mléčnou dráhu, galaxii v Andromedě, galaxii Sombrero i Vírovou galaxii a další a další –, všechno uvnitř našeho třírozměrného objemu, ať už je to jakkoli daleko, jak je načrtnuto v obrázku *a* na straně 112. Abychom si představili druhou tříbránu, musíme prostě v naší fantazii přidat ještě druhý ohromný krajíc chleba. Kde? Umístěte ho vedle toho našeho, jen ho trochu posuňte ve směru dodatečných rozměrů (obrázek *b*). Pak už je stejně lehké si představit tříbrány tři, čtyři nebo jakýkoli jejich počet. Stačí přidat další krajíce kosmického bochníku. Byť metafora s bochníkem navozuje představu množiny brán, které jsou navzájem rovnoběžné, není těžké vzít v úvahu ani jejich složitější uspořádání. Brány lze namířit libovolným směrem a do modelu vesmíru zahrnout i brány s jiným počtem rozměrů, ať už vyšším nebo nižším.

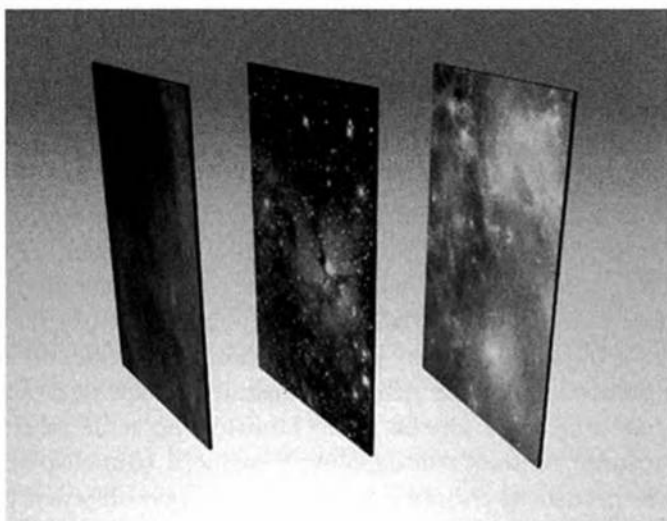
Stejně fundamentální fyzikální zákony by platily v celé skupině brán, protože se vždy odvíjejí od jediné teorie, konkrétně od strunové/M-teorie. Ale stejně jako v případě vesmírných bublin v inflačním multivesmíru mohou být fyzikální vlastnosti jednotlivých brán značně ovlivněny detaily prostředí,

* Pozorný čtenář možná hned poznamená, že krajíc chleba je opravdu třírozměrný (kromě výšky a šířky podél povrchu krajíce má i hloubku ve směru tloušťky krajíce), ale tímto detailem se netrapte. Tloušťka krajíce nám bude připomínat, že chléb je pouhou vizuální pomůckou, jež nám umožní snadnější představu tříbrány.

(a)



(b)



(a) Ve scénáři bránových světů obývá všechno, co jsme tradičně nazývali součástí kosmu, třírozměrnou bránu. V zájmu názornosti jeden rozměr zanedbáváme a představujeme bránový svět jako objekt se dvěma prostorovými rozměry; také ukazujeme jen konečný kus brán, ty však mohou pokračovat donekonečna. **(b)** Vícerozměrný objem prostoru může podle strunové teorie obývat mnoho paralelních bránových světů.

například hodnotou toho či onoho pole prostupujícího prostor, dokonce i počtem prostorových rozměrů definujících bránu. Některé bránové světy se mohou podobat našemu. Na jedné nebo na mnoha z těchto brán by mohly žít bytosti, které jsou si vědomy své existence a které si stejně jako my kdysi myslely, že ten jejich krajíc světa – prostor pokračující do dálky – je celým vesmírem. Ve scénáři bránových světů podle teorie strun však takový názor připomíná zeměpis podle sedláka ze Zlámáné Lhoty. Podle tohoto

scénáře je náš vesmír jen jedním z mnoha, které tvoří *bránový multivesmír*.

Když myšlenka bránového multivesmíru poprvé zazněla ve společnosti strunových teoretiků, většina z nich okamžitě zareagovala případnou otázkou: Vznášejí-li se obří brány hned vedle nás jako krajíce žitného chleba, proč je tedy nevidíme?

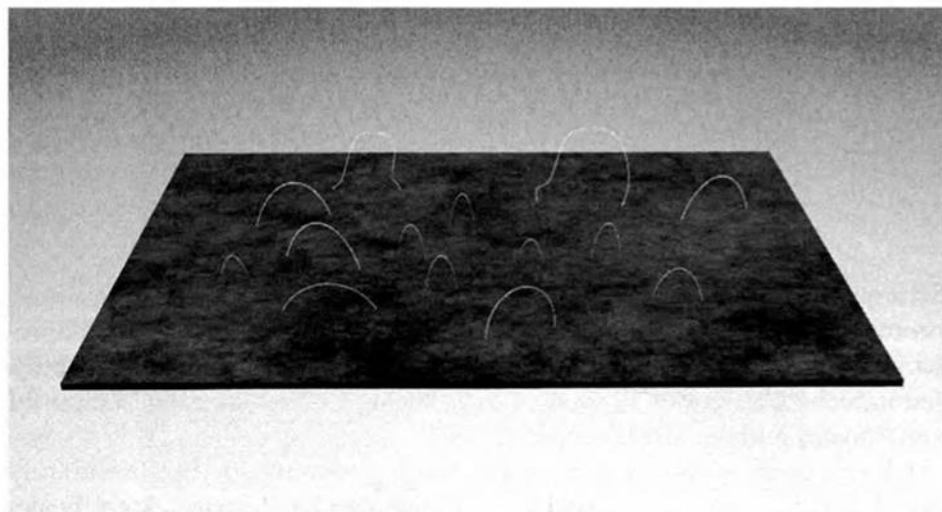
Lepkové brány a chapadla gravitace

Struny mohou mít dva tvary, tvar smyček a úseček. Zatím jsem je nerozlišoval, protože to ani k pochopení mnoha univerzálních vlastností teorie nebylo třeba. Ale v případě bránových světů je rozdíl mezi oběma skupinami podstatný. Jednoduchá ukázka odhalí proč. Mohou struny z brány ulétnout? Odpověď zní: Smyčky mohou. Úsečky nikoli.

Jak si jako první uvědomil proslulý strunový teoretik Joe Polchinski, celý rozdíl závisí na koncových bodech strunové úsečky. Z rovnic, které fyziky přesvědčily, že brány jsou součástí strunové teorie, vyplynulo i to, že struny a brány váže docela konkrétní a důvěrný vztah. Brány jsou totiž jedinými místy v prostoru, na nichž se mohou usadit koncové body strunových úseček (obrázek na straně 114). Matematicky bylo prokázáno, že když se snažím odtrhnout konec struny od brány, snažím se o nemožné – jako kdybych chtěl zmenšit hodnotu π nebo zvětšit hodnotu odmocniny ze dvou. Ve fyzice tomu odpovídá snaha oddělit severní a jižní pól tyčového magnetu. Prostě to nejde. Koncové body strun, a tím vlastně i strunové úsečky, se mohou volně pohybovat uvnitř brán a skrze brány a bez námahy plachtit z místa na místo, opustit tyto brány ale nemohou.

Jestliže jsou tyto myšlenky něčím víc než jen zajímavou matematikou a jestliže všichni žijeme na bráně, potom právě teď pocítujete sevření, kterým brána působí na koncové body strun jako svěrák. Zkuste z této tříbrány vyskočit. A potom znovu a s větší vervou. Obávám se, že stále zůstáváte zde. V bránovém světě patří struny, z nichž se skládáte vy i zbytek obyčejné hmoty, do skupiny úseček. Zatímco můžete skákat nahoru a dolů, házet míček od jedné čáry k druhé a posílat zvuk od rádia k uchu, aniž by proti tomu brána vyvinula jakýkoli odpor, *vzdálit se od brány nemůžete*. Kdykoli se pokusíte odskočit, koncové body strun ve vašem těle vás nesmlouvavě k bráně připoutají. Svět kolem nás by mohl být deskou vznášející se ve vícerozměrném prostoru, ale my bychom byli trvale uvězněni a neschopni zkoumat větší kosmos mimo bránu.

Stejný závěr platí i pro částice, jimiž se přenášejí tři negravitační síly. Rozbor ukazuje, že i tyto částice patří mezi strunové úsečky. Nejznámější mezi nimi, fotony, jsou obstaravatelé elektromagnetické síly. Viditelné světlo, které je tokem fotonů, může proto volně bránou prolétávat, od tohoto textu k vašim očím i z galaxie v Andromedě do Wilsonovy observatoře, ale ani ono unik-



Brány jsou jedinými místy, na nichž mohou spočívat koncové body strunových úseček.

nout nemůže. Jiný bránový svět se může vznášet milimetry od nás, ale poněvadž světlo nemůže mezeru mezi námi a tímto světem přeskočit, nikdy nemáme možnost zahlédnout ani nejnepatrnější náznak existence druhé brány.

Jedinou silou, která se v tomto ohledu odlišuje, je gravitace. Gravitony, jak jsme uvedli ve 4. kapitole, se od ostatních nosičů sil liší spinem 2, tedy dvojnásobkem hodnoty strunových úseček (jako fotonů), které zprostředkovávají negravitační síly. To, že gravitony mají dvojnásobný spin, můžeme názorně vysvětlit tak, že vznikly z páru úseček, přičemž konce jedné jsou spojeny s konci druhé, takže obě úsečky tvoří smyčku. A jelikož smyčky nemají žádné konce, brány je nejsou s to polapit. Gravitony tedy mohou bránový svět opustit a zase se do něho vrátit. Ve scénáři bránových světů nám tedy gravitace poskytuje jediný způsob, jak bychom se mohli podívat mimo náš třírozměrný prostor.

Toto pozorování hraje důležitou úlohu v některých potenciálních testech teorie strun, které jsme zmínili ve 4. kapitole (v tabulce na stranách 92–93). V osmdesátých a devadesátých letech, ještě než do hry vstoupily brány, fyzici očekávali u dodatečných rozměrů teorie strun velikost srovnatelnou s Planckovou délkou (poloměr je blízký 10^{-35} metru), což je přirozená jednotka vzdálenosti v teorii kombinující gravitaci s kvantovou mechanikou. Ale ve scénáři bránových světů se lze takovému závěru vyhnout. Je-li gravitace, ta vůbec nejslabší známá síla, jediným nástrojem, s nímž lze nahlédnout mimo tři dobře známé rozměry, potom tyto rozměry, byť jsou třeba o hodně větší, našim smyslům uniknou. Zatím.

Jestliže dodatečné rozměry existují, a jsou-li *mnohem* větší, než se dříve věřilo – třeba i miliardu miliard miliardkrát větší (asi jeden mikrometr) –, potom

experimenty zkoumající sílu gravitace (druhá položka tabulky na straně 92) mají naději tyto rozměry objevit. A jestliže se objekty gravitačně přitahují, vyměňují si gravitony, neviditelné posílčky zprostředkovávající působení gravitace. Čím více gravitonů si objekty vymění, tím silnější je vzájemné gravitační přitahování. Když některé z těchto gravitonů uniknou z naší brány a rozptýlí se do dodatečných rozměrů, rozředí tím gravitační přitažlivost mezi objekty. Čím větší dodatečné dimenze jsou, tím výraznější je toto rozředění a tím slabší se gravitace bude zdát. Pečlivým změřením gravitační síly mezi dvěma objekty, jejichž vzdálenost je menší než velikost těchto dodatečných rozměrů, chtějí experimentátoři zachytit gravitony ještě předtím, než z naší brány uniknou; v tomto případě by pokusy měly naměřit gravitační sílu, která je odpovídajícím způsobem vyšší. Byť jsem to ve 4. kapitole neuvedl, závisí tedy tento způsob, jak dodatečné rozměry objevit, na scénáři bránových světů.

Skromnější zvýšení velikosti dodatečných rozměrů, asi na 10^{-20} metru, by zase umožnilo Velkému hadronovému srážeci (LHC) nalézt jejich otisky. Jak ukazuje třetí položka v uvedené tabulce, mohou vysokoenergetické srážky protonů do dodatečných rozměrů vyvrhnout trosky a to se v našich rozměrech projevuje jako zdánlivý úbytek energie, který lze zaregistrovat. I tento experiment předpokládá scénář bránových světů. Údaje ukazující na úbytek energie by byly vysvětlitelné tak, že náš vesmír existuje na bráně a že ty trosky, které jsou schopny se od brány odlepit – gravitony – chybějící energii odnesly pryč.

I vidina miniaturních černých děr (čtvrtá položka v uvedené tabulce) je vedlejším produktem bránových světů. Velký hadronový srážecí (LHC) by mohl takové černé díry vytvořit jen tehdy, když charakteristická síla gravitace stoupá, zkoumáme-li ji na krátkých vzdálenostech. Jako v předchozích případech je scénář bránových světů nezbytnou podmínkou.

Tyto podrobnosti vrhají na tři výše zmíněné experimenty nové světlo. Nejenže tyto experimenty pátrají po známkách existence takových exotických objektů, jako jsou malinké černé díry nebo dodatečné rozměry prostoru, hledají i důkazy toho, že žijeme na bráně. Případný kladný výsledek by tedy nejen víceméně potvrdil scénář bránových světů ze strunové teorie, ale poskytl by i nepřímý důkaz existence vesmírů vně toho našeho. A prokážeme-li, že žijeme na bráně, nedává nám matematika žádný dobrý důvod věřit, že naše brána je ta jediná.

Čas, cykly a multivesmír

Multivesmíry, s nimiž jsme se zatím v našem výkladu setkali, mají navzdory všem rozdílům jedno společné. Ve všech třech, v sešivaném, inflačním i bránovém multivesmíru, se ostatní vesmíry nacházejí „někde tam“ v prostoru. V sešivaném multivesmíru znamená „někde tam“ velmi daleko ve smyslu každodenního slovníku; v inflačním vesmíru to znamená mimo naši vesmírnou

bublinu, za rychle se rozpínající příhraniční oblastí, jež nás od jiných bublin odděluje – v bránovém multivesmíru pak pravděpodobně leží malý kousek vedle nás –, ale od našeho světa je odděluje mezera ve směru dodatečného prostorového rozměru. Nepřímé důkazy scénáře bránových světů by nás ale přiměly vážně se zamyslet nad dalším typem multivesmíru, takového, ve kterém se světy mohou vyskytovat daleko od sebe nejen v prostoru, ale i v čase.⁶

Od Einsteinových dob víme, že prostor a čas se mohou kroutit, zakřivovat a napínat. Ale většinou nemluvíme o tom, že je celý vesmír unášen jedním nebo druhým směrem. Co by nakonec mohlo znamenat, že se celý vesmír přesouvá tři metry „vlevo“ nebo „vpravo“? Je to pořádný hlavolam, z něhož ovšem v kontextu scénáře bránových světů vyprchá veškerá fantazie. I brány se, stejně jako částice a struny, nepochybně mohou pohybovat v prostředí, které obývají. Pokud je tedy pozorovatelný vesmír tříbránou, mohli bychom také plachtit vícerozměrným prostorem.*

Jsmo-li na takové plachtící bráně a jsou-li v okolí brány další, co by se stalo, kdybychom do jedné z nich narazili? Ačkoli ještě nebyly vědecky rozebrány všechny podrobnosti, můžete si být jistí, že kolize mezi dvěma bránami – srážka dvou vesmírů – by byla divokou událostí. Nejjednodušším příkladem by byly dvě rovnoběžné tříbrány, které by se přibližovaly stále víc k sobě a nakonec by se čelně – jako dva činely – srazily. Ohromná energie uložená v jejich relativním pohybu by se proměnila v ohnivý gejzír částic, které by všechny známky organizovaných struktur na obou bránách vyhladily.

Z pohledu několika badatelů – zvláště Paula Steinhardta, Neila Turoka, Burta Ovruta a Justina Houryho – by tato katastrofa byla nejen koncem, ale i začátkem. Ohromně horké a husté prostředí naplněné částicemi připomíná podmínky chvíli po velkém třesku. A možná by tedy obě brány touto kolizí vymýtily všechny struktury vytvořené v průběhu celé předchozí historie, od galaxií přes planety k lidem, a připravily jeviště pro kosmické znovuzrození. A opravdu – tříbrána vyplněná žhavým plazmatem částic a záření reaguje stejně, jako by reagoval obyčejný třírozměrný prostor: rozpíná se. Přitom se prostředí ochlazuje a dovoluje částicím, aby se shlukovaly, a tak nakonec daly povstat novému pokolení hvězd a galaxií. Podle některých vědců by bylo vhodným názvem pro takovou recyklaci vesmírů *velké plesknutí*, anglicky *big splat*.

I když slovo „plesknutí“ evokuje jisté správné představy, přehlídí jednu důležitou vlastnost kolizí brán. Steinhardt a jeho spolupracovníci tvrdili, že když se brány srazí, nezůstanou přilepeny k sobě, ale odrazí se od sebe. Gravitační síla, kterou na sebe působí, potom postupně zpomalí jejich vzájem-

* Mohli byste pokračovat otázkou, zda se může pohybovat i celý vícerozměrný prostor. Ať zní tato otázka jakkoli zajímavě, pro naše povídání není podstatná.

ný pohyb; v určitém bodě jejich vzdálenost dosáhne maxima a brány se opět začnou přibližovat. Přitom obě přidávají na rychlosti, srazí se a ohnivou bouří tím vyvolanou se podmínky na obou bránách znovu vrátí do původního stavu, aby tak započaly novou etapu kosmologické evoluce. Podstatou tohoto kosmologického modelu jsou tedy světy, jejichž historie se v čase periodicky opakuje, a tím rodí novou odrůdu paralelních vesmírů – *cyklický multivesmír*.

Jestliže žijeme na bráně v cyklickém multivesmíru, další členské vesmíry mimo partnerskou bránu, s níž se periodicky srážíme) musely existovat i v naší minulosti nebo budou existovat v budoucnosti. Steinhardt a jeho spolupracovníci odhadli dobu trvání celého cyklu srážejícího se kosmického tanga – zrod, vývoj a smrt – na jeden bilion let. V jejich scénáři by ten náš vesmír byl pouze posledním v časové posloupnosti vesmírů, z nichž některé obsahovaly inteligentní život a kulturu jím vytvořenou, ale byly už před dlouhou dobou zničeny. V příhodnou dobu by i všechny příspěvky naše a ty od dalších forem života vyskytujících se v našem vesmíru byly podobným způsobem vymazány.

Minulost a budoucnost cyklických vesmírů

Ačkoli je přístup postavený na bránových světech nejrafinovanějším ztělesněným cyklického vesmíru, cyklické kosmologické modely mají dlouhou historii. Rotace Země kolem osy, která vede k pravidelnému střídání dne a noci, stejně jako pravidelný oběh naší planety okolo Slunce, jemuž vděčíme za střídání ročních období, jsou předzvěstmi pokusů o cyklické vysvětlení vesmíru, s nímž se setkáme v mnoha kulturách. Jeden z nejstarších předvědeckých kosmologických modelů, který vzešel z hindské tradice, hovořil o celé hierarchii do sebe vložených kosmologických cyklů, které podle některých interpretací mohou trvat miliony až biliony let. I myslitelé na Západě, počínaje před-sokratovským filozofem Herakleitem a římským státníkem Ciceronem, přišli se svou troškou do mlýna. Vesmír strávený ohněm, který poté jako pták Fénix znovu povstane z doutnajících uhlíků, byl populární mezi těmi, kdo řešili tak ezoterické otázky, jako je původ vesmíru. Třebaže s rozmachem křesťanství získala postupně navrch představa o jednorázové a jedinečné genezi, přitahovaly cyklické teorie ojedinele pozornost i nadále.

V moderní vědecké epoše byly cyklické vesmíry zkoumány už od okamžiku, kdy do výzkumu kosmologie promluvila obecná relativita. Alexandr Fridman vydal v Rusku v roce 1923 populární knihu, podle níž některá řešení Einsteinových gravitačních rovnic naznačují, že oscilující vesmír se rozpíná, docílí maximální velikosti, smršťuje se, zkolabuje do „bodu“ a potom se začne rozpínat nanovo.⁷ V roce 1931, když už zavrhl svůj model statického vesmíru, zkoumal možnost oscilujícího vesmíru i samotný Einstein. Nejpodrobnější ze všech prací byla série článků publikovaných Richardem Tolmanem z Kaliforni-

ského technického institutu (Caltech) mezi lety 1931 a 1934. Ten se cyklickým kosmologickým modelům věnoval opravdu důkladně a matematicky. Jeho výzkumem započal příval podobných studií, často kroužících ve stojatých vodách fyziky, ale někdy vyubílavajících na hladinu, který trvá dodnes.

Cyklické kosmologické modely částečně vděčí za svou popularitu zdánlivé schopnosti vyhnout se zapeklité otázce, jak vlastně vesmír začal. Plyne-li vesmír od jednoho cyklu k dalšímu a tyto cykly se střídaly vždycky (a možná vždycky budou), potom se lze problému ohledně jeho definitivního začátku vyhnout. Každý cyklus má svůj vlastní začátek a teorie nabízí jeho konkrétní fyzikální příčinu: konec cyklu předchozího. Na otázku, jak začala celá posloupnost cyklů, dostáváte odpověď, že žádný takový společný začátek neexistuje, protože se cykly opakovaly odjakživa.

V jistém smyslu jsou cyklické modely pokusem, jak nakrmit vlka, aby koza zůstala celá. V raných letech vědecké kosmologie poskytovala teorie *stacionárního stavu* vlastní fintu, jak se vyhnout otázce počátku vesmíru. Podle ní totiž vesmír neměl počátek, přestože se rozpíná: jak se vesmír nafukuje, nový prázdný prostor se nepřetržitě zaplňuje nově vytvořenou hmotou, čímž konstantní podmínky ve vesmíru zůstanou navěky. Astronomická pozorování ovšem tuto teorii vyvrátila, když přinesla pádné důkazy pro to, že v dávných epochách se vesmír od toho dnešního zásadně lišil. Nejkriklavější byla pozorování úplně prvních kosmologických epoch, které měly daleko do stacionárnosti, protože byly prokazatelně chaotické a výbušné. Sny o stacionárním stavu podkopává velký třesk. Vynáší otázku zrodu zpět do popředí. Právě tady nabízí cyklické kosmologie přesvědčivou alternativu. Každý cyklus *může* – v souladu s astronomickými údaji – zahrnovat minulost podobnou velkému třesku. A tím, že za sebe seřadí nekonečný počet cyklů, se tato teorie stále vyhýbá povinnosti vysvětlit úplný začátek. Zdálo by se, že cyklické kosmologie kombinují nejvíce nepřitažlivější rysy modelů stacionárního stavu i velkého třesku.

V padesátých letech poukázal však nizozemský astrofyzik Herman Zanstra na jistou problematickou vlastnost cyklických modelů. Byl si jí v podstatě vědom i Tolman ve svých rozborech o desítky let dříve. Zanstra ukázal, že nekonečně mnoho cyklů ten náš předcházet nemohlo. Argumentoval hlavně druhým termodynamickým zákonem. Tento zákon, jemuž budeme věnovat více místa v 9. kapitole, stanoví, že nepořádek – *entropie* – musí s časem narůstat. Je to fakt, který běžně pociťujeme. Kuchyně, byť ráno jakkoli uklizené, se ještě před soumrakem vždycky nějak dostanou do stavu nepořádku; totéž platí pro prádelní koše, stoly a dětské pokoje. V těchto případech je nárůst entropie jen nepříjemností; v cyklické kosmologii však hraje roli rozhodující. Jak si Tolman sám všiml, rovnice obecné relativity svazují obsah entropie ve vesmíru s trváním daného cyklu. Více entropie znamená, že více rozptýlených částic se při smrštnutí vesmíru tlačí k sobě; v důsledku toho se vesmír odrazí a začne znovu rozpínat s větší vervou, docílí tak většího maximálního

objemu, a proto bude následující cyklus trvat déle než cyklus předchozí. Při pohledu z dnešní perspektivy do minulosti druhý termodynamický zákon zaručuje, že starší a starší cykly měly stále menší a menší entropii (podle druhého zákona totiž entropie roste do budoucnosti a musí klesat do minulosti),* a proto trvaly stále kratší a kratší dobu. S trochou matematiky Zanstro ukázal, že dostatečně dávné cykly trvaly tak krátce, že vlastně jako by ani nebyly. Vesmír by tedy *měl* počátek.

Steinhardt a kolegové tvrdí, že jejich nová verze cyklické kosmologie se tomuto úskalí vyhýbá. V jejich přístupu se cyklicky nemění velikost vesmíru, který by se rozpínal, smršťoval a znovu rozpínal, ale *vzdálenost* mezi bránovými světy – roste, klesá a pak zase roste. Brány samotné se přitom stále rozpínají – a dělají to v průběhu každého jednotlivého cyklu. Entropie od cyklu k cyklu přibývá právě tak, jak to druhý zákon vyžaduje, ale protože se brány rozpínají, entropie se rozptyluje do stále větších objemů. Úhrnná entropie tedy roste, zato *hustota* entropie klesá. Ke konci každého cyklu je entropie natolik zředěná, že její hustota klesá velmi blízko k nule – vesmír se tak dokonale obnoví. A proto cykly mohou, na rozdíl od Tolmanovy a Zanstrovy analýzy, pokračovat nekonečně dlouho do budoucnosti i do minulosti. Cyklický vesmír s bránovými světy nevyžaduje, aby měl čas začátek.⁸

S představou cyklického multivesmíru se starým hlavolamům vyhneme snadno. Jak ale jeho advokáti poznamenávají, nespokojuje se jen s rozřešením kosmologických hlavolamů; nabízí i konkrétní předpovědi, které ho odlišují od široce přijímaného inflačního paradigmatu. V inflační kosmologii by dramatická vlna rozpínání raného vesmíru porušila tkaninu prostoru natolik důkladně, že by to vyvolalo dost silné gravitační vlny. Ty by zanechaly stopy v reliktním záření, o jejichž zachycení dnes usilují vysoce citlivé přístroje. Kolize brán naproti tomu vytváří na okamžik obrovský vír. Ten ale nerozpíná prostor stejně impozantně jako inflace, a proto by vznikly nanejvýš slabé gravitační vlny, jež by nezanechaly trvalý signál. Nalezení gravitačních vln vzniklých v raném vesmíru by tedy bylo pádným argumentem proti cyklickému multivesmíru. Naopak neúspěšné snahy o zpozorování takových gravitačních vln by zásadně zpochybnily velkou množinu inflačních modelů a zvýšily by přitažlivost modelů cyklických.

Povědomí fyzikální obce o cyklickém multivesmíru je vysoké, stejně vysoká je však úroveň skepse vůči němu. To by mohla změnit pozorování. Jestliže se známky bránových světů vynoří na Velkém hadronovém srážeci (LHC) a jestliže známky gravitačních vln z raného vesmíru se polapit nepodaří, může se cyklický multivesmír dočkat větší podpory.

* Čtenářům obeznámeným se záhadou šipky času se musím svěřit, že předpokládám, v souladu s pozorováními, že entropie klesá směrem do minulosti. Podrobný výklad najdete ve *Struktuře vesmíru*, 6. kapitola.

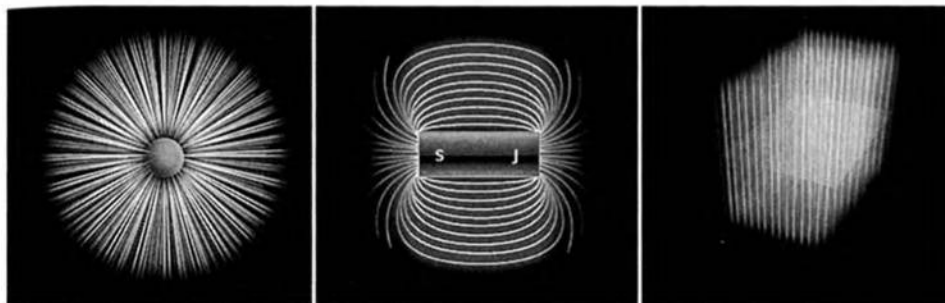
Toky

Matematický poznatek, že teorie strun neobsahuje jenom struny, ale i brány, značně ovlivnil výzkum v této disciplíně. Scénář bránových světů a multivesmíry, které z něho vzešly, jsou příkladem oblasti výzkumu, která má potenciál zásadně změnit náš pohled na realitu. Bez přesnějších matematických metod vyvinutých za posledních patnáct let by většina těchto poznatků zůstala v nedohlednu. Nicméně hlavní problém, jenž – jak fyzici doufali – měl být s pomocí exaktnějších metod pokořen, úkol vybrat správný tvar dodatečných rozměrů z té předlouhé řady kandidátů nalezených v teoretických rozborech, vyřešen nebyl. Spíše naopak. Nové metody fakticky tento problém ještě více zproblematizovaly. Vyústily v objevení obrovité množiny možných tvarů, které dodatečné rozměry mohou mít, čímž zástupy kandidátů nesmírně rozmnožily, aniž by fyzikům nějak poradily, jak vybrat toho správného.

Stěžejní se v této evoluci stala vlastnost brán známá jako *tok*. Právě tak jako elektron vytváří elektrické pole nebo elektrickou „mlhu“, která prostupuje okolím, a jako magnet vybuduje pole magnetické, magnetickou „mlhu“, vyplňující okolí, je brána původcem *bránového pole*, tedy bránové „mlhy“, která proniká oblastí jako na obrázku na straně 121 nahoře. Když Faraday začal na počátku 19. století s prvními experimenty s elektrickými a magnetickými poli, vyjádřil jejich sílu číselně tak, že načrtl siločáry v dané vzdálenosti od zdroje a celkový počet siločar procházejících určitou plochou nazval *tokem*. Jeho termín se od té doby hezky zabydlel ve fyzikálním slovníčku. Síla bránového pole je určena i tokem, který brána vytváří.

Strunoví teoretici, jako je Raphael Bousso, Joe Polchinski, Steven Giddings, Shamit Kachru a mnozí další, si uvědomili, že úplný popis dodatečných rozměrů v teorii strun vyžaduje nejen znalost jejich tvaru a velikosti – na což se badatelé v této disciplíně, včetně mě, téměř výlučně soustředili v osmdesátých letech a na začátku devadesátých let –, ale *také* informaci o bránových tocích, které dodatečnými rozměry prostupují. Rád bych to teď v krátkosti přiblížil.

Od prvních matematických prací zkoumajících dodatečné rozměry ve strunové teorii věděli badatelé, že Calabiho-Yauovy tvary obvykle obsahují velký počet dutých oblastí podobných prostoru uvnitř nafukovacího míče, díře ve věnečku nebo dutině ve vyfukované skleněné soše. Ale teprve v prvních letech nového tisíciletí si teoretici uvědomili, že tyto duté oblasti nemusejí být zcela prázdné. Mohou na ně být nabaleny brány jednoho nebo druhého typu a mohou být prošpikovány toky (jako na obrázku na straně 121 dole). Předchozí výzkum (shrnutý například v *Elegantním vesmíru*) většinou zkoumal pouze „holé“ Calabiho-Yauovy tvary, na nichž všechny „ozdoby“ chyběly. Když si fyzici uvědomili, že každou Calabiho-Yauovu varietu lze „obléct“ do těchto dalších vlastností, objevili nesmírně velkou sbírku pozměněných tvarů dodatečných rozměrů.



Elektrický tok vytvořený elektronem, magnetický tok vytvořený tyčovým magnetem a bránový tok vytvořený bránou.

Přibližný výpočet nám poskytne povědomí o tom, jak je tato sbírka velká. Soustředte se na toky. Stejně jako kvantová mechanika ukazuje, že fotonová i elektronová hmota je rozdělena do diskrétních jednotek – můžete mít 3 fotony a 7 elektronů, ale nikoli 1,2 fotonu ani 6,4 elektronu –, tak z ní plyne i to, že i toky musejí tvořit diskrétní balíčky. Mohou zaplnit okolní prostor jednou, dvakrát, třikrát a tak dále. A až na podmínku celočíselnosti nejsou v principu nijak omezeny. V praxi tok, je-li velký, podstatně naruší Calabiho-Yauovu varietu – a dříve spolehlivé matematické metody se stanou nepřesnými. Aby se těmto turbulentním matematickým vodám vyhnuli, uvažují badatelé většinou pouze o tocích, jejichž hodnota je přibližně rovna deseti nebo menšímu číslu.⁹

To znamená, že když daná Calabiho-Yauova varietu obsahuje jednu dutou oblast, lze ji zaplnit tokem deseti různými způsoby, čímž získáme deset tvarů pro dodatečné rozměry. Jestliže jsou v daném Calabiho-Yauově tvaru také dvě oblasti, získáme $10 \cdot 10 = 100$ různých způsobů, jak tvar zaplnit toky



Na část skrytých rozměrů v teorii strun se mohou nabalit brány a mohou jimi pronikat toky, takže vznikají „oblečené“ Calabiho-Yauovy tvary. (Obrázek zachycuje zjednodušenou verzi Calabiho-Yauova tvaru – „věneček se třemi dírami“ – a schematicky znázorňuje nabalené brány a tokové čáry jako proužky světlejší barvy, které obepínají různé části variety.)

(10 možných toků skrze první oblast lze spárovat s 10 možnostmi skrze druhou oblast); v případě tří dutých oblastí existuje 10^3 různých „oblečků“ a tak dále. Jak vysoko se počet „oblečků“ může vyšplhat? Některé Calabiho-Yauovy tvary mají kolem 500 dutých oblastí. *Stejnými úvahami dospíváme přibližně k 10^{500} různých tvarů dodatečných rozměrů.*

Místo aby oddělily zrno od plev a vybraly mezi kandidáty jen několik málo tvarů dodatečných rozměrů, poskytly rafinovanější matematické metody nevidanou přemíru nových možností. Calabiho-Yauovy tvary se zničehonic mohou obléct do většího počtu „šatiček“, než kolik je částic v pozorovatelném vesmíru. Tento fakt vyvolal u některých strunových teoretiků pocit úzkosti. Jak jsme zdůrazňovali v předchozí kapitole, matematika strunové teorie ztrácí svou schopnost předpovídat, neexistuje-li způsob, jak vybrat přesný tvar dodatečných rozměrů – což zahrnuje i „šatičky“, do nichž se tvar může obléct, jak si dnes uvědomujeme. Do matematických metod, které dovolí překročit omezení poruchové teorie, se vkládaly velké naděje. Bohužel když se některé tyto metody poprvé uplatnily, problém s určením tvaru dodatečných rozměrů se ještě prohloubil. A část strunových teoretiků klesla na mysl.

Další, optimističtější strunoví teoretici věří, že je příliš brzy na to, vzdávat se naděje. Jednoho dne, a třeba je ten den za rohem anebo je velmi daleko, objevíme chybějící princip udávající, jak dodatečné rozměry vypadají, včetně toků, které okázale nosí.

Třetí skupina fyziků z poznatku vyvodila radikálnější závěr. Tvrdí, že bychom po desítkách let bezvýsledného hledání správného tvaru dodatečných rozměrů měli nalézt úplně nové poučení. Možná, pokračují tito radikálové bezostyšně, bychom měli vzít vážně *všechny* možné tvary a toky, které se vynořují z matematiky teorie strun. Možná, apelují na naše city, obsahuje matematika všechny tyto možnosti proto, že *jsou všechny reálné* a každý tvar je vícerozměrnou částí svého vlastního, odděleného vesmíru. A možná je právě tohle třeba k vyřešení problému snad ze všech nejožehavějšího: problému kosmologické konstanty. Je-li tomu tak, potom se už dnes zdánlivě nespoutané fantazie těchto buřičů opírají o experimentální údaje.

Kapitola šestá

Nový pohled na jednu starou konstantu

Multivesmír a krajina

Rozdíl mezi 0 a 0,00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 001 se nezdá velký. A podle většiny kritérií ani není. A přesto sílí podezření, že tento malý rozdíl je zodpovědný za radikální posun našeho náhledu na krajinu reality.

To nepatrné číslo bylo poprvé naměřeno v roce 1998 dvěma týmy astronomů, kteří pozorně sledovali explodující hvězdy ve vzdálených galaxiích. Od té doby byly výsledky obou týmů ověřeny mnoha dalšími vědci. Co je to za číslo a proč je kolem něho tolik povyku? Hromadí se důkazy, že je tím, co jsem dříve nazýval třetí řádkou v daňovém formuláři obecné relativity: Einsteinova kosmologická konstanta, která určuje množství neviditelné, skryté (temné), energie zaplavující tkaninu prostoru.

Jak tento výsledek úspěšně prochází stále přísnějšími prověrkami, získávají fyzici větší jistotu, že desítky let předchozích pozorování a teoretických úsudků, které přesvědčily většinu vědců o tom, že kosmologická konstanta je 0, byly anulovány. Teoretici se rychle pustili do hledání chyby. Ale nikdo na ni nepřišel. O několik let dříve bylo provokující posloupností úvah navrženo, že jednoho dne může být nalezena nenulová kosmologická konstanta. Z čeho takové úvahy pramenily? Především z předpokladu, že žijeme v jednom z mnoha vesmírů. *Velmi* mnoha.

Návrat kosmologické konstanty

Vzpomeňte si, že existuje-li kosmologická konstanta, vyplňuje prostor homogenní neviditelnou energií – skrytou energií* –, jejímž nejslavnějším produktem

* Jedna jazyková poznámka. Po většinu času mluvím o „kosmologické konstantě“ a o „skryté energii“ jako o synonymech. Když potřebuji nějaký výrok zpřesnit, hovořím o hodnotě kosmologické konstanty – chci tím něco říct o *množství* skryté energie, která vyplňuje prostor. Jak jsem zmínil dříve, fyzici používají pojem „skrytá energie“ trochu velkoryseji pro cokoli, co může vypadat jako kosmologická konstanta nebo co ji může imitovat po delší časové úseky, ale co se může i měnit v čase, a tudíž to nemusí být opravdová konstanta.

je odpudivá gravitační síla. Einstein se této myšlenky chopil v roce 1917; tehdy antigravitaci kosmologické konstanty přisoudil úkol vyvážit jinak přitažlivou gravitační sílu od obyčejné hmoty ve vesmíru a tak zbavit vesmír povinnosti rozpínat se nebo smršťovat.

Od celé řady lidí jsme mohli slyšet, že Einstein, když se v roce 1929 dozvěděl o Hubbleových pozorováních, která prokázala, že se prostor rozpíná, nazval kosmologickou konstantu „největším omylem“ svého života. Jeden rozhovor, v němž právě tohle Einstein údajně řekl, podrobně vylíčil George Gamow, ale vzhledem ke Gamowově zálibě v rozpustilých nadsázkách někteří přesnost jeho podání zpochybnili.¹ Jisté je jen to, že Einstein kosmologickou konstantu ze svých rovnic vypustil, jakmile pozorování poukázala na nesprávnost jeho víry ve statický vesmír; o mnoho let později prohlásil, že „kdyby Hubbleovo rozpínání bylo objeveno v době vzniku obecné teorie relativity, kosmologická konstanta by nikdy nebyla zavedena“.² Ohlédnutí do minulosti však nebývá zárukou ostrozraku; někdy může zamlžit dřívější průzračnost. V roce 1917 Einstein vyjádřil o něco citlivější pohled na otázku ve svém dopise fyziku Willemu de Sitterovi:

„Jedna skutečnost v každém případě zůstává. Obecná teorie relativity *dovoluje* zahrnout kosmologickou konstantu do rovnic pole. Jednoho dne naše reálné znalosti o složení hvězdné oblohy, o zdánlivém pohybu hvězd a o pozici spektrálních čar v závislosti na vzdálenosti možná pokročí natolik, abychom rozhodli, zda je kosmologická konstanta nulová. Přesvědčení je dobrou motivací, ale špatným soudcem.“³

O nějakých osmdesát let později se právě této strategie zhostily dva týmy: tým pracující na projektu supernovové kosmologie vedený Saulem Perlmutterem a tým pátrající po supernovách s velkým rudým posuvem vedený Brianem Schmidtem. Oba týmy studovaly množství *spektrálních čar* – světla vyslaného vzdálenými hvězdami – a přesně tak, jak Einstein předpovídal, byly schopny poskytnout empirická data podstatná pro zodpovězení otázky, zda je kosmologická konstanta nulová.

Ke zděšení mnoha fyziků našli silné důkazy pro to, že nulová není.

Osud vesmíru

Když zmínění astronomové se svými výzkumy začali, nesoustředili se v nich na kosmologickou konstantu. Obě skupiny totiž upřely svou pozornost k měření příbuzné kosmologické veličiny, konkrétně míry zpomalování kosmické expanze. Obyčejná přitažlivá gravitace přitahuje všechny objekty k sobě navzájem, a tak zpomaluje rychlost, jíž se vesmír rozpíná. Přesná míra tohoto zpomalování je klíčová pro předpověď o tom, jaký osud čeká vesmír v daleké budoucnosti. Intenzivní zpomalování by znamenalo, že tempo jeho rozpínání jednou poklesne až k nule, změní znaménko – a začne smršťování prosto-

ru. Kdyby se smršťování nezastavilo, vyústilo by až do *velkého křachu* – opaku velkého třesku – nebo do odražení a dalšího rozpínání jako v cyklických modelech z minulé kapitoly. Méně intenzivní zpomalování by skončilo zcela jinak. Míč vymrštěný dostatečně velkou rychlostí nahoru může uniknout zemské přitažlivosti. Analogicky i prostor se může rozpínat navěky, je-li míra zpomalování kosmické expanze dostatečně nízká. Obě skupiny měřily míru zpomalování, aby rozhodly o konečném osudu našeho vesmíru.

A zvolily jasnou strategii: změřit, jak rychle se prostor rozpínal v různých okamžicích minulosti, porovnat tyto rychlosti a zjistit tak, jak se v průběhu historie vesmíru toto rozpínání zpomalovalo. Dobrá, ale jak to zrealizovat? Jako u řady dalších problémů v astronomii i odpověď na tuto otázku se redukuje na pečlivá měření světla. Galaxie jsou totiž svítící majáky, jejichž pohyb kopíruje rozpínání prostoru. Kdybychom mohli určit, jak rychle se různé vzdálené galaxie od nás vzdalovaly ve chvíli, kdy vyslaly světlo, jež dnes pozorujeme, dozvěděli bychom se, jak rychle se rozpínal prostor v různých okamžicích v minulosti. Srovnáním těchto rychlostí pak oba týmy chtěly zjistit tempo zpomalování. To byla jejich základní myšlenka.

Abychom doplnili podrobnosti, musíme se vypořádat se dvěma otázkami. Jak můžeme z dnešních pozorování vzdálených galaxií určit jejich vzdálenosti a jak jejich rychlosti? Začněme se vzdálenostmi.

Vzdálenost a jasnost

Jedním z nejstarších a nejdůležitějších úkolů v astronomii je určení vzdálenosti nebeských těles. A jednou z nejstarších metod, jak ho splnit, je metoda *paralaxy*, běžně používaná i pětiletými dětmi. Děti bývají občas (na chvíli) přímo hypnotizovány tím, že když střídavě sledují objekt se zavřeným levým a pravým okem, objekt zdánlivě skáče ze strany na stranu. Jestliže jste se už delší dobu nezkoušeli vrátit do věku pěti let, zkuste podržet tuto knihu ve vzduchu a dívat se na jeden její roh. Kniha začne poskakovat, protože se vaše levé a pravé oko – vzhledem k jejich odlišným polohám – musejí natočit do různých směrů, aby se zaměřily na stejné místo. Předměty ve větší vzdálenosti poskakují o méně výraznou vzdálenost, protože je pro ně rozdíl v úhlech menší. Tento jednoduchý postřeh lze vyjádřit matematicky, totiž přesně popsat vztah mezi rozdílem v úhlech, do kterých jsou namířeny dvě oči – paralaxa – a vzdáleností objektu, který sledujete. Výpočtem detailů si nemusíte zatěžovat hlavu; váš zrak to všechno dělá automaticky. Proto nakonec vidíte svět třírozměrně.*

* Tak fungují i technologie třídízenčních filmů: tím, že jsou objekty na dvou snímcích na plátně trochu posunuty v prostoru, filmař ošálí váš mozek; ten pak výsledné paralaxy interpretuje jako různé vzdálenosti a vytvoří tak iluzi třídízenčního prostředí.

Díváte-li se na hvězdy na noční obloze, paralaxa je příliš malá, protože vzdálenost vašich očí je proti vzdálenosti nebeských těles zanedbatelná; nepůsobuje tedy podstatný rozdíl v úhlech. Tento problém lze však chytrě obejít: měřit pozici hvězdy ve dvou chvílích vzdálených od sebe asi šest měsíců; tím užijete místo dvou poloh vašich očí dvě různé polohy Země. Větší vzdálenost mezi body, z nichž pozorujeme, paralaxu zvětší; je stále malá, ale v některých případech je dostatečně velká na to, aby ji šlo změřit. V 19. století soutěžila skupina vědců, kdo z nich jako první hvězdnou paralaxu naměří; vyhrál v roce 1838 německý astronom a matematik Friedrich Bessel. Úspěšně změřil paralaxu k hvězdě známé jako 61 Cygni v souhvězdí Labutě. Rozdíl v úhlech byl 0,000084 stupně; podle toho byla hvězda 10 světelných let daleko.

Od té doby byla metoda soustavně vylepšována a na jejím principu pracují moderní satelity, které měří paralaxu daleko přesněji než kdysi Bessel. Dnes je možné přesně měřit vzdálenost hvězd i několik tisíc světelných let daleko, ale u těch ještě vzdálenějších metoda opět selhává, protože úhlové rozdíly jsou znovu příliš nepatrné.

Další metoda, která má potenciál naměřit ještě větší nebeské vzdálenosti, je založena na ještě jednodušší myšlence: čím dále od vás je zdroj světla, ať už jde o reflektory auta nebo zářící hvězdu, tím více se vyslané světlo na své cestě do vašich očí rozptýlí a tím temnější se bude zdroj zdát. Srovnáním *zdánlivé* jasnosti objektu (jak jasný se jeví při pohledu ze Země) s jeho *absolutní* jasností (jak jasný by se zdál, kdybyste ho sledovali zblízka) lze určit jeho vzdálenost.

Svízel bývá se zjišťováním absolutní jasnosti astrofyzikálních objektů. Je hvězda temná proto, že je velmi daleko, nebo proto, že jednoduše nevysílá tolik světla? Z této otázky je jasné, proč se astronomové dlouho snažili nalézt poměrně rozšířený druh nebeských těles, jejichž jasnost lze spolehlivě určit, aniž by se museli vypravit až k němu. Kdyby takové *standardní svíčky* našli, získali by univerzální pomůcku k zjišťování vzdáleností. To, do jaké jedna standardní svíčka vypadá temnější než druhá, by přímo vypovídalo o tom, o kolik je dále.

Více než století byly navrhovány – a používány – různé typy standardních svíček, některé úspěšně, jiné méně. V moderní době se nejpłodnějším spojením astronomů stal druh hvězdné exploze známý jako supernova typu Ia. Ta se zrodí, když si bílý trpaslík přetáhne materiál z povrchu společníka, nejčastěji červeného obra, okolo něhož obíhá. Detailně propracovaná fyzika struktury hvězd ukazuje, že nasaje-li bílý trpaslík dostatek materiálu (konkrétně když jeho hmotnost vzroste na 1,4 hmotnosti Slunce), neudrží už svou vlastní hmotnost. Takový hvězdný otesánek zkolabuje a spustí tak explozi natolik bouřlivou, že světlo z ní unikající se výkonem vyrovná asi 100 miliardám hvězd ve stejné galaxii.

Takové supernovy jsou ideálními standardními svíčkami. Poněvadž jsou jejich exploze tak silné, lze je sledovat i z fantastických vzdáleností. A ještě důležitější je, že všechny exploze jsou důsledkem stejného fyzikálního procesu – hvězdného kolapsu odstartovaného tím, když bílý trpaslík překročí 1,4násobek hmotnosti Slunce –, a proto tyto supernovy plápolají s téměř totožnou maximální absolutní jasností. Jistou svízelí s metodou supernov typu Ia je to, že v obyčejné galaxii explodují jen jednou za několik stovek let. Jak je potom chytit při činu? Perlmutterův a Schmidtův tým se s tímto problémem vypořádaly způsobem připomínajícím epidemiologické výzkumy, jež přesnou informaci i o relativně vzácných stavech získávají analýzou velkých populací. Podobně dalekohledy vybavené detektory se širokým zorným polem, současně sledující tisíce galaxií, jsou s to nalézt desítky supernov typu Ia, které potom mohou astronomové detailněji pozorovat obvyklejšími dalekohledy. Ze zdánlivé jasnosti vypočítaly oba týmy vzdálenost k desítkám galaxií, které se rozprostírají miliardy světelných let od nás – tím splnily první úkol, který si stanovily.

Kterou vzdálenost vůbec astronomové měří?

Než postoupíme o další krok a určíme rychlost rozpínání v okamžiku každé této exploze, dovoluji mi rozluštit jeden hlavolam, který vás možná mate. Mluvíme-li o vzdálenostech na tak fantasticky velkých měřítkách a v kontextu vesmíru, který se nepřetržitě rozpíná, zákonitě se vynořuje otázka, kterou vzdálenost astronomové vlastně měří. Vzdálenost mezi místy, v nichž se naše a cizí galaxie nacházely před nesmírně dlouhou dobou, konkrétně v době, kdy cizí galaxie právě vysílala světlo, které teď vidíme? Nebo měří vzdálenost mezi naší momentální polohou a místem, v němž se vyskytovala cizí galaxie, když vysílala světlo, které zrovna vidíme? Nebo je to vzdálenost mezi dnešními polohami obou galaxií?

O této otázce a o spoustě podobných matoucích kosmologických otázek nejraději přemýšlím následujícím poučným způsobem.

Představte si, že chcete určit vzdušnou čarou vzdálenosti mezi třemi městy, New Yorkem, Los Angeles a Austinem, a tak měříte jejich vzdálenosti na mapě Spojených států. Zjistíte, že New York je 39 centimetrů od Los Angeles, Los Angeles 19 centimetrů od Austinu a Austin zase 24 centimetrů od New Yorku. Poté pohledem na legendu k mapě, která poskytuje koeficient pro přepočítávání (1 centimetr = 100 kilometrů), převedete tato měření do vzdáleností v reálném světě; vyjde vám pak, že zmíněné tři vzdálenosti jsou 3 900 kilometrů, 1 900 kilometrů a 2 400 kilometrů.

A teď si představte, že se povrch zeměkoule stejnoměrně nafoukl a vzdálenosti se zdvojnásobily. To by jistě byla radikální transformace, ale vaše mapa USA by zůstala zcela v platnosti, kdybyste udělali jednu důležitou změnu:

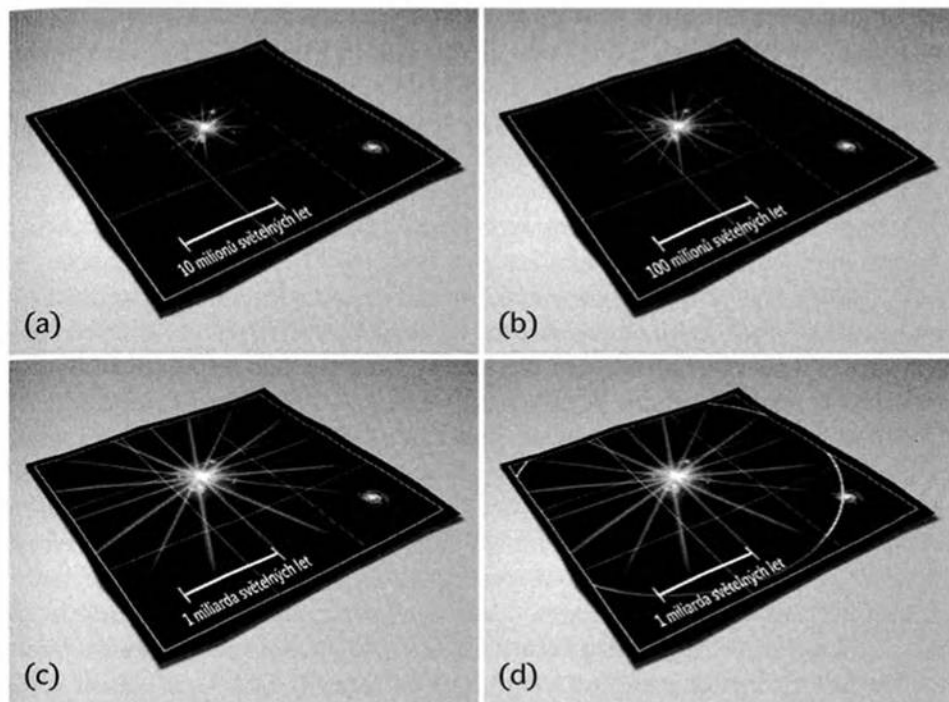
změnili v legendě koeficient pro přepočítávání na „1 centimetr = 200 kilometrů“. Těch 39 centimetrů, 19 centimetrů a 24 centimetrů na mapě by teď odpovídalo podél roztažených Spojených států 7 800 kilometrů, 3 800 kilometrů a 4 800 kilometrů. Kdyby rozpínání Země pokračovalo, mapa by stále zůstávala v platnosti, pokud byste nepřetržitě aktualizovali legendu s měřítkem pečlivě zvoleným pro každý okamžik – 1 centimetr = 200 kilometrů v poledne, 1 centimetr = 400 kilometrů v 16 hodin –, což je třeba k zohlednění toho, že se města kvůli rozpínajícímu se povrchu od sebe vzdalují.

Rozpínající se Země je vhodným modelem, protože podobné úvahy platí i u rozpínajícího se vesmíru. Galaxie od sebe neženou jejich vlastní svaly. Stejně jako města od sebe pádí proto, že substrát, do něhož jsou zasazeny – ať už povrch Země nebo prostor samotný –, se rozpíná. To znamená, že kdyby nějaký kosmický kartograf určil polohy galaxií před miliardami let, jeho mapa by byla stejně platná dnes, jako byla v jeho době.⁴ Legenda ke kosmické mapě se však musí aktualizovat, aby koeficient pro přepočítávání vzdáleností na mapě na ty reálné zůstal přesný. Kosmologickému koeficientu pro konverzi se říká *škálový koeficient* vesmíru; v rozpínajícím se vesmíru škálový koeficient roste s časem.

Kdykoli přemýšlíte o rozpínajícím se vesmíru, doporučuji vám představit si neměnnou kosmickou mapu. Představte si, že jde o obyčejnou mapu na vašem stole, a rozpínání kosmu vezměte do úvahy tak, že jednoduše legendu zaktualizujete. Po troše tréninku zjistíte, že tento přístup dramaticky zjednodušuje všemožné koncepční překážky.

Uvažujte třeba o světle, které k nám doletělo po explozi supernovy ve vzdálené galaxii Noa. Srovnáte-li zdánlivou jasnost s jasností absolutní, měříte tak zředění intenzity světla mezi emisí (obrázek *a* na straně 129) a příjmem (obrázek *c*), způsobené rozptýlením světla po povrchu velké kulové plochy (znázorněné kružnicí na obrázku *d*) během jeho cesty. Změřením míry zředění určíme velikost této plochy – její povrch – a s trochou středoškolské matematiky potom spočítáme poloměr této plochy. Tento poloměr měříme podél celé trajektorie světelných paprsků, takže se číselně rovná celkové vzdálenosti, kterou světlo urazilo. Vracíme se tak k otázce, s níž jsme tuto podkapitulu začali: Které ze tří kandidátských vzdáleností, pokud vůbec některé z nich, odpovídá naše měření?

Cestou světelného paprsku na Zemi se prostor nepřetržitě rozpínal. Jedinou změnou, na niž nesmíme u naší neměnné mapy zapomenout, je pravidelné aktualizování koeficientu v legendě. A protože jsme přijali světlo ze supernovy *právě teď*, protože *právě teď* ukončilo svou cestu, musíme užít škálový koeficient, který je *právě teď* napsán v legendě k mapě, abychom přepočítali vzdálenost na mapě – dráhu od supernovy k nám, nakreslenou na obrázku *d* – do absolutní vzdálenosti, kterou světlo urazilo. Provedeme-li takové měření, je



(a) Světlo ze vzdálené supernovy se cestou k nám rozptyluje (my se nacházíme v galaxii na pravé straně mapy). (b) V té době se vesmír rozpíná, jak lze vyčíst z legendy k mapě. (c) V době, kdy světlo přijímáme, byla jeho intenzita už snížena jeho rozptýlením. (d) Porovnáme-li zdánlivou jasnost supernovy s její absolutní jasností, změříme tím velikost kulové plochy, po níž se světlo rozprostřelo (znázorněná jako kružnice), a tedy i její poloměr. Poloměr kulové plochy lze měřit podél dráhy světla. Je roven nynější vzdálenosti mezi námi a galaxií, v níž supernova explodovala, a to je vzdálenost, kterou lze z pozorování vyvodit.

jasné, že výsledkem je *nynější* vzdálenost mezi naší galaxií a galaxií Noa: tedy třetí a poslední z navržených možností.

Povšimněte si i toho, že poněvadž se vesmír neustále rozpíná, i starší úseky cesty fotonu se poté, co jimi foton proletěl, roztahují. Kdybychom sledovali čáru na fotografii zachycující trajektorii světla, délka této čáry by rostla s tím, jak se vesmír rozpínal. Když se měřítko mapy z okamžiku zachycení světla aplikuje na celou dráhu světla, třetí odpověď z našeho seznamu na počátku výkladu automaticky zahrnuje veškeré takové rozpínání. To je správný postup, protože míra zředění intenzity světla závisí na velikosti kulové plochy, na níž je světlo rozprostřeno *ted*. Do této velikosti je třeba započítat i nárůst způsobený rozpínáním, které nastalo dodatečně.⁵

Srovnáme-li absolutní jasnost supernovy s její zdánlivou jasností, určíme *nynější* vzdálenost mezi námi a galaxií, v níž supernova vzplála. A tyto vzdálenosti změřily obě skupiny astronomů.⁶

Barvy v kosmologii

A to je vše, pokud jde o měření velkých vzdáleností ke galaxiím, v nichž vybuchují oslňující supernovy typu Ia. Jak ale zjistit tempo rozpínání vesmíru v dávné historii vesmíru, kdy tyto kosmické majáky na okamžik vzplály? Fyzikální jevy k tomu potřebné nejsou o moc složitější než ty z neonových reklam.

Neonová reklama může svítit červeně proto, že protéká-li elektrický proud plynem vyplňujícím vnitřek reklamy, jsou elektrony obíhající v atomech neonu na okamžik vykopnuty do stavů o vyšší energii. Jakmile se potom atomy neonu ochladí, vybuzené elektrony se vrátí do svého obvyklého pohybového stavu a přebytečné energie se zbaví tím, že emitují fotony. Barva fotonů – jejich vlnová délka – je dána jejich energií. Klíčový objev – zcela jej vysvětlila kvantová mechanika v prvních desetiletích 20. století – tkví v tom, že atomy daného prvku jsou spojeny s nezaměnitelnou množinou možných skoků v energii elektronů nebo – řečeno jinými slovy – s nezaměnitelnou množinou barev uvolněných fotonů. U atomů neonu je dominantní barvou červená (nebo přesněji oranžovočervená); tu tedy nesou i neonové reklamy. Další prvky, helium, kyslík, chlor a tak dále, se projevují podobně, jen je hlavním rozdílem mezi nimi odlišná vlnová délka. „Neonová“ reklama září jinou barvou než červenou je nejspíše vyplněna rtutí (je-li modrá) či heliem (je-li zlatá) nebo byla vyrobena ze skleněných trubek potřených jiným materiálem, nejčastěji fosforem nebo luminofory, jejichž atomy mohou emitovat světlo jiných vlnových délek.

Velká část pozorování v astronomii je založena právě na tomto jevu. Astronomové sbírají dalekohledy světlo ze vzdálených těles a z barev, které naleznou – z konkrétních vlnových délek světla, které mohou změřit –, určují chemické složení zdrojů. Téměř poprvé byla tato metoda předvedena v průběhu zatmění Slunce v roce 1868. Tehdy francouzský astronom Pierre Janssen a nezávisle na něm anglický astronom Joseph Normal Lockyer zkoumali světlo přicházející z povrchové slupky Slunce, vykukující přímo za obroučkou tvořenou Měsícem, a našli i jasné a záhadné světlo o vlnové délce, kterou tehdy nikdo nedokázal laboratorně napodobit se známými materiály. To vedlo k odvážné – a správné – domněnce, že toto světlo vyzářil nový, do té doby neznámý prvek. Neznámou látkou bylo helium. Stalo se tak jediným prvkem, jenž byl objeven na Slunci dříve než na Zemi; odtud také pramení jeho název. Tento výzkum přesvědčivě prokázal, že stejně jako můžete být jednoznačně identifikováni podle čar v otisku svých prstů, lze druh atomu jednoznačně určit z množiny vlnových délek světla, které daný atom emituje (nebo pohlcuje).

V následujících desetiletích si astronomové zkoumající vlnové délky světla přicházejícího ze stále vzdálenějších astrofyzikálních zdrojů všimli jedné podivné věci. Ačkoli množina vlnových délek napodobovala délky z laborator-

ních experimentů s dobře známými atomy, s atomy vodíku a helia, byly všechny o něco delší. Jeden zdroj může vysílat vlnové délky o 3 % delší, jiný zdroj o 12 % delší a třetí zdroj o 21 % delší. Astronomové pojmenovali tento jev *rudým (červeným) posuvem*, vědomi si toho, že delší vlnové délky, alespoň ve viditelné části spektra, odpovídají více červené barvě světla.

Dát něčemu vhodné jméno je dobrý začátek, ale ještě nám to neřekne, proč jsou vlnové délky prodlouženy. Dobře známou odpovědí, která vzešla zejména z pozorování Vesta Sliphera a Edwina Hubblea, je, že se vesmír rozpíná. Naše dřívější úvahy o neměnných mapách jsou doslova ušity na míru tomu, abychom toto rozpínání intuitivně pochopili.

Vybatve si světelnou vlnu, která se vine od galaxie Noa směrem k Zemi. Znázorníme-li pohyb světla na naší neměnní se mapě, uvidíme homogenní posloupnost maxim vlny, přičemž ničím nerušený sled vln směřuje do našeho dalekohledu. Homogenita vln by vás mohla přivést k názoru, že vlnová délka světla v době, kdy bylo vysláno (vzdálenost mezi sousedními maximy vlny), bude stejná jako v okamžiku, kdy světlo dorazí do cíle. Ale nesmírně zajímavý detail v našem vyprávění se projeví ve chvíli, kdy nahlédneme do legendy k mapě, abychom vzdálenosti na mapě přepočítali na vzdálenosti v reálném světě. Protože se vesmír rozpíná, koeficient přepočítávání je vyšší tehdy, když světlo svou cestu ukončí, než když bylo na začátku. Zatímco vlnová délka světla měřená na mapě zůstává neměnná, vlnová délka přepočítaná na reálné vzdálenosti proto s časem *roste*. Když konečně světlo zachytíme, je jeho vlnová délka delší než v okamžiku jeho vyslání. Světelné vlny se chovají jako nitě vsíté do elastického materiálu. Stejně jako napnutím elastického materiálu se vzdálenost mezi stehy zvětší, i rozpínání tkaniny prostoru natáhne světelné vlny.

Vše můžeme vysvětlit nejen v řeči slov, ale i v řeči čísel. Jestliže se vlnová délka zdá delší o 3 %, potom je vesmír o 3 % větší teď, než byl v době, kdy světlo bylo vysláno; je-li delší o 21 %, potom se vesmír od chvíle, kdy se světlo vydalo na svou cestu, nafoukl o 21 %. Měření velikosti rudého posuvu nás tedy informují o *velikosti* vesmíru v době, kdy bylo právě pozorované světlo vysláno, ve srovnání s velikostí vesmíru dnešního.* Přímočarým způsobem lze nakonec zkombinovat *sérii* takových měření rudého posuvu a nakreslit graf toho, jak se rozpínání vesmíru měnilo v čase.

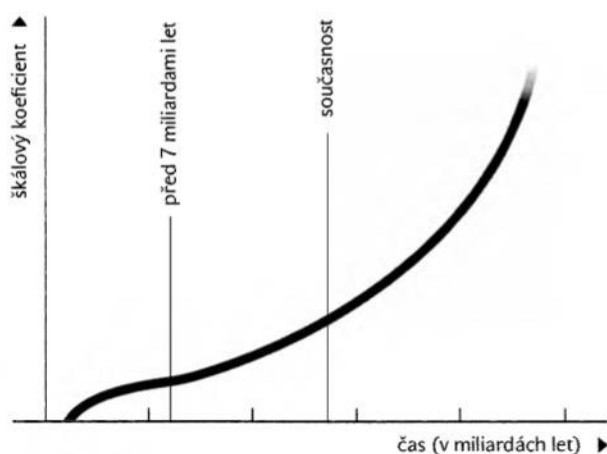
Výšku dcery v různých okamžicích minulosti byste si mohli připomenout ze značek, které jste v určitých dnech tužkou nakreslili na zeď jejího pokoje.

* V případě nekonečně velkého prostoru se můžete ptát, co znamená, že je vesmír větší, než byl v minulosti. Odpověď zní, že „větší“ znamená, že dnešní vzdálenosti mezi galaxiemi jsou větší, než byly tyto vzdálenosti mezi stejnými galaxiemi v minulosti. Rozpínáním vesmíru jsou dnes galaxie dále od sebe, což je matematicky vyjádřeno větší hodnotou škálového koeficientu. V případě nekonečného vesmíru se slovo „větší“ nevztahuje na celkovou velikost prostoru, protože co je jednou nekonečné, bylo a navzdory nekonečné zůstane. Ale abych se vyhnul takovému krkolomnému vysvětlení, budu nadále mluvit o měnící se velikosti vesmíru, jakkoli je v případě nekonečného vesmíru nutné takový výrok interpretovat v řeči měnících se vzdáleností mezi galaxiemi.

Množina značek na zdi udává její výšku v různých dnech. Při dostatečném počtu značek si připomenete, jak rychle rostla v různých dobách v minulosti. Možná coby devítiletá rostla jako z vody, pak do svých jedenáctých narozenin v růstu zpomalila a potom zase až do třinácti rostla rychle a tak dále. Když astronomové měří rudý posuv supernov typu Ia, určují tím analogické „značky tužkou“ pro celý prostor. Množina takových měření rudého posuvu různých supernov typu Ia by jim, podobně jako výškové značky vaší dcery, umožnila spočítat, jak rychle se vesmír v různých obdobích minulosti rozpínal. Na základě těchto údajů pak mohou astronomové určit tempo, s jakým se rozpínání prostoru zpomalovalo. A to měly také oba výzkumné týmy v plánu.

Aby jej zdárně ukončily, musely postoupit ještě o jeden krok: přiřadit data k vesmírným „značkám tužkou“. Týmy potřebovaly určit, kdy bylo světlo z každé supernovy vysláno. Tento úkol však lze vyřešit bez zaváhání. Protože rozdíl mezi zdánlivou a absolutní jasností supernovy prozrazuje její vzdálenost a protože známe rychlost světla, měli bychom být okamžitě schopni spočítat, před jak dlouhou dobou supernova světlo vyslala. Naše základní úvaha je správná, jenže nesmíme zapomenout na podstatný detail, který souvisí se zmíněným „dodatečným“ roztahováním světelné trajektorie.

Letí-li světlo rozpínajícím se vesmírem, proletí danou vzdálenost částečně proto, že se pohybuje prostorem, ale částečně i proto, že se rozpíná samotný prostor. Něco podobného se děje na vodorovném eskalátoru na letišti. Aniž byste zvýšili rychlost svých kroků, pohybujete se na něm rychleji než mimo eskalátor, protože k vaší rychlosti přispívá i jeho pohyb. I světlo z daleké supernovy, aniž by zvýšilo svou vlastní absolutní rychlost, letí rychleji, než by letělo ve statickém vesmíru, a to proto, že míru jeho pohybu zvyšuje rozpínání prostoru. Abychom správně určili, kdy bylo vysláno světlo, které právě



Škálový koeficient vesmíru v závislosti na čase ukazuje, jak se rozpínání kosmu až do doby před 7 miliardami let zpomalovalo; poté se začalo zrychlovat.

pozorujeme, musíme vzít do úvahy oba příspěvky k celkové vzdálenosti. Po-třebná matematika se pak trochu zkomplikuje (podívejte se do poznámek, jste-li zvědaví jak), ale dnes už ji dokonale zvládáme.⁷

Kosmické zrychlení

Poté co oba týmy provedly zkoušky, výsledky si znovu ověřily a pak provedly ještě další zkoušky a své závěry publikovaly. V průběhu posledních 7 miliard let se navzdory očekáváním několika generací fyziků rozpínání prostoru nezpomalovalo. *Zrychlovalo se.*

Shrnutí této průkopnické práce spolu s novějšími pozorováními, která ještě zvýšila jistotu, že jsou závěry správné, nabízí obrázek na straně 132. Pozorování prozradila, že po velkém třesku a naposledy ještě i před 7 miliardami let se škálový koeficient opravdu choval tak, jak se od něho očekávalo: jeho růst postupně zpomaloval. Kdyby ve zpomalování nepřestal, graf by časem pokračoval téměř ve vodorovném směru a snad by i zamířil dolů. Údaje však ukazují, že nějakých 7 miliard let před naším letopočtem se stalo něco dramatického. Graf vylétl nahoru, což znamená, že míra růstu škálového koeficientu se začala *zvětšovat*. Vesmír přeřadil na vysoký rychlostní stupeň, protože rozpínání prostoru se začalo zrychlovat.

Osud našeho vesmíru závisí na tvaru tohoto grafu. S tím, jak rozpínání zrychluje, bude prostor pokračovat v nadouvání navěky a bude vzdálené galaxie od sebe odhánět stále rychleji. Za 100 miliard let překročí galaxie, které dnes nejsou v našem okolí (v gravitačně vázaném shluku asi 30 galaxií nazývaných „místní skupina galaxií“), náš kosmický horizont; dostanou se tedy do oblasti, která je trvale mimo naše pozorovací schopnosti. Jestliže se nedochovají záznamy z dřívějších dob, teorie budoucích kosmologů budou hledat vysvětlení, proč se život odehrává v ostrovním vesmíru, v němž není galaxií více, než je studentů ve venkovské škole, a proč tento vesmír pluje ve statickém moři temnoty. Žijeme v privilegované době. Poznatky, jež nám dnes vesmír poskytuje, budou zase jednou v důsledku zrychlujícího se rozpínání zapomenuty.

V následujícím textu se dozvíte, že chudý obrázek vesmíru, který uvidí ve svých dalekohledech budoucí astronomové, nesmírně kontrastuje s obrovitou velikostí vesmíru, o níž se naše pokolení dozvědělo při svém úsilí o vysvětlení zrychlujícího se rozpínání.

Kosmologická konstanta

Kdybyste viděli, že míček *zrychluje* poté, co ho někdo vyhodil vzhůru, usoudili byste, že ho něco od zemského povrchu tlačilo. Stejně tak i ti, kdo zkoumali supernovy, usoudili, že neočekávané zrychlování kosmického exodu

vyžaduje něco, co hmotu ve vesmíru tlačí směrem ven a co může přemoci přitažlivost gravitace působící směrem dovnitř. Jak teď už velmi dobře víme, právě k tomuto úkolu je kosmologická konstanta, a odpudivá gravitace touto konstantou vyvolaná, jako stvořená. Pozorování supernov tedy vrátila kosmologickou konstantu do světla ramp, a to ne kvůli tomu, že konstanta byla „nespravedlivě odsouzena“ soudcem, jímž byly předsudky, jak se Einstein zmínil ve svém dopise o desítky let dříve, ale kvůli nekompromisní síle chladnokrevných dat.

Získané údaje umožnily badatelům definitivně určit číselnou velikost kosmologické konstanty – množství skryté energie, která zaplavuje prostor. Vyjádříme-li výslednou energii pomocí ekvivalentní hmotnosti, jak to fyzici často dělají (tedy použijeme-li vzorce $E = mc^2$ v méně známé formě, $m = E/c^2$), pak podle badatelů vyžadují data ze supernov kosmologickou konstantu o něco menší než 10^{-26} kilogramu v každém krychlovém metru.⁸ Tlak směrem ven, vyvolaný touto malou kosmologickou konstantou, přebila přitažlivost obyčejné hmoty a energie v prvních 7 miliardách let, jak dokládají pozorování. Ale rozpínáním prostoru se postupně obyčejná energie a hmota rozředily natolik, že z kosmologické konstanty nakonec učinily nejdůležitějšího hráče. Nezapomeňte, že kosmologická konstanta se nezřehuje; odpudivá gravitace, již kosmologická konstanta vesmír zásobuje, je vrozenou vlastností prostoru – každý krychlový metr prostoru přispívá stejným zevnitř působícím tlakem, jehož sílu určuje velikost kosmologické konstanty. Čím je tedy mezi dvěma objekty prostor, který vznikl rozpínáním vesmíru, rozsáhlejší, tím větší síla tlačí oba objekty od sebe. Ještě než byl vesmír těch 7 miliard let starý, slavila kosmologická konstanta vítězství; od té doby se rozpínání vesmíru zrychlovalo, jak dosvědčuje obrázek na straně 132.

Abych se víc podřídil zvyklostem, měl bych hodnotu kosmologické konstanty převést do jednotek ve fyzice obvyklých. Patrně byste nežádali prodavače zeleniny o 10^{15} pikogramů brambor (řeknete si o 1 kilogram, tedy o totéž množství ve stravitelnějších jednotkách) či nevolali přítelkyni, že u ní budete za 10^9 nanosekund (spíše jí řekneme, že za 1 sekundu, což je totéž v rozumnějších jednotkách); pro fyzika by bylo stejně bizarní, kdyby kosmologickou konstantu vyjádřil v kilogramech na metr krychlový. Z důvodů, které se brzy vyjasní, je přirozenější vyjadřovat hodnotu kosmologické konstanty v násobcích Planckovy hmotnosti (asi 10^{-8} kilogramu) na krychlovou Planckovu délku (krychle o hraně asi 10^{-35} metru, jejíž objem je asi 10^{-105} krychlového metru). V těchto jednotkách je naměřená velikost asi 10^{-123} , tedy to nepatrné číslo, jímž tato kapitola začala.⁹

Jak moc jsme si tímto výsledkem jisti? Údaje o zrychlujícím se rozpínání se staly nezvratnými až léta po prvních měřeních. Další měření (soustředující se například na podrobné vlastnosti reliktního záření; viz *Struktura vesmíru*, 14. kapitola) navíc s výsledky ze supernov nejen souhlasí, ale výtečně se s nimi

doplňují. Pokud vůbec zůstává nějaká nejistota, tak spočívá v otázce, čím lze zrychlující se expanzi vysvětlit. Považuje-li se obecná teorie relativity za matematický popis gravitace, pak jedinou možností je skutečně antigravitace kosmologické konstanty. Další možná vysvětlení naproti tomu musejí zahrnovat dodatečná exotická kvantová pole (která mohou určitou dobu imitovat kosmologickou konstantu podobně, jak jsme to viděli v kontextu inflační kosmologie)¹⁰ nebo pozměňovat rovnice obecné relativity (takže přitažlivá gravitace zeslabuje s rostoucí vzdáleností rychleji, než předpovídá Newtonova nebo Einsteinova matematika, což dovoluje vzdáleným oblastem vzdalovat se od sebe navzájem rychleji i bez kosmologické konstanty). Tím nejjednodušším a nejpřesvědčivějším vysvětlením pozorování však dodnes zůstává nenulová kosmologická konstanta, která prostor zaplavuje skrytou energií.

Podle názoru mnoha vědců je objev nenulové kosmologické konstanty – odměněný v roce 2011 Nobelovou cenou za fyziku – vůbec nejpřekvapivějším výsledkem, jaký za jejich života z pozorování vzešel.

Jak vysvětlit nulu

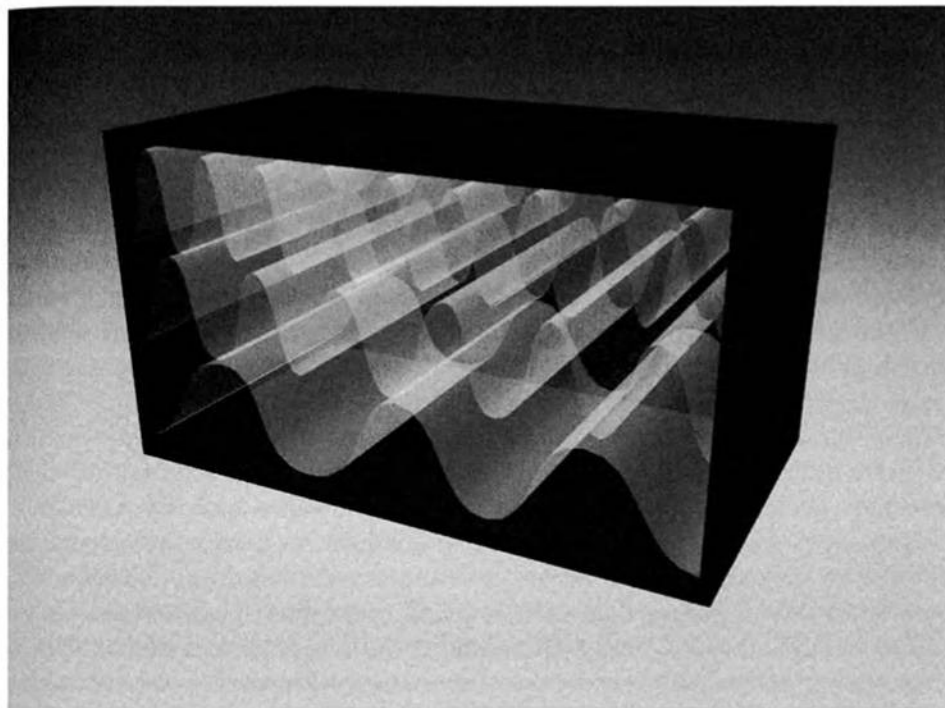
Když se ke mně poprvé doneslo, že výsledky pozorování supernov naznačují nenulovou kosmologickou konstantu, zareagoval jsem na to podobně jako většina fyziků: „To nemůže být pravda.“ Většina teoretiků (ale ne všichni) přece dospěla už před desetiletími k nulové hodnotě kosmologické konstanty. Jejich očekávání zprvu vzešlo z legend o „Einsteinově největším omylu“, ale časem je přesvědčila řada zdánlivě silných argumentů. Nejdůležitější z nich stál na úvahách o kvantové neurčitosti.

Kvůli kvantové neurčitosti a oscilacím kvantových polí, jež ji doprovázejí, se stává i prázdný prostor dějištěm divoké mikroskopické aktivity. A kvantová pole nesou energii podobně jako atomy odrážející se v krabici nebo děti skákající na hřišti. Na rozdíl od atomů a dětí je však kvantové chvění všudypřítomné a nevyhnutelné. Těžko lze v oblasti prostoru vyhlásit prázdny a poslat kvantové oscilace domů; energie produkovaná kvantovými oscilacemi proniká prostorem a nelze ji odstranit. Protože kosmologická konstanta není ničím jiným než energií prostupující prostor, chvění kvantových polí představuje jeden z mikroskopických mechanismů, jenž dává kosmologické konstantě *povstat*. To je stěžejní poznatek. Možná si vzpomínáte, že když Einstein pojem kosmologické konstanty zavedl, nekonkretizoval, čím by mohla být, odkud by vyvěrala ani jak by mohla vznikat. Souvislost s kvantovými oscilacemi zaručuje, že kdyby býval Einstein kosmologickou konstantu nevymyslel, někdo jiný zabývající se kvantovou fyzikou by to stejně někdy později učinil. Jakmile kvantovou mechaniku vezmete do úvahy, jste nuceni se zabývat příspěvkem k energii od polí, příspěvkem, který je homogenně rozptýlen v prostoru. To vás přímo vede k pojmu kosmologické konstanty.

Můžete si totiž položit zdánlivě nedůležitou numerickou otázku: *Kolik energie je v těchto všudypřítomných kvantových oscilacích obsaženo?* Když teoretici ukončili výpočty, vyšel jim téměř směšný výsledek: v každém objemu prostoru by mělo být *nekonečné* množství energie. Proč? Představte si pole oscilující v prázdné krabici libovolné velikosti. Obrázek na straně 137 ukazuje některé z možných tvarů kvantového chvění. Každá taková oscilace přispívá k energetickému obsahu pole (čím je kratší vlnová délka, tím je fakticky rychlejší chvění a tím vyšší energii nese). A protože existuje nekonečně mnoho tvarů vln a každá z nich má kratší vlnovou délku než ta předchozí, je celková energie obsažená v tomto chvění nekonečná.¹¹

Ačkoli jde zjevně o výsledek nepřijatelný, badatele z něho netrefil šlak, protože ho označili za důsledek obecnějšího, dobře známého problému, o němž jsme už mluvili: problému nepřátelství mezi gravitací a kvantovou mechanikou. Každý věděl, že kvantové teorii pole na superkrátkých vzdálenostech jednoduše nelze věřit. Oscilace s vlnovými délkami srovnatelnými s Planckovou délkou, 10^{-35} metru, nebo s vlnovými délkami ještě kratšími nesou energii (a podle $m = E/c^2$ i ekvivalentní hmotnost) tak vysokou, že mezi nimi začíná hrát roli i gravitační síla. Abyste je tedy správně popsali, potřebujete teorii svazující kvantovou mechaniku s obecnou relativitou. Tím se problém koncepčně přenáší na půdu strunové teorie nebo jiné navržené teorie, v níž hraje roli gravitace. Okamžitou a pragmatičtější reakcí vědců však bylo jednoduše rozhodnutí ignorovat oscilace na měřítkách kratších než Planckova délka. Kdyby je zapomněli ignorovat, pak by vlastně pracovali s kvantovou teorií pole mimo říši její platnosti. Očekávali, že jednou budeme strunovou teorii nebo kvantovou gravitaci chápat natolik dobře, abychom mohli vliv superkrátkých oscilací vypočítat matematicky přesně, ale improvizovaným řešením bylo dát nejzhousebnější fluktuace do karantény. Význam tohoto pravidla je nasnadě: Ignorujete-li chvění kratší než Planckova délka, vyjde vám pouze konečné číslo, proto celková energie, kterou chvění přispívá do oblasti prázdného prostoru, bude také konečná.

To je pokrok. Přinejmenším se tím přesouvá břemeno na budoucí objevy, které, budeme-li mít štěstí, zkrátí kvantové fluktuace se superkrátkými vlnovými délkami. Ale navzdory pokroku fyzici přece jen našli na výsledné celkové energii kvantového chvění cosi znepokojivého. Byť je konečná, je stále obří, kolem 10^{97} kilogramů na krychlový metr. Kvantové fluktuace mají hustotu energie mnohem vyšší než hmota všech známých galaxií natlačená do náprstku. Taková hustota odpovídá tomu, že v každé neuvěřitelně malé krychličce o hraně 1 Planckovy délky se nachází 1 Planckova hmotnost neboli 10^{-8} kilogramu, je tedy rovna 1 Planckově hmotnosti na 1 Planckův objem (proto jsou také tyto jednotky, podobně jako kila u brambor a sekundy u čekání, přirozenou a rozumnou volbou). Kosmologická konstanta této velikosti by poháněla explozi natolik energickou, že nejen galaxie, ale i atomy by jí byly



V každém objemu existuje nekonečně mnoho tvarů vln, a proto i nekonečně mnoho druhů kvantových oscilací. Z toho pramení problematický výsledek nekonečného příspěvku k energii.

rozfouknuty. Matematictější řečeno: astronomická měření našla pevnou horní hranici toho, jak může být kosmologická konstanta vysoká, je-li vůbec nenulová, a teoretické výsledky toto omezení překročily šokujícím koeficientem, který má více než sto číslic. Jakkoli je velká konečná hodnota energie zaplavující prostor lepší než hodnota nekonečná, mohli fyzici těžko skrýt, že zoufale potřebují výsledek svých výpočtů podstatně snížit.

Dříve zmíněný předpoklad o nulové hodnotě kosmologické konstanty by zdánlivě pomohl. Předpokládejte na okamžik, že kosmologická konstanta není jen malá, že je dokonce nulová. Nula patří u teoretiků mezi oblíbená čísla, protože se často a spolehlivě vynoří jako výsledek různých výpočtů ze zcela rozumného důvodu, jímž jsou symetrie. Představte si například, že se Rumburak přihlásil do večerní školy a dostal za domácí úkol sečíst šedesáté třetí mocniny prvních deseti kladných celých čísel, $1^{63} + 2^{63} + 3^{63} + 4^{63} + 5^{63} + 6^{63} + 7^{63} + 8^{63} + 9^{63} + 10^{63}$, a pak k výsledku přičíst součet šedesátých třetích mocnin prvních deseti záporných celých čísel, $(-1)^{63} + (-2)^{63} + (-3)^{63} + (-4)^{63} + (-5)^{63} + (-6)^{63} + (-7)^{63} + (-8)^{63} + (-9)^{63} + (-10)^{63}$. Jak dospět ke konečnému výsledku? Rumburak pracně počítá a při násobení a sčítání čísel s více než 50 číslicemi se vzteká stále více, když se k němu přimotá Arabela se slovy: „Užij symetrii,

Rumburaku. „Co?“ Arabela má na mysli to, že každý člen v první skupině má symetrický kompenzující člen ve druhé. 1^{63} a $(-1)^{63}$ dají dohromady nulu (záporné číslo umocněné na lichou mocninu zůstane záporné); 2^{63} a $(-2)^{63}$ se také pokrátí a tak dále. Symetrie mezi výrazy vyústí v naprosté pokrácení součtu všech členů, jako by šlo o děti o stejné hmotnosti na opačných stranách houpačky. Arabela, aniž by počítala cokoli, může ukázat, že výsledek je nula.

Mnozí fyzici věřili – raději bych měl říct doufali –, že podobné totální vykrácení členů způsobené zatím neznámou symetrií ve fyzikálních zákonech jednou nedostatky výpočtu energie obsažené v kvantových oscilacích odstraní. Předpokládali, že vysoké energie z kvantového chvění budou vykompenzovány nějakými zatím neznámými, vyvažujícími příspěvky, jakmile bude fyzika dostatečně dobře pochopena. Taková byla jediná nalezená strategie fyziků v jejich úsilí zkrotit nepřijatelné výsledky přibližných výpočtů. A také důvod, proč mnozí teoretici usoudili, že kosmologická konstanta musí být nulová.

Supersymetrie představuje konkrétní příklad toho, jak by se tato strategie mohla stát skutečností. Vzpomeňte na 4. kapitulu (tabulku na straně 92–93), kde se říká, že supersymetrie s sebou přináší párování mezi různými druhy částic, a tedy i různými druhy polí: elektrony jsou spárovány s druhem částic zvaných supersymetrické elektrony nebo krátce selektrony, kvarky se skvarky, neutrina se sneutriny a tak dále. Zatím jsou všechny tyto „šťastice“ hypotetické, ale experimenty na Velkém hadronovém srážeci (LHC) to mohou v následujících letech změnit. V každém případě při zkoumání kvantových oscilací spojených s oběma poli v páru přišli teoretici na jednu zajímavost. Pro každý druh chvění prvního pole existuje druh chvění druhého pole v páru, který má stejnou velikost, ale opačné znaménko, právě jako v Rumburakově domácím úkolu z matematiky. Jestliže příspěvky polí přidáme po párech, pak se jako v jeho příkladě všechny pokrátí a konečným výsledkem je nula.¹²

Zádrhel, a docela pořádný, je v tom, že se příspěvky v páru vykompenzují jen tehdy, když obě částice mají nejen stejné elektrické a jaderné náboje (a to mají), ale i stejné hmotnosti. Experimentální údaje tuto možnost vyloučily. I kdyby příroda darů supersymetrie využívala, data ukazují, že nejde o supersymetrii v té nejčistší, nejjednodušší a nejdalekosáhlejší formě. Zatím neznámé částice (selektrony, skvarky, sneutrino a jim podobné) musejí být mnohem těžší než jejich známé protějšky; pouze tak lze vysvětlit, proč ještě nebyly nalezeny při experimentech v urychlovačích. Vezmeme-li rozdíly v hmotnostech do úvahy, symetrie a rovnováha se tím naruší a pokrácení je nedokonalé: výsledná hustota energie ve vakuu bude znovu obrovská.

Během let byla navržena řada analogických receptů, které se odvolávaly na paletu dodatečných symetrií, principů a mechanismů kompenzace, ale žádnému z nich se nepodařilo teoreticky prokázat, že by kosmologická konstanta měla být nulová. Přesto většina fyziků tento neúspěch interpretovala jako

znamení našeho neúplného porozumění fyzice, a nikoli jako náznak toho, že jejich víra v nulovou kosmologickou konstantu byla neodůvodněná.

Tuto pravověrnost zpochybnil nositel Nobelovy ceny za fyziku Steven Weinberg.* V článku z roku 1987, napsaném více než deset let před revolučními měřeními supernov, navrhl alternativní teoretické schéma, z něhož plynul zásadně odlišný závěr: kosmologická konstanta je totiž podle něho malá, ale *nenulová*. Svůj výpočet založil na jednom z nejvíce polarizujících pojmů, které za poslední desítky let rozdělily komunitu fyziků – na principu jedněmi veleném a jinými zatracovaném, principu, který někteří označují za hluboký a další za pošetilý. Jeho oficiální, byť zavádějící, název je *antropický princip*.

Kosmologické antropičiny

Heliocentrický model sluneční soustavy Mikuláše Koperníka je považován za náš první vědecký důkaz toho, že my lidé nejsme ohniskem vesmíru. Moderní objevy toto poučení neobyčejně posílily. Dnes si uvědomujeme, že Koperníkův výsledek je jen jedním krokem v několikastupňové degradaci výlučného postavení člověka, v něž myslitelé dlouhou dobu nesprávně věřili: nežijeme ve středu naší sluneční soustavy, ta není ve středu naší galaxie, Mléčné dráhy, ta není ve středu vesmíru a nejsme ani vyrobeni ze skryté (temné) hmoty, tvořící většinu hmotnosti hmoty ve vesmíru. Taková postupná degradace někdejší hlavní hvězdy do pozice třesničky na dortu představuje něco, čemu vědci říkají *koperníkovský princip*: podle všech důležitých informací o světě nezaujímají lidské bytosti žádné privilegované postavení.

Téměř půl tisíciletí po Koperníkově práci, a to přímo na vzpomínkové konferenci v Krakově, zazněla v jedné přednášce – ve vystoupení australského fyzika Brandona Cartera – provokující výzva ke změně v interpretaci koperníkovského principu. Carter v ní vložil svůj názor, že přílišné lpění na koperníkovském principu může za jistých okolností badatele okrást o značné příležitosti postoupit dále. Souhlasil sice s tím, že my lidé nejsme těmi klíčovými hráči v řádu kosmu, a přece, pokračoval ve shodě s podobnými názory formulovanými vědci, jako byl Alfred Russel Wallace, Abraham Zelmanov a Robert Dicke, existuje jeden děj, ve kterém *hrajeme* absolutně nepostradatelnou úlohu: naše vlastní pozorování. Jakkoli hluboko ponížil lidstvo Koperník a jeho pokračovatelé, stále zůstáváme na špičce, pokud jde o shromažďování a rozbor údajů, které formují naše názory. Kvůli této naší nevyhnutelné úloze musíme vzít do úvahy jev, jemuž statistici říkají *selekční zkreslení* (nebo anglicky *selection bias*).

* I cambridgeský astrofyzik George Efstathiou byl jedním z prvních průkopníků, kteří důrazně a přesvědčivě obhajovali nenulovou kosmologickou konstantu.

Jde o prostou a široce aplikovatelnou myšlenku. Jestliže byste zkoumali populace pstruhů někde u saharské pouště, získali byste údaje zkreslené tím, že jste se zaměřili na prostředí obzvláště nevlídné k předmětu vašeho výzkumu. Zkoumáte-li zájem široké veřejnosti o operu, ale zašlete svůj dotazník pouze předplatitelům časopisu s názvem *Bez opery nelze žít*, jen stěží budou vaše výsledky přesné, protože respondenti nebudou dobře reprezentovat populaci jako celek. Když děláte rozhovor se skupinou uprchlíků, kteří na své cestě do bezpečí přetrpěli nesmírně kruté podmínky, mohli byste usoudit, že celý národ, do něhož patří, se řadí k těm nejodolnějším na Zemi. Ale dozvíte-li se pak o šokující skutečnosti, že mluvíte s méně než 1 % těch, kdo se na cestu vydali, uvědomíte si, že vaše dedukce byla zkreslená, protože cestu přežili jen ti opravdu silní jedinci.

Je velmi důležité takovým zkreslením se vyhnout, jinak bychom mohli strávit čas vysvětlováním závěrů postavených na nereprezentativních údajích. Proč pstruzi vyhynuli? Co způsobilo nárůst zájmu veřejnosti o operu? Proč je konkrétní etnická skupina tak nevídaně odolná? Zkreslená pozorování vás mohou přimět k nesmyslnému hledání vysvětlení zákonitostí, které jsou z reprezentativnějšího pohledu problematické nebo nesprávné.

Ve většině případů lze tato zkreslení snadno zjistit a opravit. Existuje však příbuzný druh zkreslení, a to zkreslení jemnější a tak základní, že je lze snadno přehlédnout. Jde o to, že omezení místa a doby, kde a kdy jsme *schopni žít*, může mít zásadní vliv na to, co můžeme pozorovat. Když vliv takových předeklarovaných omezení na naše pozorování nevezmeme v potaz, potom – podobně jako v uvedených příkladech – můžeme dojít k naprosto chybným závěrům, tedy i takovým, které nás například mohou nutit celá léta trávit stejně nesmyslnou činností, jako je vysvětlování laciných zápletek v jistých filmech.

Představte si třeba, že chcete přijít na kloub tomu, proč je Země vzdálená 150 milionů kilometrů od Slunce (to se snažil objasnit i velký vědec Johannes Kepler). Chtěli byste najít nějaký trik skrývající se někde v hloubi fyzikálních zákonů, který tento pozorovaný fakt vysvětluje. Celá léta s problémem usilovně zápolíte, ale přesvědčivé vysvětlení ne a ne dát dohromady. Měli byste se snažit i nadále? Zamyslíte-li se nad svým úsilím a vezmete-li v úvahu selekční zkreslení, rychle si uvědomíte, že se namáháte marně.

Gravitační zákony, Newtonovy i Einsteinovy, umožňují, aby planeta obíhala kolem hvězdy v libovolné vzdálenosti. Kdybyste uchopili Zemi, posunuli ji do nějaké jiné, libovolné vzdálenosti od Slunce a potom ji opět popostrčili, aby se pohybovala správnou rychlostí (která se dá snadno spočítat ze základních fyzikálních zákonů), Země by se spokojeně usadila na nové oběžné dráze. Tou zvláštní vlastností spojenou se vzdáleností 150 milionů kilometrů je, že zaručuje teplotu ve správném rozsahu, který napomáhá naší existenci v tomto místě. Kdyby byla Země mnohem blíže nebo mnohem dále od Slunce, teplota na ní by se výrazně zvýšila nebo snížila a to by znamenalo roz-

loučit se s jednou podstatnou ingrediencí důležitou pro život, jak ho známe: vodou v kapalném skupenství. Tím odkrýváme jednu svou vrozenou zaujatost. Samotný fakt, že *my* měříme vzdálenost své planety od Slunce, zaručuje, že jistě obdržíme výsledek, který zapadá do intervalu slučitelného s naším životem. Jinak bychom tu přece ani nebyli a nemohli bychom o vzdálenosti Země od Slunce rozjímat.

Kdyby Země byla jedinou planetou naší sluneční soustavy či jedinou planetou ve vesmíru, mohli byste mít pocit, že máte povinnost v bádání pokračovat. Ano, mohli byste říct, rozumím tomu, že moje vlastní existence je svázána se vzdáleností Země od Slunce, ale tohle spíše zesiluje mou potřebu vysvětlit, proč Země obíhá v takové příznivé, životu nakloněné vzdálenosti. Jde jen o šťastnou náhodu, nebo existuje hlubší vysvětlení?

Země však není jedinou planetou naší sluneční soustavy, natožpak jedinou planetou ve vesmíru. Takových planet je přemíra. A tento fakt staví podobné otázky do velmi odlišného světla. Pomyslete na následující analogii: Omylem žijete v domnění, že jedno konkrétní obuvnictví prodává jedinou velikost bot, a tak vás mile překvapí, když vám prodavač přinese boty, které dokonale padnou. „To je úžasné, že ze všech možných velikostí bot,“ uvažujete, „prodávají zrovna tu mou. Mám jen štěstí? Nebo to lze nějak moudře vysvětlit?“ Když se pak dozvíte, že v obchodě ve skutečnosti prodávají celou paletu velikostí, podobné otázky budou tytam. Vesmír s mnoha planetami, které obíhají v různých vzdálenostech okolo svých hostitelských hvězd, představuje podobnou situaci. Stejně jako příliš nepřekvapuje, že v obchodě prodávají boty vaší velikosti, není nijak překvapivé ani to, že ve všech slunečních nebo hvězdných soustavách všech galaxií existuje alespoň jedna planeta, jejíž vzdálenost od hostitelské hvězdy zaručuje klima příznivé životu toho druhu, který známe. A my tedy pochopitelně musíme žít na jedné z těchto planet. Na jiných bychom se nemohli ani vyvinout, ani přežít.

Takže v přírodních zákonech nenalezneme žádný důvod, proč je Země vzdálená 150 milionů kilometrů od Slunce. Orbitální vzdálenost planety od hostitelské hvězdy je číslo, které závisí na rozmarech historie a na nesčetných podrobných vlastnostech kroužících oblaků plynu, které se spojily, a tak sluneční soustavu zformovaly; je to nahodilá skutečnost, kterou úvahy o fyzikálních zákonech nemohou objasnit. Tyto astrofyzikální děje koneckonců daly v celém vesmíru povstat planetám, které obíhají okolo svých sluncí v ohromné paletě vzdáleností. My žijeme na jedné takové planetě, vzdálené 150 milionů kilometrů od našeho Slunce, protože jde o planetu, na níž se naše forma života *mohla* vyvinout. Kdybychom toto selekční zkreslení přehlédli, mohli bychom začít hledat nějakou hlubokou odpověď. Vydali bychom se tak za nesplnitelným cílem.

Carterův článek zdůrazňoval, jak důležité je věnovat podobným zkreslením pozornost, a tuto pozornost nazval podle řeckého výrazu pro člověka

antropickým principem (jde o nešťastné pojmenování, protože stejnou myšlenku by mohli vzít v potaz nejen lidé, ale i všechny ostatní formy inteligentního života, které provádějí a analyzují pozorování). Nikdo se od této části Carterova argumentu nedistancoval. Polemiku vyvolalo jeho tvrzení, že s antropickým principem si můžeme posvítit nejen na jednotlivosti v našem vesmíru, například na vzdálenosti planet, ale i na vesmír samotný.

Co by to mohlo znamenat?

Představte si, že si lámete hlavu s nějakou fundamentální vlastností vesmíru, řekněme s hmotností elektronu, 0,00054 (vyjádřenou jako zlomek hmotnosti protonu), nebo se silou elektromagnetické interakce, 0,0073 (vyjádřenou pomocí vazbové konstanty), nebo, což nás tady zajímá nejvíce, s velikostí kosmologické konstanty, $1,38 \cdot 10^{-123}$ (v Planckových jednotkách). Rádi byste objasnili, proč mají tyto konstanty právě takové hodnoty. Snažíte se, snažíte, ale skončíte s prázdnýma rukama. Udělejte krok zpátky, radí vám Carter. Možná jste byli neúspěšní ze stejného důvodu, jako když se vám nepodařilo vysvětlit vzdálenost Země a Slunce: žádné vysvětlení neexistuje. Právě jako je mnoho planet, které mohou být různě daleko, a my zákonitě obýváme jednu z těch, na nichž panují příznivé podmínky, možná existuje i řada vesmírů s různými hodnotami „konstant“, a my nutně žijeme v jednom z těch vesmírů, jejichž hodnoty napomáhají naší existenci.

Podle takového způsobu uvažování je chybou se ptát, proč mají konstanty dané konkrétní hodnoty. Žádný zákon, který by stanovil jejich hodnoty, neexistuje; jejich hodnoty se mohou měnit a mění napříč multivesmírem. Vinou vrozené selekční zaujatosti naměříme ve vesmíru kolem nás hodnoty, které známe, prostě proto, že nejsme schopni existovat v jiných částech multivesmíru, kde jsou hodnoty jiné.

Všimněte si, že tento argument by vyzněl naprázdno, kdyby náš vesmír byl jediný, protože byste stále mohli klást otázky o „šťastné náhodě“ a jejím „hlubším vysvětlení“. Přesvědčivé vysvětlení toho, proč prodavač našel boty vaší velikosti, vyžadovalo regály naplněné botami různých velikostí a uspokojujivé vysvětlení toho, že existuje planeta obíhající v životu příznivé vzdálenosti od hostitelské hvězdy, vyžadovalo velkou množinu hvězd s planetami v různých vzdálenostech. Stejně tak se platné vysvětlení přírodních konstant neobejde bez širokého sortimentu vesmírů, které jsou vyzbrojeny různými hodnotami těchto konstant. Pouze se všemi potřebnými ingrediencemi – v multivesmíru a navíc v masivním – má antropické uvažování schopnost udělat ze záhadných faktů fakta prozaická.*

* V 7. kapitole podrobněji a obecněji prozkoumáme potíže s ověřováním teorií zahrnujících multivesmír; blíže rozebereme i úlohu antropického uvažování při odvozování potenciálně ověřitelných předpovědí.

To, do jaké míry budeme přesvědčeni antropickými argumenty, je tedy očividně dáno silou naší víry ve tři podstatné předpoklady tohoto principu: zaprvé, že náš vesmír je částí multivesmíru; zadruhé, že konstanty se v multivesmíru mění od vesmíru k vesmíru a mohou nabývat velmi mnoha různých hodnot; a zatřetí, že většina odchylek konstant od hodnot, které byste naměřili, by znamenala, že se život nemůže uchytit.

V sedmdesátých letech, když Carter tyto myšlenky představil, byl pojem paralelních vesmírů většinou fyziků zatracován. Dosud jistě existuje více než dost důvodů ke skepsi – v předchozích kapitolách jsme však viděli, že ačkoli známé zdůvodnění libovolné konkrétní verze multivesmíru je samozřejmě provizorní, existují jisté důvody, proč o tomto novém pohledu na realitu vážně uvažovat. V případě prvního předpokladu to také dnes většina vědců dělá. Pokud jde o druhý předpoklad, už jsme viděli, že například v inflačních nebo bránových multivesmírech očekáváme, že se fyzikální vlastnosti jako přírodní konstanty liší od jednoho vesmíru k druhému. Později v této kapitole se na tuto záležitost podíváme zblízka.

Ale co třetí předpoklad, svazující život s konstantami?

Život, galaxie a čísla matky přírody

Pro mnoho konstant přírody platí, že i jejich velmi nepatrné změny by znemožnily takový život, jaký známe. Zesilte gravitační konstantu, a hvězdy vyhoří dříve, než se v jejich okolí život vůbec vyvine. Zeslabte ji, a galaxie nebudou držet pohromadě. Zesilte elektromagnetickou sílu, a vodíkové atomy se začnou příliš odpuzovat a jaderná fúze, s níž hvězdy vyrábějí energii, se vůbec nezažehne.¹³ Ale co kosmologická konstanta? Závisí život na její hodnotě? Právě do této otázky se Steven Weinberg zakouzl při psaní svého článku z roku 1987.

Protože je vznik života komplexním procesem, který teprve začínáme trochu chápat, Weinberg si uvědomil, že neexistuje naděje, že určíme vliv jedné nebo druhé hodnoty kosmologické konstanty na tu myriádu kroků, jimiž byl hmotě vdechnut život. Místo aby se vzdal, zavedl chytrou náhražku za vznik života: zrod galaxií. Bez galaxií, uvažoval, by sotva vznikly hvězdy a planety a to by téměř dokonale zhatilo jakoukoli naději, že povstane život. Tento přístup byl nejen neobyčejně rozumný, ale i užitečný: pomohl převést jádro problému na to, jaký vliv má kosmologická konstanta různých velikostí na utváření galaxií, a tuto otázku byl Weinberg schopn rozebrat.

Podstatu jeho analýzy lze pochopit i se základními znalostmi fyziky. Přestože jsou přesné podrobnosti toho, jak galaxie vznikají, předmětem aktivního výzkumu, tento děj lze v hrubých obrysech načrtnout jako válčení sněhové koule. Chomáč hmoty se vytvoří zde nebo onde, a jelikož má větší hustotu než jeho okolí, přitahuje okolní hmotu silněji a tím dále nabývá na velikosti.

A nabaluje stále více hmoty, až se nakonec dostane do stadia, v němž se v rozvířené směsi plynů a prachu začnou rodit hvězdy a planety. Weinberg si uvědomil, že příliš vysoká kosmologická konstanta by proces nabalování narušila. Odpudivá gravitace jí vyvolaná, jestliže by byla dostatečně silná, by rozfoukla počáteční chomáče – malé a křehké – od sebe navzájem ještě předtím, než by mohly přitáhnout okolní hmotu, a tím by znemožnila zformování galaxie.

Weinberg tuto myšlenku matematicky rozpracoval. Zjistil, že kosmologická konstanta, která by převyšovala dnešní kosmologickou hustotu hmoty, tedy několik protonů na krychlový metr, více než stonásobně až tisícinásobně, by tvorbu galaxií zastavila. (Rozebral i vliv záporné kosmologické konstanty. Projevil by se smrtelně ještě dříve než kladná konstanta, protože záporná hodnota zvyšuje gravitační přitažlivost a vyvolává kolaps vesmíru, ještě než hvězdy vzplanou.) Jestliže si potom představíte, že jsme částí multivesmíru a že se hodnota kosmologické konstanty mění od vesmíru k vesmíru v širokém intervalu, stejně jako se vzdálenosti různých hvězd od jejich planet mění v širokém rozsahu, pak jedinými vesmíry, které mohou obsahovat galaxie, a tedy i bytosti nám podobné, jsou ty, v nichž kosmologická konstanta nepřekračuje Weinbergovu horní mez, která se v Planckových jednotkách rovná přibližně 10^{-121} .

Po letech neúspěšného úsilí celého společenství fyziků byl tohle první teoretický výpočet, z něhož vyšla taková hodnota kosmologické konstanty, která nebyla absurdně velká ve srovnání s horními odhady plynoucími z astronomických pozorování. Neexistoval ani rozpor mezi tímto výpočtem a tehdy panujícím přesvědčením, že kosmologická konstanta je rovna nule. Weinberg se však rozhodl posunout fyziku vpřed o dva kroky, nikoli jen o jeden, a vybídl fyziky k ještě odvážnější interpretaci svého výsledku. Jak prohlásil, měli bychom očekávat, že se nalzáme ve vesmíru s kosmologickou konstantou, jejíž hodnota je tak malá, jak naše existence vyžaduje, ale ne mnohem menší. Mnohem menší konstanta by podle něho volala po vysvětlení, které by se muselo odvolávat i na jiné podmínky než slučitelnost s naší existencí. To znamená, že by vyžadovala přesně ten druh vysvětlení, které fyzici usilovně hledali, ale zatím nenašli. Tím byl Weinberg přiveden i k myšlence, že důmyslnější pozorování pomohou jednoho dne nalézt kosmologickou konstantu, která není nulová, ale pohybuje se blízko horní hranice, kterou spočítal. Jak jsme viděli, deset let po Weinbergově článku potvrdila pozorování supernov Perlmutterovým a Schmidtovým týmem správnost tohoto „proctví“.

Abychom mohli tento neobvyklý způsob vysvětlení stavu vesmíru spravedlivě posoudit, musíme nahlédnout do Weinbergových myšlenkových pochodů. Weinberg si představuje, že širý multivesmír je co do obsahu natolik rozmanitý, že v něm prostě *musí* být alespoň jeden vesmír, jehož kosmologická konstanta se rovná té, již pozorujeme. Ale jaký druh multivesmíru zaručí nebo téměř zaručí, že se tak stane?

Pomůžte nám, když se zamyslíme nad analogickým problémem s jednoduššími čísly. Představte si, že máte pro nechvalně známého filmového producenta Harveyho W. Einsteina zorganizovat konkurz na hlavní postavu jeho nového nezávislého snímku nazvaného *Pulp Friction* neboli *Tření v morku kosti*. „Jak vysoký herec by to měl být?“ zeptáte se ho. „Nevím. Přes metr, ale méně než dva. Ale ať jde rozhodně o někoho, kdo měří přesně tolik, kolik se mi bude hodit.“ Cítíte nutkání svého chleboďárce opravit, že kvůli kvantové neurčitosti opravdu nepotřebuje zástupce *každé* výšky, ale rozmyslíte si to, když si vzpomenete, jak dopadla nevrlá mluvící muška, která se pokusila vysvětlit totéž.

A teď čelíte dilematu, kolik herců na konkurz pozvat. Hlavou vám běží: Když nadřizený změří výšku s přesností jednoho centimetru, tedy plus minus půl centimetru, existuje sto různých možností mezi metrem a dvěma metry. Takže potřebujete alespoň sto herců. Ale protože se nejspíše objeví páry nebo i skupinky herců stejně vysokých, takže jiné výšky zůstanou nezastoupeny, asi budete potřebovat více než sto uchazečů. Na konkurz by se tedy mělo dostavit několik stovek herců. Je to dost, ale stále méně, než kolik byste potřebovali, kdyby producent dokázal měřit výšku s milimetrovou přesností. V takovém případě by bylo různých možných výšek tisíc, a tak byste pro jistotu museli shromáždit několik tisíc herců.

Stejně bychom mohli uvažovat i o vesmírech s různými kosmologickými konstantami. Předpokládejte, že všechny vesmíry v multivesmíru mají kosmologické konstanty mezi nulou a jedničkou (v obvyklých Planckových jednotkách); menší hodnoty by vesmírům přivodily kolaps, vyšší hodnoty by nám nedovolily použít obvyklé matematické metody, a tak bychom se o fyzikálních jevech nic nedozvěděli. Interval kosmologických konstant tedy má délku jedna (v Planckových jednotkách), podobně jako měl interval výšek herců délku jedna (v metrech). Pokud jde o přesnost, tak zatímco producent dokázal měřit výšku s přesností jednoho centimetru, dnešní astronomové měří kosmologickou konstantu s přesností asi 10^{-124} (v Planckových jednotkách). V budoucnosti se přesnost nepochybně vylepší, ale to sotva ovlivní naše obecné závěry. Vidíme, že právě jako je 10^2 různých výšek, které s rozstupem 10^{-2} metru (1 centimetr) pokrývají interval o délce 1 metru, a právě jako je 10^3 výšek, mezi nimiž jsou mezery 10^{-3} metru (1 milimetr), tak mezi hodnotami 0 a 1 existuje 10^{124} hodnot kosmologické konstanty, mezi nimiž jsou rozestupy 10^{-124} .

Na to, abychom zajistili, že každá možná hodnota kosmologické konstanty dostane příležitost ovládat nějakou oblast vesmíru, bychom tedy potřebovali multivesmír s nejméně 10^{124} různými vesmíry. Ale podobně jako v případě konkurzu musíme vzít do úvahy, že se některé hodnoty budou opakovat v několika vesmírech. Chceme-li tedy zvýšit jistotu, že je realizována opravdu každá kosmologická konstanta, měli bychom požadovat multivesmír

s daleko více než 10^{124} vesmíry, řekněme milionkrát více, čímž se dostaneme ke kulatému počtu 10^{130} vesmírů. Takové konkrétní odhady jsou zbytečným luxusem, protože u takto obrovských čísel na konkrétních hodnotách sotva záleží. Žádný běžný příklad – ani počtu buněk ve vašem těle (10^{13}), ani počtu sekund od velkého třesku (10^{18}), ani počtu fotonů ve viditelné části vesmíru (10^{88}) –, se ani náhodou nemůže přiblížit k množství vesmírů, o kterém je teď řeč. Nutné podmínky lze shrnout tak, že Weinbergova strategie vysvětlování kosmologické konstanty funguje jen tehdy, jsme-li součástí multivesmíru obsahujícího ohromné množství různých vesmírů; jejich kosmologické konstanty musejí pokrýt 10^{124} různých hodnot. Pouze u takového sortimentu různých vesmírů je vysoká pravděpodobnost, že jeden z nich má kosmologickou konstantu, která se shoduje s tou naší.

Existují nějaké druhy teorií, z nichž přirozeně vyplývá podobně velkolepý přebytek vesmírů s různými kosmologickými konstantami?¹⁴

Z nouze ctnost

Existují. S jedním jsme se setkali v minulé kapitole. Jde o množinu možných tvarů dodatečných rozměrů v teorii strun, počet jejichž prvků dosahuje k číslu asi 10^{500} , započteme-li i toky, které se těmito tvary proplétají. Proti tomuto číslu je i 10^{124} kapkou v moři. I když 10^{124} zvětšíte o několik stovek řádů, stále to bude proti 10^{500} kapka v moři. Odečtete 10^{124} od 10^{500} a potom ještě jednou a znovu a znovu a ještě miliardkrát, a sotva tím způsobíte škrábanec. Výsledek bude stále téměř 10^{500} .

Důležité je, že kosmologická konstanta se od jednoho vesmíru k druhému opravdu mění. Tak jako energii obsahuje magnetické pole (může pohybovat s předměty), je energie uložena i v bránových tocích, jimiž jsou „ozdobeny“ díry v Calabiho-Yauově tvarech, a tato energie poměrně citlivě závisí na geometrických detailech konkrétního tvaru. Srovnáte-li dva odlišné Calabiho-Yauovy tvary s různými toky vyskytujícími se v různých dírách, zjistíte, že i jejich energie se většinou budou lišit. A protože je zvolená Calabiho-Yauova varieta připíchnuta ke každému bodu obyčejného třírozměrného prostoru, právě jako jsou smyčky příze všity do každého bodu na velkém podkladu koberce, bude energie, kterou tvar obsahuje, homogenně vyplňovat obvyklé tři velké rozměry prostoru, stejně jako promočená vlákna příze v koberci homogenně zvětší hmotnost každého čtverečního metru koberce. Jestliže tedy jedna nebo druhá „ozdobená“ Calabiho-Yauova varieta mezi 10^{500} kandidáty představuje požadované dodatečné rozměry, *energie obsažená v tomto tvaru přispěje k velikosti kosmologické konstanty*. Raphael Bousso a Joe Polchinski vyjádřili toto pozorování v řeči čísel. Shromáždili argumenty, že různé kosmologické konstanty vypočítané z nějakých 10^{500} různých tvarů pokrývají téměř homogenně široký interval možných hodnot.

A přesně to jsme potřebovali. Rozdělíte-li interval mezi 0 a 1 na 10^{500} úseků svislými čárkami, bude mnoho z těchto čárek ležet extrémně blízko hodnoty kosmologické konstanty, kterou v posledním desetiletí astronomové naměřili. Nalézt nějaké konkrétní příklady mezi 10^{500} možnostmi nebude nic lehkého, protože i kdyby naše nejvýkonnější počítače potřebovaly na prozkoumání jednoho tvaru dodatečných rozměrů pouhou sekundu, za miliardu let by otestovaly mizerných 10^{32} příkladů. Naše argumenty nás však přesvědčivě naplňují vírou, že takové příklady existují.

Sbírka 10^{500} různých tvarů dodatečných rozměrů, nalezená při nejnovějším výzkumu teorie strun, má zajisté od jedinečného popisu přírody dál, než bychom si představovali. A těm, kdo upřímně věřili Einsteinovu snu o nalezení jednotné teorie, která popisuje jediný vesmír – ten náš –, způsobily tyto výsledky pořádný zármutek. Analýza kosmologické konstanty však ukazuje situaci v jiném světle. Místo abychom byli zoufalí z toho, že se nevynořil jediný a jedinečný vesmír, měli bychom možná slavit: strunová teorie najednou ten nejméně věrohodný předpoklad Weinbergova vysvětlení kosmologické konstanty – požadavek, aby existovalo více než 10^{124} vesmírů – ukázala v jiném, příznivějším světle.

Poslední krok v kostce

Provokující domněnky do sebe začínají zapadat. Ale v našem uvažování ještě zůstává jedna velká mezera. Jedno je tvrdit, že teorie strun velké množství odlišných vesmírů umožňuje, ale něco jiného je prohlásit, že tato teorie zaručuje, že všechny vesmíry, které podle ní mohou existovat, opravdu „někde“ existují, konkrétně v obřím multivesmíru rozděleném na mnoho paralelních světů. Jak nejhlasitěji zdůrazňoval Leonard Susskind, jehož inspirovaly průkopnické práce Shamita Kachrua, Renaty Kalloshové, Andreje Lindeho a Sandípa Trivediho, lze tuto díru vyspravit záplatou zvanou věčná inflace.¹⁵

Hned onen poslední krok vysvětlím, ale jste-li už těmito myšlenkami přesyceni a chcete slyšet jen pointu, pak ji nejdříve ve třech větách vyjádřím. Inflační multivesmír – navždy se rozpínající kosmický ementál – obsahuje obrovský a neustále rostoucí počet kosmických bublin. Vtip je v tom, že když se inflační kosmologie a teorie strun zkombinují, proces věčné inflace rozsype 10^{500} tvarů dodatečných rozměrů povolených strunovou teorií na bubliny – každé bublině je přiřazen jeden tvar dodatečných rozměrů –, čímž se zrodí multivesmír, v němž jsou všechny možnosti opravdu realizovány. Podle této logiky obýváme vesmírnou bublinu, jejíž dodatečné rozměry dávají vzniknout vesmíru se správnou kosmologickou konstantou, s konstantou dovolující život našeho typu, a s ostatními vlastnostmi, které souhlasí s pozorováními.

Ve zbytku této kapitoly vše podrobně vysvětlím, ale chcete-li se pohnout z místa, klidně přeskočte na poslední podkapitolu.

Strunová krajina

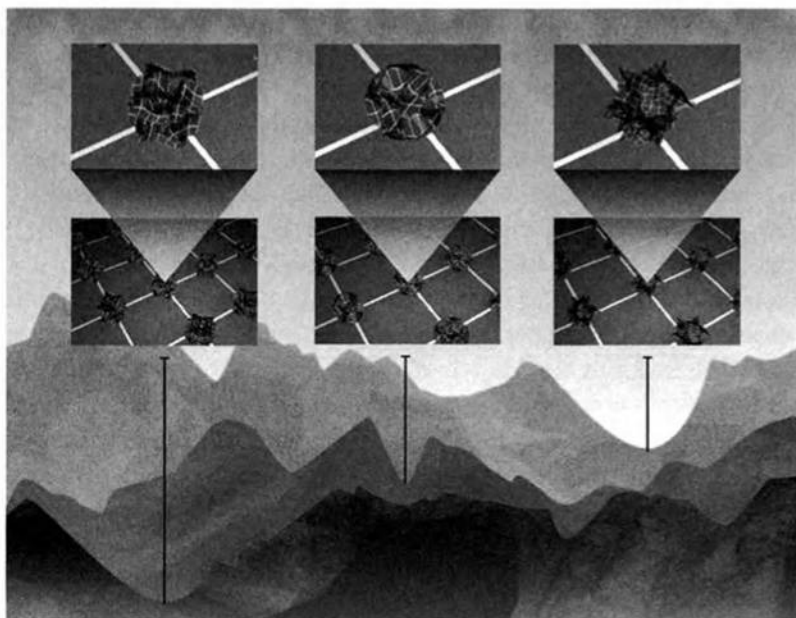
Když jsem ve 3. kapitole vysvětloval inflační kosmologii, opíral jsem se o variaci dobře známé metafory. Horský vrchol představoval nejvyšší hodnotu energie, jakou může inflatonové pole napumpovat do prostoru. Když jsem mluvil o něčem, co se kutálí z hory dolů a nakonec to v klidu spočine nedaleko nejnižšího bodu terénu, chtěl jsem popsat inflatonové pole odhazující svou energii a ta se postupně transformuje na částice hmoty a záření.

Znovu se podíváme na tři aspekty této metafory, ale do našeho uvažování pojmem i poznatky, které jsme od té doby nasbírali. Zaprvé, teď už víme, že inflatonové pole je jen jedním ze zdrojů energie, která prostor vyplňuje; dalšími dávkami přispívá kvantové chvění všech možných polí – elektromagnetického, jaderného a tak dále. Abychom tedy metaforu odpovídajícím způsobem poopravili, musíme nadmořskou výšku interpretovat jako kombinovanou hustotu energie zaplavující prázdný prostor, v níž jsou zahrnuty příspěvky od všech zdrojů.

Zadruhé, původní metafora předpokládala, že úpatí hory, v němž se inflaton konečně dostane do stavu klidu, leží na „hladině moře“, tedy v nulové výšce, což znamená, že inflaton už pozbyl veškerou energii (a zbavil se tlaku). Ale i v tomto ohledu musíme metaforu poupravit, protože výška úpatí hory musí odpovídat celkové prostor prostupující energii ze všech zdrojů poté, co se inflace zastavila. Celková hustota energie ve vakuu je jen jiný název pro kosmologickou konstantu konkrétní vesmírné bubliny. Na problém, jak vysvětlit naši kosmologickou konstantu, lze tedy nazírat jako na hlavolam, jak vysvětlit nadmořskou výšku úpatí: Proč je tak blízko k nule, ale přesto není nulová?

A nakonec si všimněte, že jsme původně mluvili o nejjednodušším možném horském terénu, tedy o horském vrcholu, který hladce přechází do úpatí, kde se inflaton nakonec usadí (obrázek na straně 54). Udělali jsme pak ještě jeden krok a přibrali do úvahy další ingredience (Higgsova pole), jejichž vývoj a místa, kde se nakonec usadí, ovlivní fyzikální vlastnosti pozorovatelné ve vesmírné bublině (obrázek na straně 65). Ve strunové teorii je paleta možných vesmírů ještě bohatší. Tvar dodatečných rozměrů rozhoduje o fyzikálních vlastnostech dané vesmírné bubliny, proto teď různá „místa k odpočinku“ (různá údolí v obrázku *b* na straně 65) znázorňují možné tvary, které si mohou přisvojit dodatečné rozměry. Abychom mohli nalézt všech 10^{500} možných tvarů těchto rozměrů, musí mít horský terén hojnost údolí, skalních převisů a odkryvů horniny (obrázek na straně 149). Každé takové místo, v němž by míček mohl zůstat v klidu, odpovídá možnému tvaru, do něhož se dodatečné rozměry mohou dostat a v němž mohou přetrvávat; nadmořská výška v tomto bodě představuje kosmologickou konstantu odpovídající vesmírné bublině. Námi nakreslený obrázek představuje *strunovou krajinu*.

Protože teď už této horské – nebo krajinné – metafoře rozumíme lépe,



Strunovou krajinu lze schematicky znázornit jako horský terén, v němž různá údolí představují rozmanité tvary dodatečných rozměrů a nadmořská výška reprezentuje velikost kosmologické konstanty.

můžeme se podívat i na to, jak kvantové procesy ovlivňují v této představě tvar dodatečných rozměrů. Jak uvidíme, krajina se díky kvantové mechanice rozzáhá.

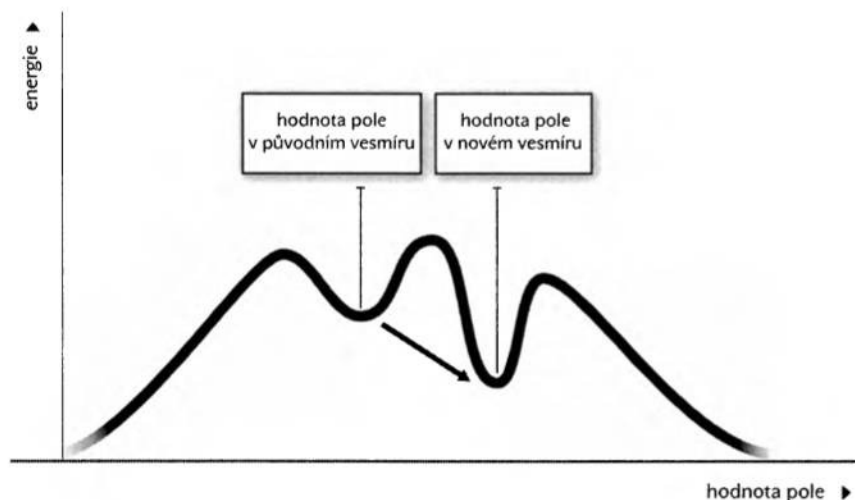
Kvantové tunelování v krajině

Obrázek nahoře je samozřejmě schematický (každé jednotlivé Higgsovo pole na obrázku na straně 65 má svou osu; podobně i každý z 500 různých toků skrze Calabiho-Yauovu varietu měl mít vlastní osu – ale načrtnout hory v 500-rozměrném prostoru není jednoduché), navozuje však správnou představu, že vesmíry s různými tvary dodatečných rozměrů jsou součástmi souvislého terénu.¹⁶ Když navíc vezmeme do úvahy kvantovou mechaniku, konkrétně výsledky objevené nezávisle na teorii strun legendárním fyzikem Sidneyem Colemanem ve spolupráci s Frankem De Lucciou, vztahy mezi různými vesmíry se mohou dramaticky proměnit.

Fyzikální podstata takové proměny se odvíjí od procesu známého jako *kvantové tunelování* nebo přesněji *tunelový jev*. Představte si částici, například elektron, která se dostane k pevné bariéře, například k tři metry tlusté ocelové desce, jíž podle klasické fyziky částice nemůže projít. Jednou z charakteristických vlastností kvantové mechaniky je, že přísné klasické pravidlo

o „nemožnosti projít“ bývá často nahrazeno měkčím, kvantověmechanickým výrokem o „malé, ale nenulové pravděpodobnosti průniku“. To proto, že kvantové chvění částici jednou za nějaký čas dovolí, aby se najednou zhmotnila na opačné straně jinak neprostupné bariéry. Okamžik, v němž k takovému tunelování dojde, je náhodný; předpovědět můžeme nanejvýš pravděpodobnost, že se tak stane v jednom nebo druhém časovém úseku. Z matematiky víme, že čekáme-li dostatečně dlouho, k průniku skrze víceméně jakoukoli bariéru nakonec dojde. A také k tomu dochází. Kdyby tomu tak nebylo, Slunce by nesvítilo: chtěl-li vodíková jádra dosáhnout dostatečné vzájemné blízkosti, aby se mohla sloučit, musejí se protunelovat bariérou vytvářenou elektromagnetickým odpuzováním mezi jejich protony.

Coleman a De Luccia, spolu s dalšími, kteří šli v jejich šlépějích, rozšířili kvantové tunelování z děje ovlivňujícího jedinou částici na celý vesmír. I ten může čelit podobné „neproniknutelné“ bariéře, která odděluje jeho nynější uspořádání od jiného možného. Abyste si jejich úvahy přiblížili, představte si dva různé vesmíry, které se shodují téměř ve všem, až na jedno pole, které oběma vesmírům prostupuje, ale má v jednom z nich energii vyšší než v tom druhém. V nepřítomnosti bariéry by se mohlo toto pole z místa o vyšší energii skutálet do místa o nižší energii podobně jako míček z kopce, jak jsme viděli v případě inflační kosmologie. Ale co se stane, když energetická křivka pole obsahuje „hrbolek“, který nynější hodnotu od té kýžené odděluje



Příklad energetické křivky pole, která má dvě hodnoty – dvě koryta nebo údolí –, v nichž může pole přirozeně a bez pohybu spočinout. Vesmír vyplněný polem o vyšší hodnotě energie může kvantově tunelovat do hodnoty nižší. Takový proces začne tím, že malá a náhodně umístěná oblast původního vesmíru přeskočí do nižší hodnoty energie; tato oblast se následně rozšiřuje a převádí stále větší objem ze stavu o vyšší energii do stavu s energií nižší.

(jako v obrázku na straně 150)? Coleman s De Lucciou zjistili, že stejně jako v případě jedné částice si může vesmír dovolit to, co klasická fyzika zakazuje: může se prokmitat – kvantově protunelovat – skrze bariéru a dosáhnout tak uspořádání o nižší energii.

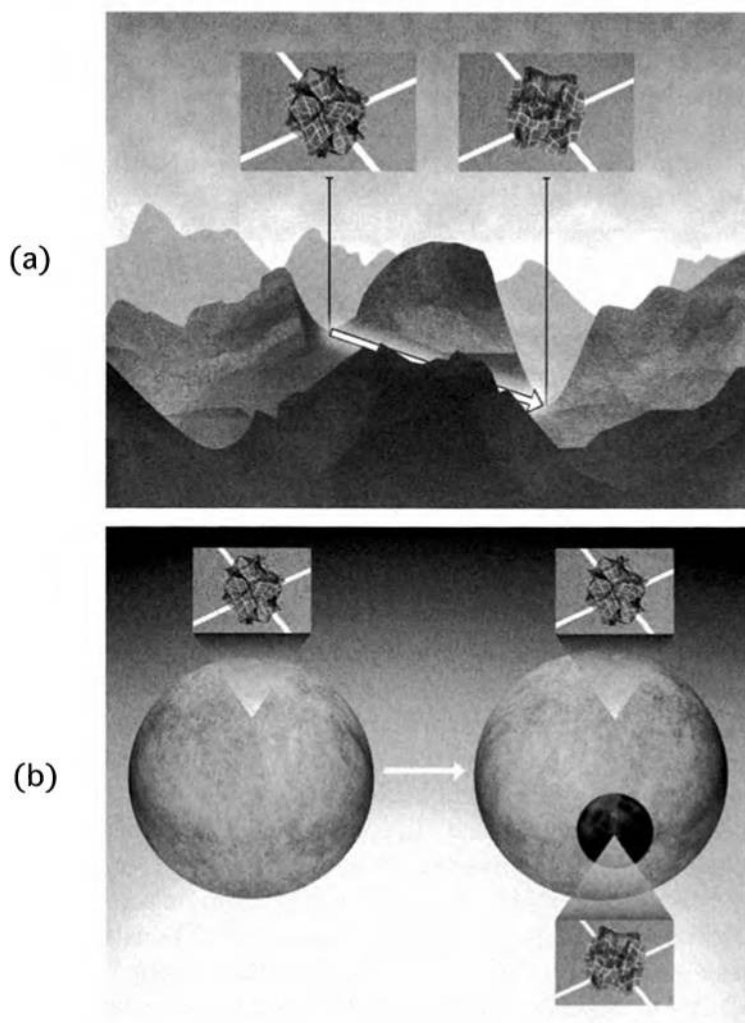
Ale protože jde o vesmír, a ne o jednotlivou částici, je kvantové tunelování komplikovanější. Ne že by se hodnota pole v celém prostoru protunelovala skrze bariéru najednou – zdůraznili Coleman a De Luccia –, „semínko“ tunelového jevu vytváří na náhodném místě malou bublinu, vyplněnou nižší energií pole. Bublina následně roste, trochu jako led typu 9 v povídce *Kolíbka* Kurta Vonneguta, a tak stále rozšiřuje území, ve kterém se už pole protunelovalo do stavu o nižší energii.

Podobné myšlenky lze přímo aplikovat na strunovou krajinu. Představte si, že vesmír má konkrétní tvar dodatečných rozměrů, který odpovídá levému údolí na obrázku *a* na straně 152. Kvůli vysoké nadmořské výšce tohoto údolí jsou obvyklé tři prostorové rozměry prostoupeny vysokou kosmologickou konstantou –, která vytváří silnou odpudivou gravitaci –, a proto se rychle inflačně rozpínají. Tento rozpínající se vesmír, společně s jeho dodatečnými rozměry, vidíte vlevo na obrázku *b*. Potom v náhodném okamžiku a na náhodném místě se malá oblast prostoru protuneluje „pahorkem“ ležícím mezi oběma údolími na pravou stranu obrázku *a*. Nemíním tím, že tato malá oblast se někam pohne (ani nevím, co by to znamenalo), spíše jde o to, že se v této oblasti změni podoba dodatečných rozměrů (jejich tvar, velikost a toky). Dodatečné rozměry se v této malé oblasti promění; nabudou tvaru odpovídajícího pravému údolí z obrázku *a*. Tato nová vesmírná bublina leží – jak ilustruje obrázek *b* – uvnitř té původní.

Tento nový vesmír bude rychle expandovat a zároveň pokračovat v transformaci dodatečných rozměrů. Ale protože kosmologická konstanta nového, dceřiného, vesmíru poklesla – jeho nadmořská výška v krajině je nižší než u toho původního –, odpudivá gravitace, kterou pocítuje, je slabší, a tak se nebude rozpínat tak rychle jako bublina původní, mateřská. Získali jsme tak rozpínající se vesmírnou bublinu s novým tvarem dodatečných rozměrů, obsaženou uvnitř ještě rychleji se rozpínající vesmírné bubliny, jejíž dodatečné rozměry mají původní tvar.¹⁷

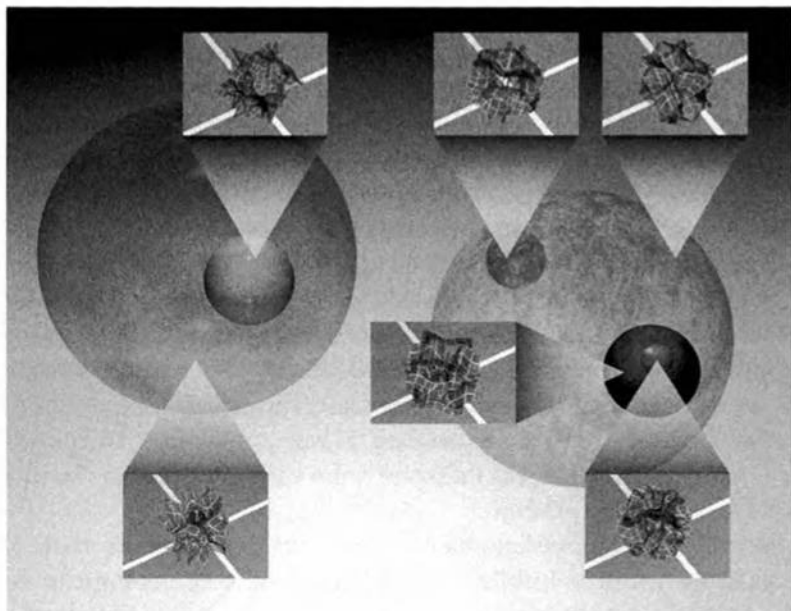
Tento proces se může opakovat. Na nových místech v původním vesmíru i v tom novém mohou nové případy tunelování produkovat nové bubliny – vytvoří tak oblasti s dalšími tvary skrytých rozměrů (obrázek na straně 153). Za určitou dobu bude prostor zaplněn bublinami uvnitř bublin uvnitř bublin – a každou „postihne“ inflační rozpínání, bude mít jiný tvar dodatečných rozměrů a bude mít nižší kosmologickou konstantu než větší mateřská bublina, jíž je obklopena.

Získáme tak zamotanější verzi ementálského multivesmíru, s nímž jsme se setkali už při výkladu věčné inflace. Jeho stará verze obsahovala jen dva typy



(a) Příklad kvantového tunelování ve strunové krajině. **(b)** Tunelový jev vytváří malou oblast prostoru – menší, tmavší bublinu –, uvnitř níž už dodatečné rozměry získaly nový tvar.

oblastí: „sýrové“, v nichž inflační rozpínání probíhalo, a „dírové“, v nichž už skončilo. To přímo odráželo jednodušší tvar krajiny – jedinou horu s úpatím na hladině moře. Bohatší krajina strunové teorie, krajina s rozmanitými vrcholky a údolími, která přísluší různým hodnotám kosmologické konstanty, vede ke zrodu mnoha různých oblastí – jako na obrázku na straně 153 – bublin uvnitř bublin uvnitř bublin, připomínajících posloupnost matryšok, z nichž každou pomaloval jiný umělec. Po určitém čase vymodeluje neúprosné opakování tunelového jevu v hornaté strunové krajině každý možný tvar dodatečných vesmírů v jedné nebo druhé vesmírné bublině. Tak vypadá *krajinný multivesmír*.



Opakovaný tunelový jev vymodeluje hierarchickou strukturu do sebe navzájem vložených vesmírných bublin, každou s jiným tvarem dodatečných rozměrů.

Krajinný multivesmír je přesně tím, co nám chybělo ve Weinbergově vysvětlení kosmologické konstanty. Tvrdili jsme, že strunová krajina zaručuje, že v principu existují *možné* tvary dodatečných rozměrů, které s sebou přinášejí kosmologickou konstantu přibližně rovnou hodnotě pozorované: ve strunové krajině existují údolí, jejichž nízká nadmořská výška odpovídá malé, ale nenulové kosmologické konstantě, kterou odhalila pozorování supernov. Když se strunová krajina zkombinuje s věčnou inflací, všechny možné tvary dodatečných rozměrů, včetně těch s podobně nízkou kosmologickou konstantou, jsou uvedeny v život. Někde uvnitř ohromného ekosystému vesmírných bublin tvořících krajinný multivesmír existují vesmíry, jejichž kosmologická konstanta je přibližně 10^{-123} , to drobné číslo, jímž tato kapitola začala. A podle tohoto řetězce úvah v jedné z těchto bublin žijeme.

A co zbytek fyziky?

Přestože vesmír, který obýváme, kromě kosmologické konstanty charakterizuje mnoho dalších veličin, zůstává kosmologická konstanta nejspíše jednou z těch nejzáhadnějších, jelikož její nepatrná naměřená velikost je jak známo v naprostém nesouladu s čísly, která vycházejí z nejpřímochařejších odhadů inspirovaných dobře zavedenými teoriemi. Tato propast přitahuje ke kosmologické konstantě fyziky a její existence podtrhuje potřebu nalezení rámce,

jakkoli exotického, který by uměl její hodnotu vysvětlit. Obhájci spletence myšlenek, které jsme zmínili, tvrdí, že strunová krajina to už dokázala.

Ale co si počít s ostatními vlastnostmi vesmíru? S existencí tří druhů neutronů, s konkrétní hmotností elektronu, se silou slabé jaderné interakce a tak dále? Mohli bychom sice předpokládat, že se jejich hodnoty dají nějak vypočítat, ale zatím to nikdo nedokázal. Mohli byste se ptát, zda jejich hodnoty lze vysvětlit na základě argumentů spojených s multivesmírem. A skutečně, badatelé prohlížející strunovou krajinu zjistili, že i tato čísla, stejně jako kosmologická konstanta, se mění od místa k místu, a proto – alespoň podle dnešního chápání strunové teorie – nejsou jednoznačně určena. A tak dospíváme k pohledu velmi odlišnému od toho, který převládal v rané éře strunové teorie. Zdá se, že naše snaha vypočítat vlastnosti fundamentálních částic, stejně jako snaha spočítat vzdálenost Země od Slunce, může být marná. Podobně jako poloměr oběžných drah se i některé nebo všechny z těchto vlastností mění od jednoho světa k druhému.

Abyste takové uvažování získalo na věrohodnosti, potřebujeme vědět alespoň to, zda existují vesmírné bubliny, v nichž mají vedle kosmologické konstanty správnou hodnotu i vlastnosti sil a částic, které vědci změřili v našem vesmíru. Musíme si být jistí, že vesmír, který se s naším vesmírem shoduje do nejmenších podrobností, lze někde v krajině nalézt. Právě to je cílem pulzujícího oboru nazývaného *konstrukce strunových modelů* (či anglicky *string model building*). Jde o výzkumný program, v němž badatelé matematicky zkouší různé tvary dodatečných rozměrů v krajině a hledají vesmíry co nejvíc podobné vesmíru našemu. Úkol je to impozantní, protože zkoumaná krajina je příliš velká a příliš spletitá na to, aby ji bylo možné studovat podle nějakého systematického návodu. Pokrok v tomto programu vyžaduje vytříbené výpočetní schopnosti i intuici ohledně toho, které součástky je třeba smontovat – jaký vícerozměrný tvar, jakou velikost, jaké toky polí skrze jeho díry, jaké brány, pokud vůbec nějaké, a tak dále. Ti, kdo s tímto problémem zápolí, spojují to nejlepší z exaktní vědy i z umělecké vnímavosti. Do dnešního dne žádný z nich nenalezl řešení, které odpovídá našemu vesmíru přesně. Ovšem vzhledem k tomu, že 10^{500} dalších možností stále čeká na vyšetření, nijak neudivuje, že mezi vědci panuje shoda v tom, že náš vesmír nejspíše někde v krajině svůj domov má.

Je to věda?

V této kapitole jsme obrátili kormidlo logiky. V předchozích kapitolách jsme zjišťovali, jak nejrůznější poznatky získané při výzkumu fundamentální fyziky a kosmologie ovlivnily realitu. Rozplýval jsem se nad možností, že v dalekých končinách kosmu existují kopie Země nebo že náš vesmír je jen jednou z mnoha vesmírných bublin, jež podstupují inflaci, nebo že žijeme v jednom

z mnoha bránových světů tvořících obří kosmický bochník. To jsou nepopíratelně provokativní a svůdné myšlenky.

V případě krajinného multivesmíru jsme se k paralelním vesmírům dostali jinak. V přístupu, který jsme teď představili, není krajinný multivesmír pouhým rozšířením našeho názoru na to, co všechno „tam někde“ existuje. Místo toho je posloupnost paralelních vesmírů, světů, které teď a patrně ani nikdy v budoucnosti navštívit, vidět, testovat ani ovlivnit nemůžeme, přímo využita k vysvětlení určitých pozorování prováděných ve vesmíru našem.

Tím se dostáváme k podstatné otázce: Jde ještě o vědu?

Kapitola sedmá

Věda a multivesmír

O úsudku, vysvětlení a předpovědích

Když se David Gross, jeden z laureátů Nobelovy ceny za fyziku z roku 2004, pustí do kritiky krajinného multivesmíru teorie strun, s vysokou pravděpodobností ocituje projev Winstona Churchilla z 29. října 1941: „Nikdy se nevzdávejte... Nikdy, nikdy, nikdy, nikdy – v ničem, malém ani velkém, významném ani malicherném, nikdy se nevzdávejte.“ Když Paul Steinhardt, držitel profesorského křesla na Princetonské univerzitě pojmenovaného po Albertu Einsteinovi a spoluobjevitel moderní verze inflační kosmologie, mluví o svém znechucení krajinným multivesmírem, vyjadřuje se poněkud méně poeticky, ale můžete se vsadit, že na srovnání s náboženstvím, které z toho navíc vyjde vítězně, v určité chvíli také dojde. Martin Rees, královský astronom Spojeného království, vidí v multivesmíru přirozený další krok v našem prohlubujícím se chápání všeho, co existuje. Leonard Susskind prohlašuje, že ti, kdo ignorují možnost, že jsme všichni částí multivesmíru, jen strkají hlavu do písku před vizí, jejíž převahu si sami uvědomují. Zmínil jsem jen několik příkladů. Na obou stranách fronty stojí fyzici, vehementní popírači i zbožní vyznavači, kteří nevyjadřují své názory vždy zrovna nejuhlašeněji.

Za čtvrtstoletí, ve kterém jsem se věnoval teorii strun, jsem se nikdy neseťkal s podobnými vášněmi a s ostrým jazykem, jaké přinesly diskuse o krajině ve strunové teorii a o multivesmíru, který z ní může plynout. A je jasné proč. Mnozí v těchto nových myšlenkách vidí bitevní pole ve válce o samotnou duši vědy.

Duše vědy

Rozbuškou se sice stal krajinný multivesmír, ale spory se soustředily na otázky zásadní pro jakoukoli teorii, v níž hraje roli multivesmír. Lze ve vědě vůbec ospravedlnit pojem multivesmíru, který postuluje existenci oblastí nedostupných nejen v praxi, ale v některých případech i v principu? Lze hypotézu multivesmíru testovat nebo vyvrátit? Lze úvahami o multivesmíru vysvětlit něco, co by jinak zůstalo nevysvětleno?

Je-li odpověď na tyto otázky záporná, jak odpůrci vytrvale tvrdí, potom obhájcí multivesmíru přistupují k vědě zcela neobvyklým způsobem. Netestovatelné, nevyvratitelné domněnky o oblastech, které nejsme s to pozorovat – to všechno se zdá na hony vzdálené tomu, co by většina vědců chtěla nazývat vědou. Právě zde doutnala jiskra, která všechny vášně zažehla. Obhájcí opouňují tím, že bytí může být způsob, jak lze multivesmír propojit s pozorováními, odlišný od všeho toho, nač jsme zvyklí – více nepřímý, méně přímočarý či závislý na šťastné náhodě, která pomůže budoucím experimentům –, v seriózních návrzích taková spojení mezi teorií a experimentem v zásadě nalézt lze. Aniž by se za cokoli omlouvali, fyzici takto argumentující značně rozšiřují sféru poznatků, které lze našimi teoriemi a pozorováními odhalit, i způsobů, jak tyto poznatky lze ověřovat.

Na kterou stranu barikády v zápoleení o multivesmír se postavíte, závisí i na vašem chápání toho, co je primárním úkolem vědy. Většina obecných shrnutí zdůrazňuje, že věda je proces hledání pravidelností ve fungování vesmíru a vysvětlování, jak tyto pravidelnosti osvětlují a zároveň odrážejí odpovídající přírodní zákony, jakož i takové testování domnělých zákonů, v němž se nejprve vysloví předpovědi a pak se potvrdí nebo vyvrátí dalšími experimenty nebo pozorováními. Třebaže může taková charakteristika znít seberozněněji, přehlíží to, že skutečný vědecký proces nelze takto přesně plánovat a že je v něm pokládání správných otázek často stejně důležité jako hledání a testování navržených odpovědí. A otázky nerostou na nějakém předem existujícím stromě myšlenek, jež by vědci mohli jednoduše jednu po druhé otrhat. K dnešním otázkám nás místo toho často inspirují včerejší poznatky. Vědecké revoluce obecně zodpoví některé otázky, ale nastolí i řadu otázek nových, které si vědci dříve neuměli ani představit. Hodnotíme-li libovolný trend ve vědě včetně teorií multivesmíru, musíme vzít do úvahy nejen jejich schopnost odhalit skryté pravdy, ale i jejich vliv na problémy, s nimiž se můžeme utkat. Tedy vliv na to, jak samotná věda v praxi vypadá. Jak ještě uvidíte, teorie multivesmíru mají schopnost transformovat některé z nejhlubších otázek, s nimiž vědci zápolili celá desetiletí. V této schopnosti nacházejí někteří povzbuzení, jiní zdroj hněvu.

Teď už jsme připraveni systematicky posoudit legitimnost, testovatelnost a užitečnost teorií, podle nichž je náš vesmír jen jedním z mnoha.

Dosažitelné multivesmíry

Není lehké najít v těchto otázkách shodu, a to částečně proto, že pojem multivesmíru není jednolitý monolit. Už jsme se setkali s pěti jeho verzemi – sešivaným, inflačním, bránovým, cyklickým a krajinným – a v následujících kapitolách k nim přibudou další čtyři. Nijak proto nepřekvapuje, že *blíže*

nespecifikovaný pojem multivesmíru se těší pověsti netestovatelné spekulace. Koneckonců, jak hodnotitelé většinou poznamenávají, přístup máme jen do našeho vesmíru, takže uvažovat o vesmírech dalších je vlastně totéž jako věřit v demony nebo ve vílu Zuběnku. (Když americkým dětem vypadnou mléčné zuby, často si je schovávají pod polštář a rodiče jim říkají, že přijde víla Zuběnka a vymění je za několik mincí.) A opravdu, tohle je stěžejní problém, s nímž se brzy popereme. Ale nejdříve si povšimněte, že některé multivesmíry *umožňují* interakce mezi svými jednotlivými „členskými“ vesmíry. Viděli jsme, že v bránových vesmírech mohou uzavřené smyčky strun cestovat od jedné brány k druhé. A v inflačním vesmíru se mohou vesmírné bubliny dostat do ještě přímějšího kontaktu.

Vzpomeňte si, že prostor mezi dvěma vesmírnými bublinami v inflačním multivesmíru je prostoupen inflatonovým polem s vysokou energií a záporným tlakem, které proto i nadále vyvolávají inflační rozpínání. Toto rozpínání rozhání vesmírné bubliny od sebe. Když však tempo rozpínání bublin přeroste rychlost, s jakou je nafukující se prostor mezi nimi rozhání, bubliny se přece nakonec srazí. Vezmete-li v úvahu, že inflační rozpínání má kumulativní charakter – čím více prostoru je mezi bublinami, tím rychleji jsou tlačeny od sebe –, dojdete k zajímavému zjištění. Když se dvě bubliny *opravdu* přiblíží na dotyk, bude je oddělovat tak tenký prostor, že tempo jejich vzdalování bude pomalejší než rychlost jejich rozpínání. A tím nevyhnutelně dojde ke kolizi bublin.

Tato logika je podepřena i matematikou. V inflačním multivesmíru se vesmíry mohou srazit. Navíc několik skupinek fyziků (mezi nimi Jaume Garriga, Alan Guth a Alexandr Vilenkin či Ben Freivogel, Matthew Kleban, Alberto Nicolis a Kris Sigurdson, a také Anthony Aguirre a Matthew Johnson) prokázalo, že zatímco některé srážky mohou vnitřní strukturu každé vesmírné bubliny dramaticky narušit – což není moc dobré pro obyvatele bublin, jako jsme my –, mohou se vyskytnout i jemnější „masáže“, které sice k tak tragickým koncům nevedou, přesto ve vesmíru zanechávají pozorovatelné stopy. Výpočty ukazují, že kdybychom byli spolu s jinou bránou účastníky takové „drobné dopravní nehody“, šokové vlny by se rozptýlily po prostoru a trochu by pozměnily tvar teplých a studených oblastí v reliktním záření.¹ Badatelé teď podrobný „otisk prstů“, který by taková lehká srážka zanechala, zkoumají; kladou tak základy budoucích pozorování, která jednoho dne třeba poskytnou důkazy o tom, že se náš vesmír někdy srazil s dalšími, tedy důkazy o tom, že existují další vesmíry.

Jakkoli vzrušující taková vize může být, musíme se stále ptát: Co když žádný test interakci nebo setkání s dalšími vesmíry neprokáže? V jaké situaci se z praktického hlediska ocitne pojem multivesmíru, pokud naše experimenty a pozorování nikdy žádné zprávy o ostatních vesmírech nenaleznou?

Věda a nedosažitelné světy I

Může věda ospravedlnit diskuse o nepozorovatelných vesmírech?

Každý teoretický rámec je vybaven určitou architekturou – jistými základními teoretickými ingrediencemi a matematickými zákony, kterými se tyto ingredience řídí. Kromě toho, že tato architektura definuje teorii, vymezuje i druh otázek, které lze v rámci teorie pokládat. Architektura podle Isaaca Newtona měla blízko k pojmům, jichž se lidé mohou „dotknout“. Jeho matematika hovořila o pozicích a rychlostech objektů, se kterými se buď přímo setkáváme, nebo které můžeme vidět, od kamenů přes koule až k Měsíci a Slunci. Dlouhá řada pozorování Newtonovy předpovědi potvrdila a tím nás naplnila jistotou, že jeho matematika skutečně popisuje pohyb důvěrně známých těles. Architektura podle Jamese Clerka Maxwella zavedla jeden zásadně nový prvek abstrakce. Vibrující elektrická a magnetická pole nejsou druhem věcí, k jejichž přímému „osahávání“ se vyvinuly naše smysly. Ačkoli vidíme „světlo“ – elektromagnetické vlnění, jehož vlnová délka leží v intervalu, který mohou naše oči zaregistrovat –, naše vizuální vjemy nám nic neříkají o vlnících se polích, jejichž existenci teorie předpovídá. A přesto můžeme zkonstruovat důmyslná zařízení schopná tyto vibrace naměřit a to nám v kombinaci s pestrou paletou ověřených předpovědí teorie přináší neobyčejně přesvědčivý důkaz, že jsme ponořeni v oceánu pulzujících elektromagnetických polí.

Ve 20. století se začala fundamentální věda stále více věnovat nepřístupným vlastnostem světa. Prostor a čas se sjednotily, aby poskytly „stavební lešení“ pro speciální relativitu. Když je později Einstein učinil tvárnými, staly se podle obecné teorie relativity ohebným podložím vesmíru. Už jsem slyšel hodinky tikat a krejčovským metrem změřil výšku, ale zatím jsem se pravda nesblížil s časoprostorem stejně intimně jako s opěradly křesla, v němž sedím. Cítím důsledky gravitace, ale kdybyste po mně chtěli, abych odpřísáhl, že jsem ponořen v zakřiveném časoprostoru, zaskočili byste mě podobně jako v případě Maxwellových polí. Jsem přesvědčen, že speciální i obecná teorie relativity jsou správné, ale nikoli proto, že bych si mohl přímo osahat jejich základní stavební kameny, ale proto, že přijmu-li jejich teoretický rámec, plynou z jejich matematiky předpovědi o věcech, které můžu změřit. A ukazuje se, že jde o předpovědi mimořádně přesné.

Kvantová mechanika nás posunuje ještě dále – k pojmům nedosažitelným. Klíčovým pojmem kvantové mechaniky je pravděpodobnostní vlna, jejíž vývoj stanoví rovnice objevená v polovině dvacátých let minulého století Erwinem Schrödingerem. I když jsou tyto vlny jedním ze symbolů celé teorie, jak uvidíme (v 8. kapitole), zaručuje architektura kvantové fyziky, že jsou trvale a zcela nepozorovatelné. Pravděpodobnostní vlny lze užít k předpovědím, kde nejspíše tuto nebo jinou částici najdeme, ale vlny samotné se pohybují někde mimo jeviště každodenní reality.² Nicméně protože předpovědi slaví

takový úspěch, celá pokolení vědců se smířila s podivnou situací: teorie zavádí pojem radikálně nový, životně důležitý, ovšem podle teorie samotné nepozorovatelný.

Společná nit, která tyto příklady spojuje, tkví v tom, že úspěchem teorie lze dodatečně zdůvodnit její základní architekturu dokonce i tehdy, když přímý přístup k této architektuře není možný. Toto pravidlo je natolik standardní součástí každodenního života teoretických fyziků, že jejich jazyk a zvláště otázky běžně odkazují, a to bez jakýchkoli rozpaků, na objekty, které jsou přinejmenším mnohem méně přístupné než stoly a židle a které dokonce v určitých případech leží trvale za hranicemi toho, co můžeme přímo zažít.*

Když postoupíme dále a odvodíme z teorie něco o jevech, které z její architektury plynou, střetneme se ještě s jedním druhem nedosažitelnosti. Černé díry plynou z matematiky obecné relativity a astronomická měření nám poskytla přesvědčivé důkazy o tom, že jsou nejen reálné, ale dokonce téměř všudypřítomné. Přes to všechno zůstává vnitřek černé díry prostředím exotickým. Podle Einsteinových rovnic je hranice černé díry, její horizont událostí, povrchem, zpod něhož není návratu. Můžete ho překročit směrem dovnitř, ale už se nedostanete ven. My, zapřísláhlí obyvatelé vnějšku černých děr, se nikdy do vnitřku černé díry nepodíváme, a to nejen z praktických důvodů, ale i kvůli zákonům samotné obecné relativity. A přece panuje naprostá shoda v tom, že i prostor na druhé straně od horizontu událostí černé díry je reálný.

Aplikujeme-li obecnou relativitu na kosmologii, setkáme se s ještě extrémnějšími případy nedosažitelnosti. Nevadí-li vám jednosměrné jízdenky na cesty, z nichž není návratu, vnitřek černé díry je přinejmenším možnou cílovou stanicí. Ale světy ležící za naším kosmickým horizontem jsou nedosažitelné, i kdybychom třeba cestovali téměř rychlostí světla. Ve zrychlujícím se vesmíru, jako je ten náš, je toto tvrzení opravdu nabílední. Vzhledem ke změřené hodnotě kosmologického zrychlování (a předpokládáme-li, že se nezmění) zůstává každý objekt, který je od nás přes nějakých 20 miliard světelných let daleko, natrvalo za hranicemi světa, který bychom mohli vidět, navštívit, změřit nebo ovlivnit. Na místech ještě vzdálenějších bude prostor unášen od nás tak rychle, že jakýkoli pokus překonat tuto propast bude stejně marný jako snaha kajakářky pádlovat proti proudu, který teče rychleji, než ona pádluje.

* Protože existují různé pohledy na úlohu vědecké teorie v úsilí o pochopení přírody, moje poznámky lze interpretovat mnoha způsoby. Významné filozofické tábory tvoří *realisté*, podle nichž mohou matematické teorie poskytnout přímý vhled do charakteru reality, a *instrumentalisté*, kteří věří, že teorie poskytuje pouze prostředek k předpovídání, co by měla naše zařízení naměřit a zaregistrovat, ale neříká nám nic o realitě, kterou taková měření odrážejí. Po desítkách let náročných konfrontací vyvinuli filozofové vědy nescetná upřesnění těchto a dalších pozic. Nepochybně je jasné, že se nejen v této knize řadím do tábora realistů. Obzvláště k této kapitole, v níž jsem zkoumal vědeckou platnost různých typů teorií a hodnotil, co tyto teorie mohou znamenat pro povahu reality, by příznivci jiných filozofických orientací přistoupili velmi odlišně.

Objekty nacházející se odjakživa za naším kosmickým horizontem jsme nikdy nemohli pozorovat a ani je nikdy moci pozorovat nebudeme; ani ony nezachycovaly světlo od nás a nikdy ani nebudou. Objekty, které v určitém období v minulosti byly na vnitřní straně našeho kosmického horizontu, ale rozpínání prostoru je odfouklo ven, jsme kdysi v minulosti vidět mohli, ale podruhé se tak už nestane. Přesto si myslím, že můžeme souhlasit s tím, že takové objekty jsou stejně reálné jako cokoli hmatatelného a že totéž platí i pro světy, v nichž se nacházejí. Jistě by bylo podivné tvrdit, že galaxie, kterou jsme jednou mohli vidět, ale která poté proklouzla naším kosmickým horizontem ven, vstoupila do říše neexistujícího, do světa, který musí být vymazán z našich map jen proto, že je trvale nedostupný. Ačkoli takové světy pozorovat nemůžeme – ani ony nás –, měly by být správně včleněny do našeho seznamu toho, co existuje.³

Tyto příklady nás nenechávají na pochybách, že věda se nevyhýbá teoriím obsahujícím prvky, ať už jde o základní stavební kameny nebo o jejich důsledky, které jsou nedosažitelné. Naše víra v existenci těchto nehmataelných entit se odvíjí od naší důvěry v teorii samotnou. Když kvantová mechanika pracuje s pravděpodobnostními vlnami, je to právě schopnost této teorie popsat objekty, které můžeme změřit, například atomy a subatomární částice, co nás přesvědčí přijmout i nepozorovatelnou úroveň reality, již teorie předpokládá. Když obecná relativita předpovídá, že existují místa, která pozorovat nemůžeme, bereme tyto předpovědi vážně proto, že tatáž teorie fenomenálně úspěšně předpovídá i to, co pozorovat můžeme, třeba pohyb planet a dráhy světla.

Má-li tedy naše důvěra v teorii vzrůst, nepožadujeme, aby byly všechny její rysy ověřitelné; postačí nám robustní a pestrý sortiment potvrzených předpovědí. Vědecký výzkum už před více než sto lety akceptoval, že teorie může – za předpokladu, že je schopná zajímavých, nových a testovatelných předpovědí o široké paletě pozorovatelných jevů – obsahovat i skryté, nedosažitelné prvky.

To naznačuje, že být žádnou známku existence vesmírů vně toho našeho neodhalíme, lze dát dohromady přesvědčivý argument pro teorii pracující s multivesmírem. Pokud vás data z experimentů a pozorování, která teorii podporují, přesvědčí, abyste teorii přijali, a je-li teorie ukotvena v natolik pevné matematické struktuře, že si nemůžete její vlastnosti vybírat po jedné jako třešničky na dortu, potom zkrátka musíte teorii přijmout se vším všudy. A jestliže z této teorie vyplývá existence jiných vesmírů, potom jste nuceni připustit i tuto formu reality.

Potom tedy v principu – a nepochopte mě špatně: to, co říkám, je míněno v principu – samotný odkaz na nedosažitelné vesmíry nestaví hypotézu mimo hranice vědy. Abyste toto tvrzení přesněji pochopili, představte si, že jednoho dne nás experimenty a pozorování víceméně přesvědčí o správnosti

strunové teorie. Možná bude jeden urychlovač v budoucnosti schopen přímo nalézt posloupnosti strunových vibrací a známky dodatečných rozměrů, zatímco astronomická pozorování zahlédnou otisky strun v reliktním záření a možná i ozvěny dlouhých vibrujících strun roztažených napříč vesmírem. Navíc ještě předpokládejte, že naše porozumění teorii strun zásadně pokročí a my se s naprostou jistotou a nezvratně přesvědčíme o tom, že z teorie vyplývá krajinný multivesmír. Nehledě na hlasité námitky skeptiků by nás tato silnými, od pozorování a experimentů se odvíjejícími argumenty podepřená teorie, jejíž vnitřní struktura vyžaduje multivesmír, neúprosně přiměla k závěru, že čas „vzdát se“ už nastal.*

Otázku v nadpisu této podkapitoly bychom tedy mohli zodpovědět tak, že v určitém vědeckém kontextu by bylo zcela seriózní hovořit o multivesmíru, zato *skrývat se* před ním by nás usvědčilo z nevědeckých předsudků.

Věda a nedosažitelné světy II

Dost bylo řečí v principu. Kde stojíme v praxi?

Skeptik správně namítne, že spekulovat o tom, jak by v principu bylo možné dokázat danou teorii multivesmíru, je něco jiného než řešit otázku, zda kterýkoli z navržených modelů multivesmíru, jež jsme představili, lze považovat za experimentálně ověřenou teorii, která s sebou přináší i absolutní předpověď jiných vesmírů. Hodí se tato charakteristika na některý z druhů teorie multivesmíru?

Podle jedné možnosti, a to té, kterou obecná teorie relativity bez problémů umožňuje, se sešívání multivesmír odvíjí od nekonečné velikosti vesmíru. Háček je v tom, že ji umožňuje, ale *nepožaduje*, a to také vysvětluje, proč takový sešívání vesmír navzdory tomu, že je obecná relativita obecně přijatou teorií, zůstává hypotézou provizorní. Nekonečný objem prostoru se přímo vynojuje z věčné inflace – vzpomeňte si, že každá vesmírná bublina se jeví nekonečně velká, jestliže ji prohlížíme zevnitř –, ale v tomto kontextu začne být sešívání multivesmír nejistým, protože závisí na předpokladu věčné inflace, a ta zůstává pouhou hypotézou.

Stejně úvahy platí i pro inflační multivesmír. I ten vyvěrá z věčné inflace. Astronomická pozorování v posledním desetiletí zvýšila důvěru fyziků v inflační kosmologii, neřekla však nic o tom, zda bude inflační rozpínání pokračovat věčně. Teoretická studia naznačují, že ačkoli mnoho variant inflace

* U multivesmíru obsahujícího enormní počet různých vesmírů máme docela dobrý důvod obávat se toho, že nehledě na to, co experimenty a pozorování ukážou, může někde v obrovité sbírce vesmírů existovat takový vesmír, který je s libovolnými předem danými výsledky měření slučitelný. Je-li tomu tak, nelze teorii vyvrátit žádným experimentálním důkazem; proto by ani údaje neměly být interpretovány jako podpůrné argumenty teorie. Hned se na tento problém podíváme.

věčných je – a tedy předpovídají nesčíslné vesmírné bubliny –, z některých variant plyne pouze jedna rozpínající se oblast prostoru.

Bránový, cyklický i krajinný multivesmír jsou založeny na strunové teorii, a proto jsou nejisté z několika důvodů. Byť je teorie strun pozoruhodná a její matematická struktura dnes už velmi bohatě rozvinutá, nedostatek testovatelných předpovědí a s tím související relativní izolace od pozorování a experimentů ji odsunují do říše vědeckých spekulací. Protože navíc výzkum teorie ještě není u konce, není jasné, které její rysy budou hrát prvořadou úlohu v jejích budoucích zdokonalených formulacích. Budou v ní hrát brány, základní objekty bránových a cyklických multivesmírů, i nadále ústřední úlohu? Přetrvá i nepřeborná nabídka dodatečných rozměrů, na níž závisí krajinný multivesmír, nebo bude nakonec nalezen matematický princip, který vybere ten správný tvar? Prostě nevíme.

Přestože si tedy umíme představit, že jednou přijdeme s přesvědčivým argumentem pro teorii multivesmíru a že tento argument nebude záviset na nejistotě ohledně existence jiných vesmírů, taková optimistická očekávání se nenaplnila v případě těch druhů multivesmírů, s nimiž jsme se setkali. Alespoň prozatím ne. Abychom zhodnotili kteroukoli z variant, musíme se utkat s její předpovědí multivesmíru přímo.

Dokážeme to? Může samotný fakt, že teorie pracuje s jinými vesmíry, vést k testovatelným předpovědím, přestože jsou tyto vesmíry za hranicemi našich experimentů a pozorování? Odpověď na tuto otázku rozdělíme do několika kroků. Stejně jako předtím budeme postupovat od úvah „v principu“ k úvahám „v praxi“.

Předpovědi v multivesmíru I

*Mohou nedosažitelné vesmíry tvořící multivesmír
přesto pomoci v utváření předpovědí?*

Ti z vědců, kteří se brání teoriím multivesmíru, považují celý tento druh výzkumu za přiznání porážky, za stoprocentní kapitulaci v pradávném boji o porozumění tomu, proč má vesmír ty vlastnosti, které pozorujeme. Jako jeden z těch, kdo po desítky let snili o tom, že budou z rovnic strunové teorie vypočteny všechny fundamentální pozorovatelné vlastnosti vesmíru včetně hodnot přírodních konstant, se do jejich pocitů dokážu vcítit. Akceptujeme-li, že jsme součástí multivesmíru, v němž se některé, nebo spíše všechny, konstanty mohou měnit od jednoho vesmíru k druhému, přijímáme zároveň tvrzení, že už tento cíl byl hlubokým nedorozuměním. Jestliže fundamentální zákony například dovolují elektromagnetické síle, aby působila v různých částech multivesmíru s různou intenzitou, potom už samotný úkol spočítat její *konkrétní* hodnotu je stejně nesmyslný jako klavíristův úkol zahrát jediný *správný* tón.

Vyvstává i další otázka: Znamená proměnlivost vlastností, že ztrácíme veškerou schopnost předpovídat (nebo zpětně vysvětlit) vlastnosti vesmíru našeho? Nemusí tomu tak být. Byť multivesmír znemožňuje jakoukoli jedinečnost, nelze vyloučit, že se schopnost předpovídat do určité míry uchová. A tu míru určuje statistika.

Podívejme se třeba na psy. Nemají univerzální hmotnost. Existují velmi lehké, ani ne kilové rasy, jako třeba čivava, ale i rasy velmi těžké, až stokilové, jako je anglický mastif. Kdybych vám zadal úkol předpovědět hmotnost prvního psa, kterého potkáte na ulici, zdálo by se, že jediné, co vám zůstane, je vybrat ze zmíněného intervalu náhodné číslo. S trochou dodatečných informací se můžete pokusit o preciznější odhad. Získáte-li informace o psí populaci ve vaší čtvrti, například o počtu lidí, kteří chovají tu nebo onu rasu, o statistickém rozdělení hmotností pro každou rasu a třeba i o čase stráveném každý den průměrným psem dané rasy na procházkách, potom můžete hmotnost psa, jehož potkáte, zjistit s *nejvyšší pravděpodobností*.

Taková předpověď by nebyla jednoznačná; statistické předpovědi většinou ani takové nebývají. Ale u určitých statistických rozdělení byste mohli hmotnost stanovit mnohem lépe, než kdybyste si nějaké číslo vytáhli z klobouku. Je-li rozdělení hmotností ve vaší čtvrti dostatečně úzké, například když 80 % psů jsou labradorští retrívři, jejichž průměrná hmotnost je 32 kilogramů, a zbylých 20 % by zahrnovalo rasy od pudlů ke skotským teriérům, tedy psy s průměrnou hmotností 9 kilogramů, potom by se vám mohlo vyplatit vsadit na rozmezí 28–36 kilogramů. Pes, kterého jako prvního potkáte, sice může být načechraný ši-cu, ale nejspíše nebude. Je-li rozdělení ještě koncentrovanější, vaše předpovědi mohou být ještě přesnější. Tvoří-li 95 % psů ve vašem bydlišti labradorští retrívři o hmotnosti 29 kilogramů, potom budete mít ještě pádnější důvod očekávat, že první pes, jehož na ulici potkáte, bude nejspíše jeden z nich.

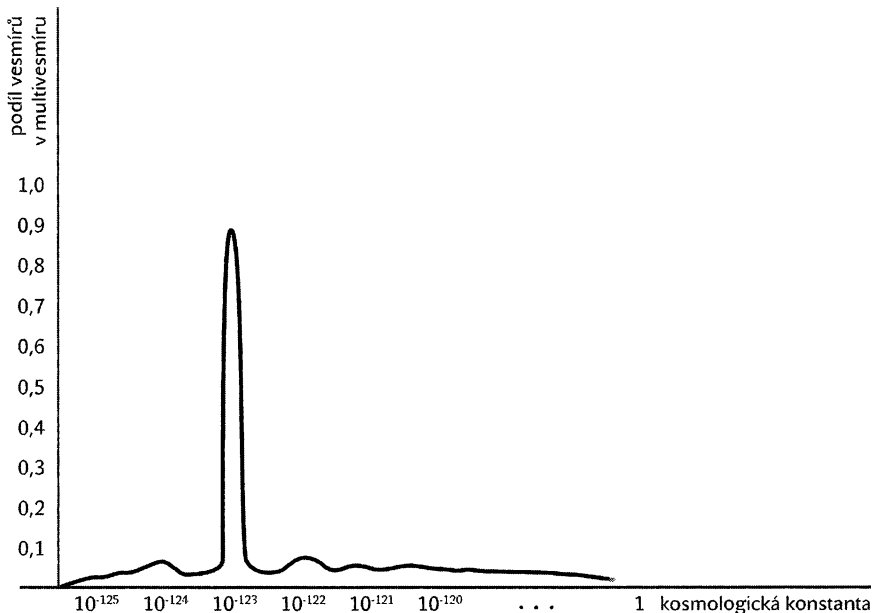
Podobný statistický postup lze aplikovat i na multivesmír. Představte si, že zkoumáme teorii multivesmíru, která dovoluje široký sortiment různých vesmírů – vesmírů s různými velikostmi sil, vlastnostmi částic, hodnotami kosmologické konstanty a tak dále. K tomu ještě předpokládejte, že tyto vesmíry se rodí v procesu (stejně jako vesmírné bubliny v krajinném multivesmíru), jehož průběh umíme dostatečně dobře předpovídat, takže můžeme určit statistické rozdělení vesmírů v multivesmíru podle jejich různých vlastností. Tato informace ukrývá potenciálně důležité poznatky.

Abyste je alespoň v jednom příkladě odkryli, předpokládejte, že z výpočtů vyplývá obzvláště jednoduché rozdělení: některé fyzikální vlastnosti různých vesmírů se výrazně liší, jiné vlastnosti jsou konstantní. Z matematiky může třeba vycházet, že existuje skupina částic, jejichž náboje a hmotnosti mají stejné hodnoty ve všech vesmírech. Z takového rozdělení vycházejí zcela jednoznačné předpovědi. Když z experimentů v našem jediném, osamoceném, vesmíru

nevyplyne předpověděná skupina částic, potom jsme tu teorii i s multivesmírem a vším ostatním vyvrátili. Znalost rozdělení tedy učinila teorii multivesmíru vyvratitelnou. A naopak, pokud by naše experimenty předpověděné částice našly, naše důvěra ve správnost teorie by vzrostla.⁴

Pro další příklad si dojdeme do multivesmíru, v němž se kosmologická konstanta mění ve velmi širokém intervalu, ale jejíž statistické rozdělení je velmi nerovnoměrné, jak schematicky znázorňuje dolní obrázek. Graf ukazuje podíl vesmírů v multivesmíru (svislá osa), které mají danou hodnotu kosmologické konstanty (vodorovná osa). Kdybychom obývali takový multivesmír, záhada kosmologické konstanty by získala zcela odlišný charakter. Většina vesmírů v tomto scénáři má kosmologickou konstantu v blízkosti hodnoty, kterou jsme v tomto vesmíru naměřili, takže ačkoli interval *možných* hodnot by byl velmi široký, z nehomogenního rozdělení vyplývá, že hodnota, kterou pozorujeme, není ničím zvláštním. V takovém multivesmíru by vás nemělo překvapit, že má kosmologická konstanta hodnotu 10^{-123} , o nic více než setkání s 29kilovým labradorským retrívrem při vaší první procházce městem. Při pohledu na odpovídající rozdělení je jasné, že v obou případech to byla ta nejpravděpodobnější událost, jaká mohla nastat.

Pohrajme si s jednou variací těchto úvah. Představte si, že v určité teorii multivesmíru může kosmologická konstanta nabývat široké palety hodnot, ale na rozdíl od předchozího případu je rozdělení hodnot rovnoměrné; počet



Možné rozdělení hodnot kosmologické konstanty v hypotetickém multivesmíru ilustruje fakt, že jinak záhadná pozorování lze pochopit, je-li rozdělení soustředěno na správném místě.

vesmírů s jednou hodnotou kosmologické konstanty je srovnatelný s počtem vesmírů s jinou hodnotou kosmologické konstanty. K tomu si ještě představte, že podrobný matematický rozbor navržené teorie multivesmíru odhalil neočekávanou vlastnost onoho rozdělení. U vesmírů s kosmologickou konstantou blízkou té už pozorované pokaždé z matematických rovnic vyplývá existence takového druhu částice, jejíž hmotnost je řekněme 5 000násobek hmotnosti protonu; je tedy příliš těžká pro urychlovače 20. století, ale jako stavěná na detekci urychlovači 21. století. Díky této pevné korelaci mezi dvěma fyzikálními vlastnostmi je tato teorie multivesmíru také vyvrátitelná. Když předpověděnou částici nebudeme moci najít, bude tato teorie multivesmíru vyvrácena, naopak objev částice správné hmotnosti naši důvěru ve správnost teorie posílí.

Musím zdůraznit, že jde o scénáře veskrze hypotetické. Zmiňuji se o nich proto, že objasňují možný charakter vědeckých poznatků a jejich ověřování v kontextu multivesmíru. Už dříve jsem naznačil, že pokud teorie multivesmíru předpovídá kromě existence jiných vesmírů i další jevy, je možné – v principu – shromáždit argumenty pro její správnost, třebaže jsou tyto další vesmíry nedosažitelné. Ve zmíněných příkladech bylo podrobně vysvětleno, jak toho lze dosáhnout. U těchto druhů teorií multivesmírů by na otázku vznesenou v nadpisu této podkapitoly zněla odpověď nepochybně kladná.

Podstatnou vlastností takových „prediktivních multivesmírů“ je, že nejsou pouhou náhodně namíchanou všehochutí členských vesmírů. Jejich schopnost vytvářet předpovědi stojí na vrozených matematických pravidelnostech: fyzikální vlastnosti jsou mezi členskými vesmíry rozděleny buď velmi nerovnoměrným způsobem, nebo způsobem, v němž se projevují silné korelace mezi různými vlastnostmi.

Jak by k tomu mohlo dojít? A opustíme-li říši „v principu“, *dochází* k tomu skutečně v teoriích multivesmíru, s nimiž jsme se setkali?

Předpovědi v multivesmíru II

Dost bylo řečí v principu. Kde stojíme v praxi?

Statistické rozdělení psů v dané oblasti odráží řadu vlivů, například kulturních a finančních faktorů, stejně jako starých dobrých náhodných shod okolností. Kvůli této složitosti byste se patrně při sázení nezajímali o to, proč se takové rozdělení vytvořilo, spíše byste se tuto těžkou otázkou snažili obejít a zašli byste si pro správné údaje na psí odbor obecního úřadu. Multivesmíry naneštěstí nemají finance na zaměstnávání sčítacích komisařů, takže takové řešení nepřichází v úvahu. Abychom určili statistické rozdělení vesmírů v multivesmíru obsažených, musíme se spoléhat na naše teoretické porozumění tomu, jak daný multivesmír vzniká.

Krajinný multivesmír, odvíjející se od věčné inflace a teorie strun, představuje dobrou názornou ukázkou. V tomto scénáři je zrod nových vesmírů dílem dvou rodičovských procesů – věčné inflace a kvantového tunelování. Vzpomeňte si, jak to funguje. Rozpínající se vesmír, odpovídající jednomu nebo jinému údolí ve strunové krajině, se kvantově protuneluje skrze okolní vrcholky a usadí se v jiném údolí. První vesmír – s konkrétní intenzitou sil, částicovými vlastnostmi, hodnotou kosmologické konstanty a tak dále – v sobě vytvoří rozpínající se bublinu nového vesmíru (viz obrázek na straně 153), vesmír s novými vlastnostmi, a tento proces pokračuje.

Protože je to kvantový proces, mají takové případy tunelového jevu pravděpodobnostní povahu. Nemůžete předpovědět, kdy nebo kde k nim dojde, můžete předpovědět jen *pravděpodobnost*, že tunelový jev nastane v libovolném daném časovém období a že se vesmír „prohrabe“ libovolným daným směrem – a tyto pravděpodobnosti citlivě závisejí na takových vlastnostech strunové krajiny, jako je nadmořská výška různých vrcholů a údolí (tedy hodnota jejich kosmologické konstanty). Pravděpodobnější druhy tunelového jevu budou častější a to se odrazí ve výsledném rozdělení vesmírů. Správným postupem pak tedy je z matematiky inflační kosmologie a strunové teorie vypočítat, jaké je výsledné rozdělení vesmírů napříč krajinným multivesmírem v závislosti na jejich fyzikálních vlastnostech.

Potíž je v tom, že se to zatím nikomu nepodařilo. Podle našeho dnešního chápání je strunová krajina bohatě pokryta obrovským množstvím vrcholků a údolí, a proto je zjišťování vlastností výsledného multivesmíru po čertech obtížným matematickým úkolem. Průkopnické práce kosmologů a strunových teoretiků nás krůček po krůčku posunuly blíže k pochopení těchto otázek, přesto stále ještě zůstáváme na počátku cesty k odhalení všech záhad.⁵

Abychom pokročili dále, měli bychom podle zastánců multivesmíru do koktejlu přimíchat ještě jednu důležitou přísadu. Měli bychom zohlednit selekční jevy nastíněné v předchozí kapitole, tedy antropické úvahy.

Předpovědi v multivesmíru III

Antropické úvahy

Velká část vesmírů v daném multivesmíru zaručeně zůstane bez života. To proto – jak jsme viděli –, že odchylky fundamentálních parametrů přírody od jejich známých hodnot většinou naruší příznivé podmínky pro jeho vznik.⁶ Naše samotná existence dokazuje, že bychom nikdy nemohli zjistit, že se nacházíme v jedné z oblastí bez života, a proto nepotřebujeme dále vysvětlovat, proč nepozorujeme žádnou takovou konkrétní „neživou“ kombinaci vlastností. Kdyby konkrétní teorie multivesmíru vedla k závěru, že vesmír podporující život je jen jeden jediný, zářili bychom štěstím. Vydedukovali

bychom vlastnosti tohoto zvláštního vesmíru matematicky; kdyby se lišily od těch, které jsme změřili, byl by tento model multivesmíru vyvrácen. Kdyby spočtené vlastnosti souhlasily s těmi změřenými, získali bychom impozantní potvrzení a rehabilitaci spekulací o antropickém multivesmíru – a důvod podstatného rozšíření našeho obrazu reality.

Ve snáze představitelném případě, že vesmír podporující život není jediný, řada teoretiků (včetně Stevena Weinberga, Andreje Lindeho, Alexandra Vilenkina, George Efstathioua a dalších) obhajovala rozšířený statistický přístup. Spíše než počítat relativní zastoupení různých typů vesmírů v celém multivesmíru bychom měli podle nich počítat počet obyvatel – ve fyzikální mluvě obvykle nazývaných pozorovatelé –, kteří se mohou v různých typech vesmírů nacházet. V některých vesmírech, kde budou podmínky jen taktak slučitelné se životem, bude pozorovatelů jako šafránu, přesněji řečeno jako kaktusů v nevlídné poušti; jiné vesmíry, ty s podmínkami příznivějšími, budou pozorovateli překypovat. Podstatné je, že právě jako data ze sčítání lidu a psů nám umožňují předpovědět typ psa, jehož potkáme, tak statistická data o pozorovatelích nám umožňují dozvědět se něco o tom, co typický obyvatel multivesmíru – a to podle této představy můžete být vy i já – kolem sebe uvidí.

Konkrétní příklad rozebral v roce 1997 Weinberg a jeho spolupracovníci Hugo Martel a Paul Shapiro. U multivesmíru, v němž se kosmologická konstanta liší od vesmíru k vesmíru, spočítali, jak rozšířený bude život v každém z nich. Tento obtížný úkol si zjednodušili za pomoci Weinbergova postupu (6. kapitola): místo aby hloubali o opravdovém životě, vzali v úvahu formování galaxií. Více galaxií znamená více planetárních systémů, a proto, jak hlavní předpoklad zaručuje, i vyšší pravděpodobnost života a toho inteligentního obzvláště. Jak Weinberg zjistil v roce 1987, dokonce i malá kosmologická konstanta vyvolá natolik silnou odpudivou sílu, že může formování galaxií násilně ukončit, a proto stačí uvažovat o těch oblastech multivesmíru, které mají kosmologickou konstantu dostatečně nízkou. Kosmologická konstanta se záporným znaménkem vyvolá kolaps vesmíru ještě předtím, než se vytvoří galaxie, a proto i tyto oblasti multivesmíru lze při analýze vynechat. Antropické uvažování tudíž koncentruje naši pozornost jen na tu oblast multivesmíru, v níž kosmologická konstanta náleží do úzkého intervalu hodnot; jak jsme zmiňovali v 6. kapitole, výpočty ukazují, že k tomu, aby v daném vesmíru vznikaly galaxie, musí být jeho kosmologická konstanta menší než asi 200násobek kritické hustoty (hmotnost ekvivalentní asi 10^{-24} kilogramu na krychlový metr čili 10^{-121} v Planckových jednotkách).⁷

Pro vesmíry s kosmologickou konstantou náležející do tohoto intervalu provedli Weinberg, Martel a Shapiro podrobnější výpočet. Určili v každém vesmíru procento hmoty, která by se v průběhu kosmologické evoluce nahustila v chomáčích, což je klíčová fáze na cestě ke zrodu galaxie. Zjistili, že je-li kosmologická konstanta příliš blízko horní hranici intervalu, vznikne takových

chomáčů poměrně málo, protože intenzivní odpudivý tlak kosmologické konstanty zafunguje jako silný vítr a většinu shromažďujícího se prachu rozfouká. Je-li kosmologická konstanta blízko dolní hranice, tedy nule, vytvoří se zhustků poměrně hodně, protože rušivý vliv kosmologické konstanty je minimalizován. Znamená to větší naději, že se pozorovatel ocitne ve vesmíru, jehož kosmologická konstanta je blízko nule, protože takové vesmíry nabízejí hojnost galaxií a – jsou-li tyto úvahy správné – i života. Existuje jen malá naděje, že se ocitnete ve vesmíru, jehož kosmologická konstanta není daleko od horního konce intervalu, těch 10^{-121} , protože v takových vesmírech se rodí daleko menší počet galaxií. A potom existuje nějaká pravděpodobnost, která není ani vysoká, ani nízká, že se ocitnete někde na hodnotě mezi oběma extrémy.

S pomocí rovnic přesně vyjadřujících tyto úvahy mohl Weinberg se svými spolupracovníky vyčíslit kosmickou analogii toho, že na průměrně vycházce po okolí potkáme 29kilového labradorského retrívra – tedy kosmologickou konstantu, která obklopuje průměrného pozorovatele v multivesmíru. Jejich odpověď? O něco vyšší, než co se zanedlouho naměřilo při pozorování supernov, ale určitě ne o moc. Zjistili, že asi jeden z deseti až dvaceti obyvatel multivesmíru by podobně jako my slýchal o kosmologické konstantě ve svém vesmíru, která se přibližně rovná 10^{-123} .

Ačkoli vyšší procento by nás uspokojovalo více, je i tento výsledek působivý. Před tímto výpočtem čelila fyzika problému rozporu mezi teorií a pozorováními, který představoval více než 120 řádů a naznačoval, že je něco s naším chápáním setsakramentsky v nepořádku. Multivesmírný přístup Weinberga a jeho spolupracovníků ovšem ukázal, že když se ocitnete ve vesmíru s kosmologickou konstantou srovnatelnou s tou, již jsme měřili, není to o nic překvapivější než to, že potkáte ši-cu ve čtvrti s převahou retrívrů. Jinak řečeno, vůbec to nepřekvapuje. Z pohledu multivesmíru tedy pozorovaná hodnota kosmologické konstanty nenaznačuje radikální nedostatek v chápání fyziky a to je povzbudivý krok vpřed.

Pozdější rozbory ovšem zdůraznily zajímavý aspekt, jež mnozí interpretují jako oslabení výsledku. Kvůli zjednodušení si Weinberg a jeho spolupracovníci představovali, že od vesmíru k vesmíru se měnila pouze kosmologická konstanta; další fyzikální parametry, jak předpokládali, zůstávaly neměnné. Max Tegmark a Martin Rees si povšimli, že kdyby se kromě kosmologické konstanty měnila řekněme i intenzita kvantových oscilací v raném vesmíru, byl by závěr zcela jiný. Vzpomeňte si, že kvantové chvění vytváří zárodečná semínka budoucích galaxií: drobné kvantové fluktuace, které jsou nataženy inflačním rozpínáním, dávají vzniknout náhodné množině oblastí, v nichž je hustota hmoty o něco nižší nebo trochu vyšší než průměr. Oblasti s vyšší hustotou působí trochu silnější přitažlivostí na hmotu v okolí, a proto tloustnou ještě více, až se nakonec shluknou do galaxií. Tegmark a Rees vypíchlí,

že větší prvotní semínka mohou snáze odolat rušivému tlaku způsobenému kosmologickou konstantou a působícímu směrem ven – z podobného důvodu, proč větší hromada listů spíše odolá poryvům větru. Multivesmír, v němž se mění jak velikost semínek, tak hodnota kosmologické konstanty, proto obsahuje vesmíry, kde nevýhodu vyšší kosmologické konstanty vynahrazuje výhoda větší velikosti semínek; taková kombinace by byla slučitelná se vznikem galaxií – a tedy i se životem. Multivesmír tohoto typu zvyšuje hodnotu kosmologické konstanty, kterou naměří průměrný pozorovatel, a tak vede k poklesu – možná i strmému – procenta pozorovatelů, kteří zjistí podobně nízkou kosmologickou konstantu, jakou jsme naměřili v našem vesmíru.

Skalní zastánci multivesmíru rádi označují analýzu Weinberga a jeho spolupracovníků za úspěch antropického uvažování. Očerňovatelé zase raději zdůrazňují, že antropický výsledek není kvůli Tegmarkově a Reesově problému příliš přesvědčivý. Ve skutečnosti ještě nedozrál čas k takovým diskusím. Všechny tyto výpočty jsou jen prvními pokusnými odhady, s jejichž pomocí fyzici pouze prozkoumávají terén. Spíše se z nich učíme, jak antropické uvažování může vypadat. Za jistých omezujících předpokladů ukazují, že antropické metody nás mohou přivést na dohled k měřené kosmologické konstantě; jestliže tyto předpoklady poněkud oslabíme, odchylka mezi výpočty a pozorováními podstatně vzroste. Taková provázanost bude mít za následek to, že se důmyslnější multivesmírné výpočty neobejdou bez přesné znalosti detailních vlastností členských vesmírů a charakteru změny těchto vlastností, a budou proto muset ledabylé předpoklady nahradit nezpochybnitelnými teoretickými pravidly. Má-li multivesmír dostat šanci, aby z něho vyplynuly definitivní závěry, půjde o proměnu podstatnou.

Badatelé usilovně pracují na tom, aby tohoto cíle dosáhli, ale k dnešnímu dni se tak ještě nestalo.⁸

Předpovědi v multivesmíru IV

Co k nim bude potřeba?

Jaké překážky tedy bude třeba zdolat, než z daného multivesmíru odvodíme předpovědi? Ty nejdůležitější jsou tři.

Zprv, jak jsme právě viděli, teorie multivesmíru musí mít schopnost určit, které fyzikální vlastnosti se mění od vesmíru k vesmíru, a pro ty měnící je nutné umět vypočítat jejich statistické rozdělení v celém multivesmíru. A takový výpočet se neobejde bez pochopení kosmologického mechanismu, jenž v daném multivesmíru dává povstat novým vesmírům (například procesu vzniku vesmírných bublin v krajinném multivesmíru). To tento mechanismus určuje, jak rozšířený je jeden vesmír ve srovnání s vesmírem dalším, to z tohoto mechanismu plyne statistické rozdělení fyzikálních vlastností. Při troše štěstí bude výsledné rozdělení, ať už v celém multivesmíru nebo jen v těch jeho ves-

mírech, které podporují život, dostatečně úzké, aby z něho vyplývaly definitivní předpovědi.

Druhá překážka, pokud se chceme držet antropického principu, tkví ve stěžejním předpokladu, že my lidé jsme tuctový a průměrný druh. Život může být v multivesmíru jevem vzácným a inteligentní život jevem ještě vzácnějším. Ale mezi inteligentními bytostmi jsme podle antropického učení natolik typičtí, že naše pozorování by měla být průměrem toho, co inteligentní bytosti obývající multivesmír mohou spatřit. (Alexandr Vilenkin to nazývá *principem tuctovosti* nebo *mediokrity*). Kdybychom znali rozdělení fyzikálních vlastností napříč vesmíry slučitelnými se životem, mohli bychom takové průměry spočítat. Typičnost je však choulostivý předpoklad. Pokud budoucí práce potvrdí, že naše pozorování souhlasí s vypočtenými průměry v konkrétním multivesmíru, naše důvěra v naši typičnost – a tedy i v danou teorii multivesmíru – naroste. To by bylo vzrušující. Když se naopak naše pozorování od průměru odchýlí výrazně, budeme vědět, že buď je teorie multivesmíru chybná, nebo nejsme typickými pozorovateli. Dokonce i ve čtvrti, kde labradoři tvoří 99 % psů, můžete narazit na dobrmana, tedy psa netypického. Rozlišit, zda je teorie multivesmíru chybná, anebo správná a chybný je jen předpoklad o naší průměrnosti, může být tvrdý oříšek.⁹

Pokrok v této věci bude nejspíše záviset na lepším porozumění procesům, díky nimž v daném vesmíru povstává inteligentní život; tehdy bychom alespoň mohli upřesnit, jak typická byla naše vlastní dosavadní evoluční historie. To je samozřejmě náročný úkol. Dosud se většina výzkumu v antropickém kontextu tomuto problému zcela vyhnula s pomocí Weinbergova předpokladu, že počet inteligentních bytostí v daném vesmíru je přímo úměrný počtu galaxií, které vesmír obsahuje. Zdá se, že inteligentní život potřebuje teplou planetu, a to znamená hvězdu. Většina hvězd se nachází v určité galaxii, a proto máme důvod věřit, že na Weinbergově přístupu něco je. Ale protože naše znalosti i o zrodu našeho vlastního druhu jsou stále v plenkách, zůstává i nadále tento předpoklad předpokladem provizorním. K vylepšení výpočtů bude třeba zásadně prohloubit znalosti o tom, jak vznikl a vyvíjel se inteligentní život.

Třetí překážku lze snadno vysvětlit, ale může jít o překážku, kterou se nejdéle ze všech nepodaří zdolat. Má co do činění s dělením nekonečen.

Dělení nekonečen

Abychom tento problém pochopili, vraťme se ke psům. Žijete-li ve čtvrti, v níž jsou tři labradoři a jeden jezevčík, potom – pomíneme-li komplikace například ohledně frekvence psích procházek – s třikrát větší pravděpodobností narazíte na labradora. Totéž by platilo, kdyby v okolí žilo 300 labradorů a 100 jezevčíků nebo 3 000 labradorů a 1 000 jezevčíků či 3 miliony labradorů

a 1 milion jezevčků a tak dále. Ale co když půjde o *nekonečně* velký počet psů? Jak srovnat jedno nekonečno jezevčků s třemi nekonečny labradorů? Třebaže se tyto otázky mohou podobat naivním hlavolamům druháčka, který chce být krok před spolužáky, tajemství se v nich opravdu skrývá. Je třikrát nekonečno větší než nekonečno obyčejné? A pokud ano, je třikrát větší?

Srovnávání nekonečných čísel je jak známo ošidné. U psů na Zemi tato potíž nevzniká, protože jejich populace jsou konečné. Zato ve vesmírech, jež jsou součástí konkrétních multivesmírů, může jít o velmi důležitou komplikaci. Vezměte si inflační multivesmír. Podíváte-li se na celou kostku kosmického ementálu z pohledu nějakého imaginárního vnějšího pozorovatele, uvidíte, jak roste a donekonečna produkuje nové vesmíry. Proto také ten přívlastek „věčná“ ve výrazu „věčná inflace“. A navíc z pohledu pozorovatele uvnitř skrývá každá vesmírná bublina nekonečný počet různých oblastí poskládaných do sešivaného multivesmíru. Chceme-li něco předpovídat, nutně se musíme utkat s nekonečným počtem vesmírů.

Kde se skrývá ten matematický problém? Představte si, že jste se přihlásili do americké soutěže *Udělejme obchod (Let's Make a Deal)* a právě jste v ní vyhráli neobvyklou cenu: nekonečnou množinu obálek, z nichž první obsahuje 1 dolar, druhá 2 dolary, třetí 3 dolary a tak dále. Za vzrušeného pokřiku obecenstva vám dá moderátor Monty Hall na vybranou. Buď si cenu necháte, nebo svolíte, aby moderátor zdvojnásobil obsah každé obálky. Nejdříve vám proletí hlavou, že byste takovou nabídku měli přijmout. „Každá obálka bude obsahovat více peněz než dříve,“ uvažujete, „takže to musí být správný tah.“ Kdyby byl obálek jen konečný počet, tak by to opravdu *byl* správný tah. Nahradit obálky obsahující 1, 2, 3, 4 a 5 dolarů obálkami s 2, 4, 6, 8 a 10 dolary nepopíratelně dává smysl. Ale když si všechno znovu promyslíte, začnete váhat, protože případ nekonečně mnoha obálek zas tak jednoznačný není. „Když nabídku přijmu,“ uvažujete, „zůstanou mně obálky obsahující 2, 4, 6 dolarů a tak dále, tedy všechna možná sudá čísla. Ale když se spokojím s tím, co mám, obálky pokryjí *všechna* přirozená čísla, jak sudá, tak lichá. Takže když na nabídku kývnu, *odstráním* ze svého portfolia obálky s lichým počtem dolarů. A to jako chytré investiční rozhodnutí nevypadá.“ Zatočí se vám hlava. Srovnáte-li obálky po jedné, nabídku považujete za přitažlivou. Podíváte-li se na celé množiny obálek, nabídka se vám už tak láková nezdá.

Vaše dilema ilustruje třetí druh matematické léčky, která komplikuje snahu srovnat nekonečné množiny. Publiku dochází trpělivost, a vy se tedy už musíte rozhodnout, ale vaše zhodnocení nabídky závisí na způsobu, jak obě možné výhry srovnáte.

Podobná nejednoznačnost znepříjemňuje i srovnání ještě základnější vlastnosti nekonečných množin: počet jejich prvků. Příklad s televizní soutěží ilustruje i tento problém. Kterých čísel je víc, celých, nebo sudých? Většina lidí by řekla, že celých čísel je více, protože pouze polovina z nich jsou čísla sudá. Ale

vaše setkání s Montyem vás naučilo uvažovat jinak, chytřeji. Představte si, že Montyho nabídku přijmete a získáte tak obálky se všemi sudými dolarovými sumami. K tomu jste nemuseli žádné obálky vrátit ani vám žádné nepřibyly, protože Monty jednoduše peněžní obsah každé obálky zdvojnásobil. Můžete tedy usoudit, že počet obálek potřebných k pokrytí všech celých čísel je stejný jako počet obálek potřebných k pokrytí všech sudých čísel – což naznačuje, že počty prvků v obou množinách jsou stejné (následující tabulka). A to je divné. Jednou metodou srovnání – spočtením obálek, které potřebujete k tomu, aby všechna čísla v každé množině čísel byla zastoupena – jste vedeni k závěru, že množina celých čísel a množina sudých čísel mají stejnou velikost.

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

Každé celé číslo je spárováno s nějakým sudým číslem a naopak; to naznačuje, že velikosti obou množin jsou shodné.

Můžete dokonce najít způsob, jak se přesvědčit, že sudých čísel je *více* než čísel celých. Představte si, že vám Monty nabídl zečtyřnásobit v každé obálce sumu, o níž šlo na začátku, takže by v první byly 4 dolary, v druhé 8 dolarů, v třetí 12 dolarů a tak dále. Protože počet obálek v nabídce se ani teď nemění, naznačuje to, že počet celých čísel, které jste měli před očima na začátku, odpovídá počtu čísel dělitelných čtyřmi (dolní tabulka), která byste měli v případě přijetí nabídky. Ale párování přiřazující jakékoli celé číslo k nějakému násobku 4 naopak ponechává nekonečnou množinu sudých čísel – čísla 2, 6, 10 a tak dále – ladem a z toho zdánlivě vyplývá, že sudých čísel je více než násobků 4, a tedy i více než celých čísel.

celá čísla	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	
dvakrát sudá čísla	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	...

Každé celé číslo je spárováno s každým druhým sudým číslem, a proto zbude nekonečně mnoho sudých čísel na ocet. To naznačuje, že sudých čísel je více než celých.

Z jednoho pohledu je množina sudých čísel méně početná než množina čísel celých. Z jiného pohledu jsou tyto množiny stejně velké. Z ještě dalšího pohledu jsou početnější čísla sudá než čísla celá. A není to tak, že by jeden závěr byl správný a druhý chybný. Jednoduše na otázku, která z těchto nekonečných množin je větší, neexistuje žádná absolutní odpověď. Nalezený výsledek závisí na způsobu porovnávání.¹⁰

Z této mnohoznačnosti pramení záhada pro teorie multivesmíru. Jak můžeme určit, zda jsou galaxie a život rozšířenější v jednom, nebo druhém typu vesmíru, je-li počet zúčastněných vesmírů nekonečný? Tatáž mnohoznačnost, s níž jsme se seznámili, zkomplikuje naše úvahy stejně dramaticky, *pokud fyzika nevybere přesnou metodologii, s níž se mají množiny srovnávat*. Teoretici předložili různé návrhy a různé analogie párování z těchto tabulek, které lze podložit tím či oním fyzikálním uvažováním, ale definitivní procedura ještě odvozena a odsouhlasena nebyla. A právě jako v případě nekonečných množin celých čísel vyústí různé postupy v různé výsledky. Podle jednoho způsobu srovnávání převládají vesmíry jednoho typu, podle alternativního způsobu převažují vesmíry s jinými vlastnostmi.

Tato nejednoznačnost přímo zásadně ovlivňuje naše závěry o typických nebo průměrných vlastnostech v daném multivesmíru. Fyzici tomu podle matematického termínu, jehož význam kopíruje význam slova „míra“ v běžném jazyce, říkají *problém míry*. Potřebujeme prostředky, jak měřit velikosti nekonečných skupin vesmírů. To je nezbytná informace k vytváření předpovědí. Je nutná k tomu, abychom mohli zjistit, o kolik je pravděpodobnější, že se vyskytneme v jednom typu vesmíru než v jiném. Dokud to základní pravidlo, podle něhož bychom měli porovnávat nekonečné množiny vesmírů, nenajdeme, nebudeme schopni matematicky předpovídat, co by typičtí obyvatelé multivesmíru – my – měli vidět ve svých experimentech a pozorováních. Vyřešení problému míry je naléhavý úkol.

Další kritika ze strany odpůrců antropického principu

Problému míry jsem věnoval celou podkapitolu nejen proto, že je to obrovská překážka na cestě k předpovědím, ale i proto, že s sebou nese další znepokojivý důsledek. Ve 3. kapitole jsem vysvětlil, proč se inflační teorie stala de facto oficiálním kosmologickým paradigmatem. Krátké, výbušné a rychlé rozpínání v prvních okamžicích života vesmíru by umožnilo dnes už vzdáleným oblastem prostoru, aby na samém počátku spolu komunikovaly. To by vysvětlilo jejich jednotnou teplotu, již zjistila měření; rychlé rozpínání „vyžehlí“ i jakékoli nerovnosti a zakřivení prostoru a poskytne tak plochý prostor, jaký souhlasí s pozorováními; a nakonec takové rozpínání převede kvantové oscilace na drobné variace teplot napříč oblohou, na takové variace, které jsou měřitelné v reliktním záření a zároveň jsou podstatné pro vznik galaxií. Tyto úspěchy staví inflaci na pevnou zem.¹¹ Jenže věčná odrůda inflace může takový závěr podkopat.

Kdykoli jsou podstatné kvantové jevy, pak to nejlepší, co můžete předpovědět, je pravděpodobnost jednoho, nebo druhého výsledku. Experimentální fyzici si toto ponaučení berou k srdci, a proto své pokusy opakují znovu a znovu; hromadí tak haldu údajů a pak je statisticky analyzují. Jestliže kvan-

tová mechanika předpovídá, že je jeden výsledek desetkrát pravděpodobnější než jiný, potom by údaje měly tento poměr se značnou přesností odrážet. Výpočty reliktního záření, jejichž souhlas s pozorováními je nejpřesvědčivějším argumentem platnosti inflační teorie, se spoléhají na oscilace kvantových polí, a proto jsou pravděpodobnostního rázu. Na rozdíl od laboratorních experimentů je však nelze překontrolovat tak, že bychom velký třesk spustili mnohokrát za sebou. Jak je tedy interpretovat?

Když tedy z teoretických úvah vyjde, že je řekněme 99% pravděpodobnost, že mikrovlnné údaje by měly vypadat tak, a ne jinak, a my pozorovatelé vidíme ten pravděpodobnější z obou výsledků, potom můžeme tyto údaje považovat za silný argument podporující teorii. To proto, že vznikla-li množina vesmírů podle stejných fyzikálních zákonů, teorie předpovídá, že asi 99 % z nich by mělo vypadat jako vesmír, který pozorujeme, a pouze 1 % by se mělo svou podstatou od nich odlišovat.

Kdyby inflační multivesmír obsahoval jen konečný počet vesmírů, mohli bychom přímočaře tvrdit, že počet výstředních vesmírů, v nichž kvantové procesy vyústí v údaje protiřecící většinovým očekáváním, zůstane poměrně velmi nízký. Ovšem ve skutečném inflačním multivesmíru je počet vesmírů nekonečný, a proto je mnohem složitější tato čísla interpretovat. Kolik je 99 % z nekonečna? Nekonečno. A kolik je 1 % z nekonečna? Zase nekonečno. Které z těchto nekonečen je větší? Odpověď závisí na tom, jak obě nekonečné množiny porovnáváme. A jak jsme viděli, dokonce i v případech, kdy jedna nekonečná množina vypadala očividně větší než jiná, jsme mohli jinými metodami dospět k závěrům odlišným.

Odpůrce antropického principu tedy dojde k závěru, že pokud je inflace věčná, *i samotné předpovědi, díky nimž jsme získali v teorii důvěru, jsou uvedeny v nejistotu.* Každý možný výsledek povolený kvantovými výpočty, ať už jakkoli nepravděpodobný – s kvantovou pravděpodobností rovnou 0,1 % nebo 0,0001 % či 0,0000000001 % –, by byl realizován v nekonečně mnoha vesmírech. Prostě proto, že součin kteréhokoli z těchto čísel a nekonečna se zase rovná nekonečnu. Bez spolehlivého pravidla, jak porovnávat nekonečné množiny, nemůžeme ani náhodou rozhodnout, zda je jedna množina vesmírů větší než ty ostatní, a tedy je i tou třídou vesmírů, které budeme nejspíše pozorovat, a proto ztrácíme schopnost vytvářet jakékoli předpovědi.

Optimista zase dojde k závěru, že velkolepý souhlas mezi kvantovými výpočty v inflační kosmologii a údaji (například těmi uvedenými na obrázku na straně 62) musí odrážet hlubokou pravdu o světě. Při konečném počtu vesmírů a pozorovatelů je touto hlubokou pravdou to, že vesmíry, v nichž se údaje odchylují od kvantových předpovědí – vesmíry s kvantovou pravděpodobností 0,1 % nebo 0,0001 % či 0,0000000001 % –, jsou skutečně vzácností. Proto takoví tuctoví obyvatelé multivesmíru jako my nezjistí, že se v jednom z těchto vesmírů narodili. Při nekonečném počtu vesmírů musí být pro

optimistů hluboká pravda to, že anomální vesmíry lze – z nějakých dosud neznámých důvodů – stále považovat za vzácné. Lze očekávat, že jednoho dne odvodíme míru, tedy jednoznačný způsob, jak různé nekonečné množiny vesmírů porovnávat, a že vesmíry zrozené z mimořádných kvantových odchylek od normálu budou mít ve srovnání s těmi, jejichž zrod byl důsledkem pravděpodobnějších kvantových výsledků, malinkatou míru. Nalézt takovou míru zůstává nesmírnou výzvou, ale většina badatelů v oboru je přesvědčena, že souhlas teorie s pozorováním ve zmíněném obrázku znamená, že jednoho dne uspějeme.¹²

Záhady a multivesmíry

*Lze úvahami o multivesmíru vysvětlit něco,
co by jinak zůstalo nevysvětleno?*

Nepochybně jste si všimli, že i neoptimističtější očekávání naznačují, že předpovědi postavené na teorii s multivesmírem se budou lišit od těch, jež tradičně od fyziky očekáváme. Stáčení Merkurova perihelia, magnetický dipólový moment elektronu, energie uvolněná rozštěpením jádra uranu na baryum a krypton: *tohle* jsou předpovědi. Vycházejí z podrobných matematických výpočtů založených na solidní fyzikální teorii a poskytují nám přesná, ověřitelná čísla. A tato čísla byla experimentálně potvrzena. Například z výpočtů plyne, že magnetický moment elektronu je 2,0023193043628; podle měření je to 2,0023193043622. Až na nepatrnou toleranci obou výsledků tedy experiment potvrzuje teorii s přesností lepší než 1 ku miliardě.

Vzhledem ke všem uvedeným postřehům se zdá jasné, že předpovědi multivesmíru nikdy takové přesnosti nedosáhnou. I u těch nejrafinovanějších scénářů bychom mohli být schopni předpovědět jen to, že je „velmi pravděpodobné“, že kosmologická konstanta nebo intenzita elektromagnetické síly nebo hmotnost kvarku up leží v určitém intervalu hodnot. Abychom získali přesnější výsledek, museli bychom mít mimořádné štěstí. Kromě toho, že bychom museli vyřešit problém míry, bychom museli najít i přesvědčivou teorii multivesmíru, z níž by vyplývala neobyčejně koncentrovaná statistická rozdělení (například 99,9999% pravděpodobnost, že se pozorovatel ocitne ve vesmíru s kosmologickou konstantou, jejíž hodnotu jsme změřili) nebo úžasné dokonalé korelace (například to, že elektrony existují pouze ve vesmírech, jejichž kosmologická konstanta je 10^{-123}). Jestliže teorie multivesmíru takové vhodné vlastnosti nemá, nebude se ani vyznačovat takovou přesností, jaká po dlouhá léta odlišovala fyziku od jiných disciplín. Podle některých badatelů je to cena nepřijatelná.

Dost dlouhou dobu jsem zastával stejný názor jako oni, ale můj pohled se postupně měnil. Stejně jako každý jiný fyzik i já dávám přednost přesným a jednoznačným předpovědím. Ale spolu s řadou dalších vědců jsem si po-

stupně uvědomil, že ačkoli některé fundamentální vlastnosti vesmíru takové přesné matematické předpovědi připouštějí, pro jiné to neplatí – nebo je alespoň logicky možné, že *mohou* existovat vlastnosti, které přesně předpovědět nelze. Od poloviny osmdesátých let, kdy jsem se coby mladý postgraduální student zabýval teorií strun, se rozšířilo očekávání, že tato teorie jednoho dne vysvětlí velikost hmotnosti částic, síly interakcí, počet prostorových rozměrů a víceméně i všechny ostatní základní fyzikální vlastnosti vesmíru. Naději, že to je cíl, kterého jednoho dne dosáhneme, chovám i nadále. Připouštím však i to, že od rovnic teorie toho chceme příliš – aby vyhrly čísla jako hmotnost elektronu (0,00000000000000000000000091095 v jednotkách Planckovy hmotnosti) nebo hmotnost kvarku top (0,000000000000000000632 v jednotkách Planckovy hmotnosti). A pokud jde o kosmologickou konstantu, je to úkol takřka herkulovský. Sníme o výpočtu, který zabere mnoho stránek plných matematiky a donutí počítač, aby spotřeboval kilowatthodiny energie, a který nakonec oznámí číslo, jímž začal první odstavec 6. kapitoly. Takový výpočet není zcela nemožný, ale jeho domnělá existence je zatěžkávací zkouškou i pro optimismus optimisty. Jistě je pravda, že strunová teorie dnes není o moc blíže k přesnému určení kteréhokoli z těchto čísel, než byla, když jsem se jí začal zabývat. To však neznamená, že tato nebo nějaká jiná teorie jednoho dne v budoucnosti nemůže slavit úspěch. Vzhledem k dnešním fyzikálním znalostem je logické, že lidé hledají i nové přístupy. Multivesmír takový přístup nabízí.

Je-li určitá teorie multivesmíru rozpracována do detailu, pak jsou v ní jednoznačně uvedeny fyzikální vlastnosti, ke kterým se musí přistoupit jinak, než je ve fyzice obvyklé: vlastnosti měnící se od vesmíru k vesmíru. A v tom je síla tohoto přístupu. U teorie multivesmíru se můžete zcela spolehnout na to, že jasně rozliší záhady jednotlivých vesmírů, které záhadné i v multivesmírném kontextu zůstanou, od těch, které budou odhaleny.

Tím nejdůležitějším příkladem je kosmologická konstanta. Mění-li se její velikost v daném multivesmíru a jsou-li rozdíly mezi jejími sousedními hodnotami dostatečně jemné, potom kdysi záhadné číslo – její velikost – začne být pochopitelné. Právě jako dobře zásobované obuvnictví má jistě boty vaší velikosti, tak i rozsáhlý multivesmír určitě obsahuje vesmíry, jejichž kosmologická konstanta se shoduje s tou námi naměřenou. Celé generace vědců usilovně bádaly, aby toto číslo vysvětlily, a přesto teorie multivesmíru ukazuje, že vlastně nebylo co vysvětlovat. Podle multivesmírného popisu reality spočívala zdánlivá hloubka a nepochopitelnost tohoto čísla v chybném předpokladu, že kosmologická konstanta může mít jedinou velikost. V tomto smyslu může teorie multivesmíru nabídnout značnou schopnost odtajnit záhady, a tím zásadně ovlivnit směřování vědeckého výzkumu.

K podobným úvahám je nutné přistupovat opatrně. Co kdyby býval Newton poté, co na něho spadlo jablko, prohlásil, že obýváme multivesmír, v němž někde padají jablka dolů a jinde nahoru, a proto nám padající jablko jen říká,

v jakém druhu vesmíru žijeme, a není tedy nutný další výzkum? Nebo co kdyby býval usoudil, že v každém vesmíru padají některá jablka dolů a jiná nahoru a že jediným důvodem, proč pozorujeme jen dolů padající odrůdu jablek, je, že nahoru padající jablka už dávno odlétla do dalekých končin vesmíru? Jde samozřejmě o pošetilý příklad – nikdy pro takové uvažování neexistoval důvod, ani teoretický, ani jiný –, ale obsahuje vážnou pointu. Tím, že věda odkazuje na multivesmír, může oslabit chuť fyziků vysvětlovat konkrétní záhady, i když některé z těchto záhad mohou mít standardní, nemultivesmírné vysvětlení. Možná k jejich rozlousknutí stačí jen větší píle a hlubší myšlenky, a proto bychom patrně měli pokračovat v práci s pomocí obvyklých metod a odolat multivesmírnému pokušení.

Tohle potenciální nebezpečí vysvětluje, proč se někteří vědci multivesmíru děsí. A proto musí být teorie multivesmíru, kterou mají fyzici přijmout s vážností, pevně ukotvena v teoretických výsledcích a musí přesně popsat vesmíry, z nichž je multivesmír složen. Musíme postupovat opatrně a systematicky. Odvrátit se od multivesmíru jen proto, že by nás *mohl* zavést do slepé uličky, je však stejně nebezpečné. Kdybychom tak učinili, možná bychom si zakryli oči před realitou.

Kapitola osmá

Mnoho světů kvantového měření

Kvantový multivesmír

Nejrozumnějším zhodnocením teorií paralelního vesmíru, s nimiž jsme se zatím setkali, je výrok, že rozhodnutí zatím nepadlo. Nekonečný objem prostoru, věčná inflace, bránové světy, cyklická kosmologie, krajina ve strunové teorii, všechny tyto poutavé myšlenky se vynořily z široké palety vědeckých poznatků. Jde však ve všech případech o myšlenky stejně provizorní jako multivesmíry těmito myšlenkami zplozené. Třebaže se mnozí fyzici rádi pochlubí svými, ať už souhlasnými či nesouhlasnými, názory na tato multivesmírná schémata, většina připouští, že teprve budoucí poznatky – teoretické i ty vycházející z experimentů a pozorování – určí, zda se některý z multivesmírů někdy stane součástí vědeckých učebnic.

Na multivesmír, který hned představím, se fyzici dívají velmi odlišně. Mnozí už o něm vyřkli svůj konečný verdikt. Jediným problémem je, že nedošli k verdiktu stejnému. Rozdíly v názorech se odvíjejí od hluboké a zatím nevyřešené otázky, jak skloubit pravděpodobnostní kostru kvantové mechaniky s jednoznačnou realitou, kterou běžně prožíváme.

Kvantová realita

V roce 1954, téměř třicet let poté, co byly takovými veleduchy, jako byl Niels Bohr, Werner Heisenberg a Erwin Schrödinger, vybudovány základy kvantové teorie, si Hugh Everett III., neznámý postgraduální student z Princetonské univerzity, uvědomil cosi zarážejícího. Rozebral jednu nejasnost, okolo níž už dříve tancoval velmistr kvantové mechaniky Niels Bohr, ale kterou nikdy neobjasnil, a odhalil, že správná interpretace teorie možná vyžaduje ohromnou síť paralelních vesmírů. Everettovy poznatky byly jedněmi z prvních matematicky motivovaných myšlenek, podle nichž bychom mohli být součástí multivesmíru.

Everettův přístup, jemuž se časem začalo říkat interpretace kvantové mechaniky v řeči mnoha světů, měl pestrou historii. V lednu 1956, poté co vypracoval matematické důsledky své nové domněnky, zaslal Everett kopii své práce Johnu Wheelerovi, vedoucímu své dizertační práce. Wheelera, jednoho

z nejproslulejších myslitelů 20. století, jeho práce doslova ohromila. Ale když v květnu toho roku navštívil v Kodani Bohra a s Everettovými nápady ho seznámil, dostalo se jim od Bohra ledového přijetí. Strávil přece se svými stoupcemí desítky let vylepšováním vlastního pohledu na kvantovou mechaniku. Podle něj měly otázky Everettem nastolené i exotické způsoby, jimiž je hodlal zodpovědět, jen nepatrnou hodnotu.

Wheeler měl ke svému staršímu kolegovi velký respekt, a proto se mu snažil vyjít vstříc. Na Bohrovu kritiku zareagoval tak, že odložil termín, v němž měl Everett získat doktorát, a svého studenta přesvědčil, aby práci zásadně pozměnil. Měl vymazat části kritické vůči Bohrově metodologii a zdůraznit, že svými výsledky chtěl upřesnit a rozšířit konvenční formulace kvantové teorie. Everett Wheelerově tlaku odolával, ale protože už přijal místo na americkém ministerstvu obrany (kde zanedlouho, v období Eisenhowerovy a Kennedyho administrativy, v pozadí tahal za nitky politiky jaderných zbraní), které doktorát vyžadovalo, neochotně se podvolil. V březnu 1957 odevzdal podstatně oslabenou verzi své původní práce, ta byla v dubnu Princetonem přijata, čímž Everett splnil poslední podmínku pro získání doktorátu, a v červenci vyšla v *Reviews of Modern Physics*.¹ Ale jelikož jeho přístup ke kvantové teorii byl už dříve odmítnut Bohrem a jeho školou a jelikož jeho velkolepá vize, formulovaná v původní práci, byla oslabena, jeho článek žádnou odezvu nevyvolal.²

O deset let později vytáhl Everettovu práci z temnoty renomovaný fyzik Bryce DeWitt. A ten, inspirovaný výsledky svého postgraduálního studenta Neilla Grahama, který Everettovu matematiku dále rozpracoval, se stal hlasitým obhájcem everettovské přestavby kvantové teorie. Kromě toho, že publikoval řadu odborných článků, které seznámily malou, ale vlivnou společnost specialistů s Everettovými poznatky, sepsal DeWitt v roce 1970 pro *Physics Today* i shrnutí tohoto přístupu na obecné úrovni, které proniklo k mnohem širší vědecké obci. A na rozdíl od Everettova článku z roku 1957, v němž se autor výrokům o jiných světech vyhnul, DeWitt tento rys podtrhl a zvýraznil ho i neobvykle upřímnou výpovědí o svém „šoku“ ve chvíli, kdy se dočetl o Everettově závěru, že jsme všichni součástí ohromného „multisvěta“. DeWittův článek vyvolal značný ohlas fyziků – začali být vnímavější a tolerantnější k pokusům podívat se na ortodoxní kvantovou ideologii nově – a podnítil dodnes nekončící debatu o povaze reality ve světě, jemuž vládnu kvantové zákony.

Měl bych zde připomenout několik skutečností.

Revoluce v našem nazírání na svět, která se odehrála přibližně mezi lety 1900 a 1930, vyústila v bezprecedentní útok na naši intuici, zdravý rozum a obecně přijaté zákony, které avantgarda brzy překřtila na „klasickou fyziku“ – pojem, který v sobě nese váhu a respekt, jež chováme k portrétu reality zároveň prastarému, přímo použitelnému, uspokojujícímu i prediktivnímu. Řekněte mi, v jakém stavu jsou věci teď, a já na základě zákonů klasické fyziky můžu předpovědět, v jakém stavu budou v libovolném okamžiku v bu-

doucnosti nebo v jakém stavu byly v libovolné chvíli v minulosti. Komplikace jako chaos (v technickém smyslu: malé změny nynějšího stavu věcí mohou vést k velkým chybám v předpovědích) a složitost rovnic omezují praktičnost tohoto programu ve všech situacích kromě těch nejjednodušších, ale zákony samotné neoblomně diktují jednoznačnou budoucnost i minulost.

Kvantová revoluce žádala, abychom se této klasické perspektivy vzdali, protože nové výsledky prokázaly, že šlo o perspektivu nepopíratelně chybnou. Pro popis pohybu takových velkých objektů, jako je Země a Měsíc, nebo pro předpovídání pohybu předmětů z každodenního života, jako jsou kameny a míče, klasické zákony dobře fungují. Ale přesuňte se do mikrosvětla molekul, atomů a subatomárních částic, a klasické zákony selžou. Na rozdíl od samotné podstaty klasického uvažování *nedostanete* vždycky identické výsledky, provedete-li mnohokrát identický experiment s identickými částicemi a identickým nastavením všech jeho součástí.

Představte si například, že máte 100 totožných krabic, každá obsahuje jeden elektron, a všechny jsou připraveny k pokusu totožnou laboratorní procedurou. Přesně po 10 minutách změříte, vy a vašich 99 pomocníků) polohy všech 100 elektronů. Navzdory tomu, co Newton, Maxwell i mladý Einstein očekávali – a na co by pravděpodobně vsadili i své životy –, těchto 100 měření neskončí stejnými výsledky. Na první pohled budou ve skutečnosti výsledky vypadat náhodně, protože některé elektrony uvidíte nedaleko levého dolního předního rohu krabice, jiné nedaleko pravého horního zadního rohu, další blízko středu krabice a tak dále.

Pravidelnosti a přesné grafy funkcí, které z fyziky činí exaktní disciplínu schopnou předpovědi, začnou být viditelné, až když stejný experiment se 100 elektrony v krabici mnohokrát zopakujeme. A co pak zjistíme? Nalezneme-li v první várce 100 experimentů 27 % elektronů nedaleko levého dolního rohu, 48 % nedaleko pravého horního rohu a 25 % v blízkosti prostředku, zjistíme v druhé várce rozdělení velmi podobné. A stejně tak i ve třetí, čtvrté a v těch následujících. Pravidelnost proto není viditelná v žádném jednotlivém měření; nemůžete předpovědět, kde se elektron objeví. Místo toho se pravidelnost ukrývá ve *statistickém rozdělení* mnoha měření. Tato pravidelnost je tedy zakódována v naději neboli *pravděpodobnosti*, že elektron nalezneme na libovolném konkrétním místě.

Úchvatný úspěch otců kvantové mechaniky byl v tom, že vypracovali matematický formalismus, který zavrhl absolutní předpovědi spojené s klasickou fyzikou a místo toho předpovídal takovéto pravděpodobnosti. Fyzici mohou zadat podrobnosti o tom, jak věci vypadají teď, jako vstupní data do rovnice, kterou Schrödinger publikoval roku 1926 (nebo do ekvivalentní, byť poněkud méně srozumitelné rovnice, kterou poprvé napsal Heisenberg v roce 1925), a potom mohou spočítat pravděpodobnost, že věci budou v jednom stavu, v druhém stavu, nebo v úplně jiném stavu v libovolný okamžik v budoucnosti.

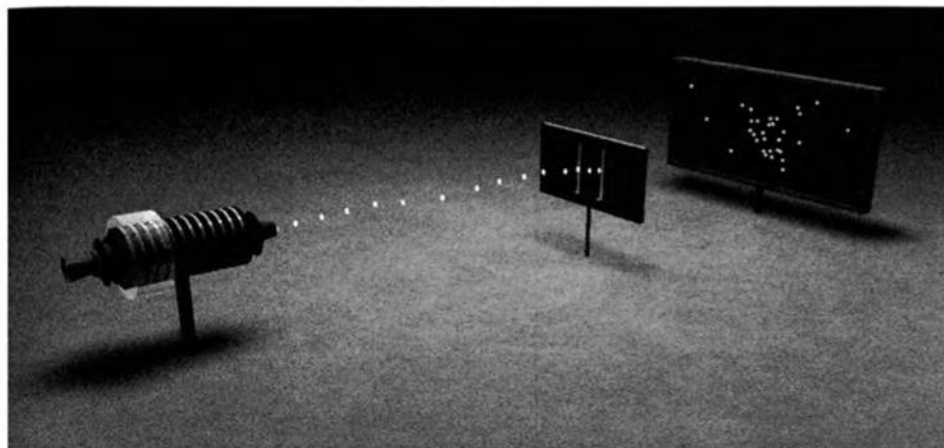
Ale nenechte se zmást jednoduchostí mého skromného příkladu s elektromem. Kvantová mechanika neplatí jen pro elektrony, platí pro všechny typy částic a prozradí nám nejen to, jaké budou jejich pozice, ale i to, jakou budou mít rychlost, moment hybnosti, energii a vůbec jak se budou chovat v široké paletě situací – od přívalu neutrin, která právě teď procházejí vašim tělem, ke zběsilému slučování atomových jader, odehrávajícímu se uvnitř vzdálených hvězd. V celé této široké škále situací souhlasí předpovědi kvantové mechaniky s experimentálními údaji. A to vždycky. Za více než osmdesát let od chvíle, kdy byly tyto myšlenky rozpracovány, nebylo jediného ověřitelného pokusu nebo astrofyzikálního pozorování, jehož výsledek by byl v rozporu s kvantověmechanickými předpověďmi.

V historii vědy jde fakticky o bezprecedentní úspěch jednoho pokolení fyziků, kteří se dokázali tak radikálně odchýlit od intuice formované tisíciletými kolektivními prožitky a kteří převyprávěli celou realitu v řeči zcela nových pojmů a principů postavených na pravděpodobnostech. A přece kvantovou mechaniku už od jejího zrodu doprovázel jeden nepříjemný detail – detail, který nakonec otevřel cestu k paralelním vesmírům. Abychom tento detail pochopili, musíme se na kvantovou mechaniku podívat podrobněji.

Záhada alternativ

Když v dubnu 1925 prováděli dva američtí fyzici, Clinton Davisson a Lester Germer, v Bellových laboratořích jistý experiment, vybuchla jim najednou zkumavka s horkým kouskem niklu. Oba trávili dny tím, že stříleli elektrony do pokusných vzorků niklu, aby tak prošetřili různé atomové vlastnosti tohoto kovu; selhání přístrojů jim práci znepríjemňovalo, byť podobné problémy experimentátoři dobře znají. Když se pustili do zametání střepů, všimli si, že nikl při explozi ztratil lesk. Žádný velký problém to samozřejmě nebyl. Stačilo, aby vzorek zahřáli, znečištění odpařili a začali znovu. A také to udělali. To rozhodnutí vzorek očistit místo toho, aby sháněli nový, se ukázalo jako šťastný krok. Když svazek elektronů namířili na znovu očištěný nikl, výsledky se zcela lišily od čehokoli, co oni sami nebo kdokoli jiný kdy viděl. V roce 1927 už bylo jasné, že Davisson s Germerem prokázali podstatnou vlastnost rychle se vyvíjející kvantové teorie. A za deset let byli za svůj neočekávaný objev odměněni Nobelovou cenou.

Ačkoli oba svůj pokus prováděli ještě před érou zvukových filmů i před velkou hospodářskou krizí, dodnes zůstává nejčastěji používanou metodou, jak demonstrovat podstatné myšlenky kvantové teorie. O co jde? Když totiž zahřáli znečištěný vzorek, velké množství malých krystalů niklu se roztavilo a spojilo do menšího počtu větších krystalů. Proto se jejich svazek elektronů nadále neodrážel od velmi homogenního povrchu niklu, ale odrážel se od několika koncentrovaných míst, v nichž se krystaly niklu soustřeďovaly.

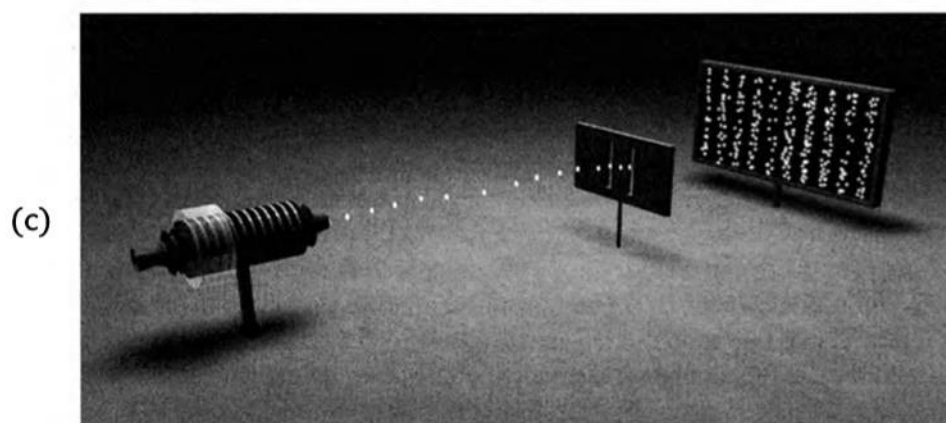
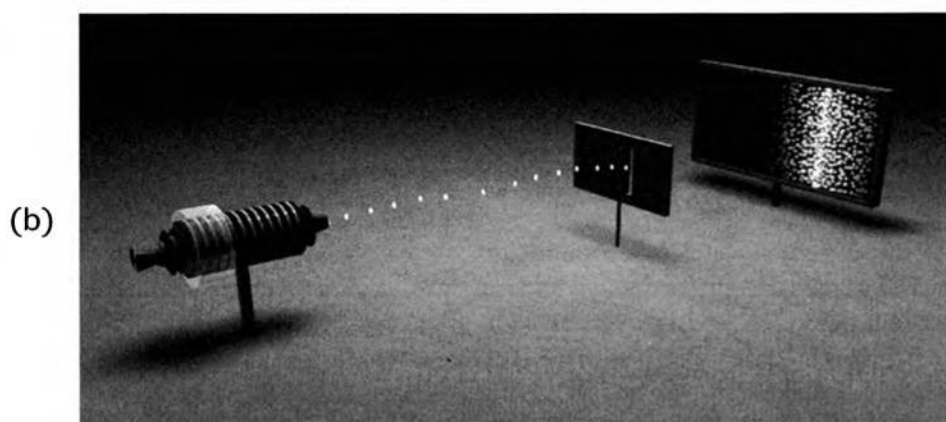
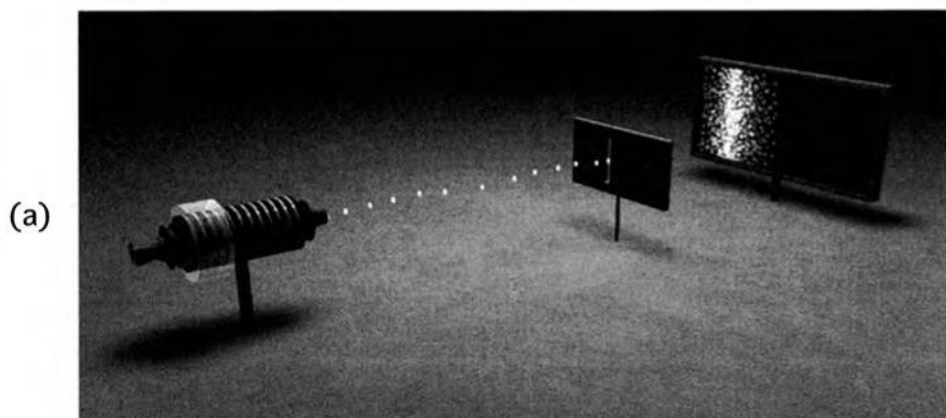


Podstatu Davissonova-Germerova objevu pomůže vysvětlit „dvoušterbinový“ experiment, v němž jsou elektrony dvěma úzkými otvory vystřelovány na bariéru. V Davissonově a Germerově experimentu se dva svazky elektronů vytvářejí tehdy, když se dopadající elektrony odrážejí od sousedních krystalů niklu; v dvoušterbinovém experimentu se dva podobné svazky skládají z elektronů, které prošly oběma šterbinami v bariéře.

Zjednodušený náčrtek jejich pokusu vidíte na obrázku nahoře; takový obrázek, v němž jsou elektrony vystřelovány proti dvěma úzkým šterbinám, stačí k osvětlení všech podstatných fyzikálních jevů. Elektrony vycházející z jedné nebo druhé šterbiny se podobají elektronům, které se odrážejí od jednoho krystalu niklu nebo jeho souseda. V této analogii lze říct, že Davisson s Germerem provedli první verzi toho, čemu dnes říkáme *dvoušterbinový experiment*.

Abyste se konečně dočkali odpovědi na to, v čem jejich šokující výsledek spočívá, představte si, že uzavřete buď levou, nebo pravou šterbinu a posbíráte elektrony, které tou otevřenou šterbinou prolétly a dorazily až na obrazovku detektoru. Poté co takto vystřelíte hodně elektronů, začne obrazovka detektoru připomínat kresbu na obrázcích *a* nebo *b* na straně 184. Racionální člověk vychovaný nekvantovým uvažováním by proto očekával, že když otevřeme obě šterbiny, obrázek na obrazovce detektoru bude prostým sloučením obou dílčích obrázků. Ten ohromující fakt je, že se tak *nestane*. Davisson s Germerem místo toho uviděli soustavu světlých a tmavých proužků (jako na obrázku *c*), které zachycují střídající se místa, kde elektrony přistávají a kde nikoli.

Výsledky takového pokusu se odchyľují od toho, co bychom čekali, způsobem obzvláště podivným. Černé proužky jsou místa, v nichž jsou elektrony zachyceny často jen tehdy, je-li otevřená pouze jedna ze šterbin (odpovídající oblasti na obrázku *a* a *b* jsou *světlé*), ale stanou se zřejmě nedostupnými, jsou-li otevřeny šterbiny obě. *Přítomnost levé šterbiny proto ovlivňuje možná místa,*



- (a) Údaje získané z vystřelovaných elektronů, když je otevřená pouze levá štěrbiná.
(b) Údaje získané z vystřelovaných elektronů, když je otevřená pouze pravá štěrbiná.
(c) Údaje získané z vystřelovaných elektronů procházejících oběma štěrbinami.

kam mohou doletět elektrony procházející pravou štěrbinou, a naopak. A to je dokonale matoucí. Ve srovnání s velikostí tak malinkaté částice, jako je elektron, jde o ohromné vzdálenosti mezi štěrbinami. Když tedy elektron prochází jednou štěrbinou, jak může přítomnost, nebo nepřítomnost druhé štěrbinu jakkoli – natožpak tak dramaticky – ovlivnit, kam elektron doletí? To je, jako kdybyste celé roky vcházeli do administrativní budovy jedněmi dveřmi, ale od chvíle, kdy údržbáři konečně nainstalovali dveře i na druhou stranu budovy, byste najednou nemohli do své kanceláře dojít.

Jak si to vysvětlit? Dvoušterbinový experiment nás nutně přivádí k závěru, jemuž je těžké se dostat na kloub. Nehledě na to, kterou štěrbinou prochází, „ví“ každý jednotlivý elektron o obou. Něco, co je přičleněné nebo spojené s částí každého jednotlivého elektronu, je ovlivněno oběma štěrbinami.

Ale co by to mohlo být?

Kvantové vlny

Abyste alespoň zhruba pochopili, jak může elektron prolétající jednou štěrbinou „vědět“ o té druhé, prohlédněte si dobře obrázek *c* na protější straně. Světlo-tmavo-světlo-tmavou strukturu proužků fyzik rozpozná rychleji než matka tvář svého dítěte. Takový vzorek mu říká – ne, on přímo křičí –, že jde o *vlny*. Jestliže jste někdy hodili do rybníka dva oblázky a sledovali, jak se jimi vytvořené vlnky rozptylují a překrývají, pak víte, o čem mluvím. Tam, kde se vrchol jedné vlny setkává s vrcholem vlny druhé, je kombinovaná výška vlny velká; tam, kde se setkají dvě minima, je zase výrazný kombinovaný pokles hladiny; nejdůležitější je, že tam, kde se maximum jedné vlny setká s minimem jiné vlny, se vlny vzájemně vyruší a hladina vody zůstane v obvyklé výšce. To znázorňuje obrázek na straně 186. Kdybyste umístili obrazovku detektoru podél horního okraje obrázku, aby zaznamenala kmitání vodního povrchu v každém bodě – čím silnější kmitání, tím světlejší barva na obrazovce –, uviděli byste na obrazovce posloupnost střídajících se světlých a tmavých oblastí. Světlé oblasti by vznikly tam, kde vlny tahají za jeden provaz, a proto dohromady vyvolávají silné kmitání; tmavé oblasti by se zase objevily tam, kde se vlny vyruší a kmitání zmizí. Fyzici říkají, že překrývající se vlny spolu *interferují*, a vytvořeným světlo-tmavo-světlým proužkům říkají *interferenční obrazce*.

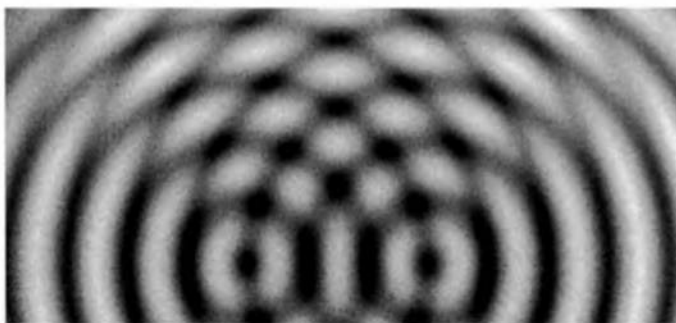
Podobnost s obrázkem *c* je nepřehlédnutelná, takže chceme-li údaje z měření elektronů pochopit, musíme uvažovat o vlnách. Dobře. To je začátek. Ale podrobnosti zůstávají v mlze. O jaký druh vln jde? Kde jsou? A co mají společného s částicemi, jako jsou elektrony?

Další nápovědu nabízí experimentální fakt, který jsem zdůraznil na úvod. Celé stohy údajů o pohybu částic ukazují, že pravidelnosti se objevují pouze statisticky. Stejná měření zopakovaná na totožně připravených částicích

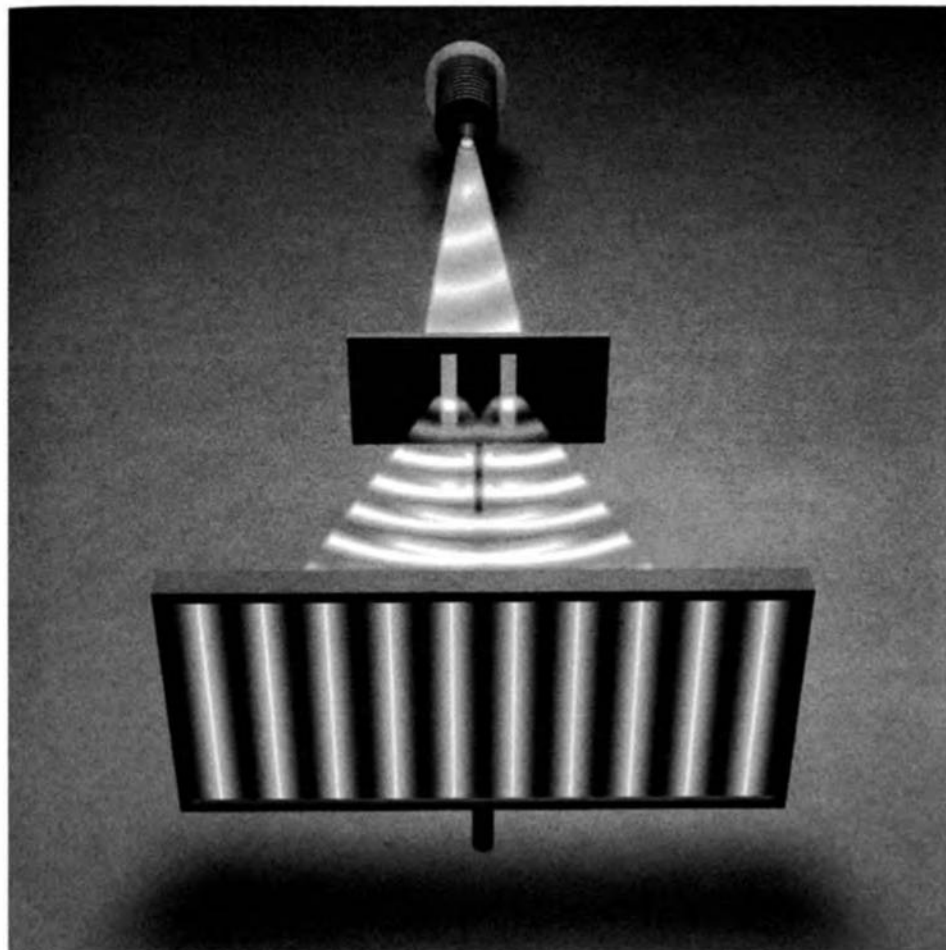
obecně naleznou tyto částice na různých místech; a přece velký počet takových měření prokazuje, že částice mají v průměru stejnou pravděpodobnost, že budou nalezeny v libovolném zvoleném místě. V roce 1926 si německý fyzik Max Born tyto dvě nápovědy dal dohromady a dospěl k závěru, za který o téměř třicet let později obdržel Nobelovu cenu. Existují experimentální důvody si myslet, že pravděpodobnosti hrají roli. Možná, řekl Born, je vlna spojená s částicí *vlna pravděpodobnosti* neboli *pravděpodobnostní vlna*.

To byl bezprecedentní a senzačně originální příspěvek vědě. Jeho podstata je v tom, že bychom neměli částici při rozboru jejího pohybu považovat za balvan, který se valí z jednoho místa k druhému, spíše bychom si ji měli představit jako vlnu, která se *vlíní* z místa na místo. Místa s vysokou hodnotou vlny, nedaleko jejích horních a dolních bodů, jsou místy, kde se částice vyskytne s velkou pravděpodobností. Místa, kde jsou hodnoty pravděpodobnostní vlny nízké, jsou místy, kde částice spíše nenalezneme. V místech s nulovou hodnotou vlny částice nenajdete v žádném případě. Jak vlna postupuje dopředu, její velikost se vyvíjí, v některých místech stoupá a v jiných klesá. A protože kmitající hodnoty vlny interpretujeme jako oscilující pravděpodobnosti, vlna právem dostala název pravděpodobnostní vlna.

Hned se můžeme podívat, jak tento pojem vysvětluje data z dvouštěrbinového experimentu. Když elektron přilétá k bariéře na obrázku *c* na straně 184, měli bychom si ho podle kvantové mechaniky představit jako vlnu pohybující se prostorem (jako na obrázku na straně 187). Když se vlna setká s bariérou, dvě její části projdou štěrbinami a vlíní se dál směrem k obrazovce detektoru. A další události jsou klíčové. Právě jako překrývající se vlny na vodě i pravděpodobnostní vlny přicházející ze dvou štěrbin se překrývají a interferují, čímž kreslí tvar podobný tomu z obrázku dole: obrazec s vysokými a nízkými hodnotami, které podle kvantové mechaniky odpovídají struktuře vysokých a nízkých pravděpodobností, že elektron v daném místě přistane. Jestliže je vystřelován elektron za elektronem, pak shromážděná data o místech, kde elektrony přistály, jsou v souladu s tímto pravděpodobnostním profilem.



Když se dvě vlny překrývají, „interferují“, tedy vytvářejí střídající se oblasti silnějšího a slabšího chvění – interferenční obrazec.



Když popisujeme pohyb elektronů v řeči pohybujících se pravděpodobnostních vln, můžeme matoucí interferenční data vysvětlit.

Velká část elektronů skončí tam, kde je pravděpodobnost vysoká, menší část tam, kde je nízká, žádné nenajdeme tam, kde je nulová. Výsledkem jsou světlé a tmavé proužky z obrázku *c* na straně 184.³

A takto kvantová teorie data vysvětluje. Z popisu je zřejmé, že každý elektron „ví“ o obou štěrbinách, protože pravděpodobnostní vlna každého elektronu oběma štěrbinami prochází. Sjednocení těchto dvou částecích vln diktuje pravděpodobnosti toho, kde elektron přistane. Proto také už pouhá existence druhé štěrbině ovlivňuje výsledky.

Ne tak rychle

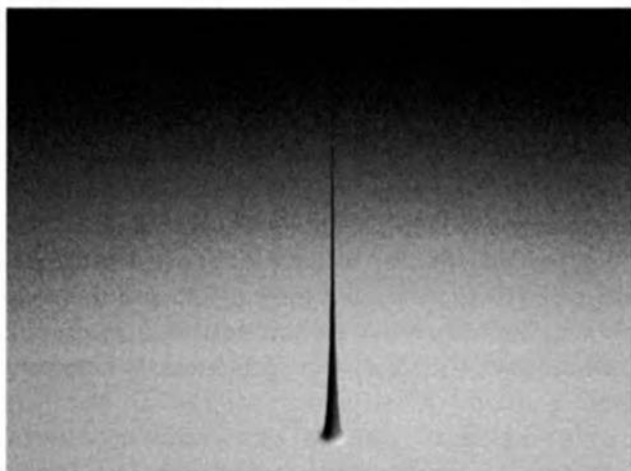
Ačkoli jsem se ve výkladu soustředil na elektrony, prokázaly podobné experimenty, že stejnými pravděpodobnostními vlnami se řídí i pohyb ostatních základních stavebních kamenů přírody. Chování fotonů, neutrin, mionů, kvarků – a všech ostatních fundamentálních částic – je třeba popisovat pravděpodobnostními vlnami. Ale ještě než ohlásíme vítězství, musíme se poprat se třemi otázkami. Dvě jsou přímočaré, třetí hodně těžká. Právě tuto poslední chtěl v padesátých letech zodpovědět Everett a přivedlo ho to ke kvantové verzi paralelních světů.

Zaprvé, odpovídá-li kvantová teorie skutečnosti a svět se vyvíjí pravděpodobnostně, proč byla Newtonova nepravděpodobnostní teorie tak úspěšná v předpovídání pohybu nejrůznějších objektů, od baseballových míčků přes planety až ke hvězdám? Na to lze odpovědět tak, že pravděpodobnostní vlny pro velké objekty mají většinou (ale ne vždycky, jak hned uvidíme) velmi konkrétní tvar. Jsou mimořádně úzké (jako na obrázku *a* na straně 189), což znamená, že s velmi vysokou pravděpodobností, téměř 100%, se objekt nachází v těsné blízkosti vrcholu vlny a s velmi malinkou pravděpodobností, jen o něco nad 0 %, se nachází kdekoli jinde.⁴ Navíc kvantové zákony ukazují, že maxima takových úzkých vln se pohybují po stejných trajektoriích, jaké lze vypočítat z Newtonových rovnic. Zatímco tedy Newtonovy zákony přesně předpovídají dráhu baseballového míčku, kvantová teorie tuto předpověď zpřesňuje jen minimálně; podle ní je téměř 100% pravděpodobnost, že míček přistane tam, kde by měl, a téměř nulová pravděpodobnost, že se tak nestane.

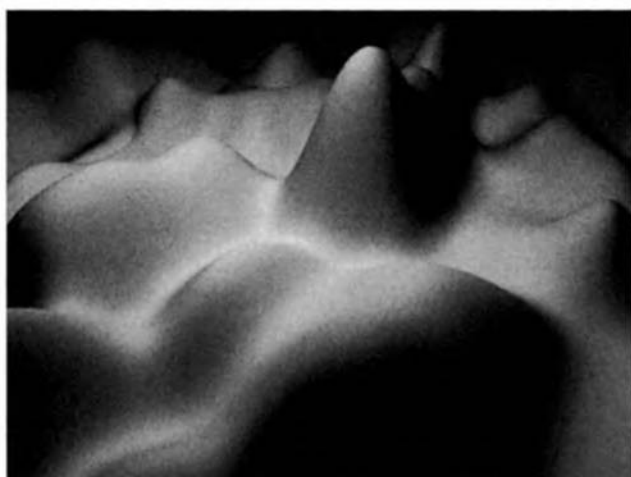
Po pravdě řečeno, slovo „téměř“ naznačuje, že fyzika je méně přesná, než ve skutečnosti je. Naděje, že se makroskopický objekt odchýlí od Newtonových předpovědí, je tak fantasticky nízká, že i kdybyste na celý vesmír dozírali několik miliard let, pravděpodobně byste takovou odchylku ani jednou nezaznamenali. Podle kvantové teorie však platí, že čím menší objekt je, tím rozptýlenější bývá jeho pravděpodobnostní vlna. Například typická vlna elektronu může vypadat jako ta na obrázku *b* na straně 189 a předpovídat výrazně nenulové pravděpodobnosti, že se elektron ocitne na mnoha místech, což je v newtonovském světě věc neslýchaná. Právě proto hraje pravděpodobnostní povaha reality první housle zejména v mikrosvětě.

Zadruhé, můžeme pravděpodobnostní vlny, na nichž kvantová mechanika stojí, spatřit? Existuje způsob, jak se přímo dostat k neznámé pravděpodobnostní mlze (jak ji schematicky ilustruje zmíněný obrázek *b*), podle níž má jedna částice naději být nalezena na mnoha různých místech? Ne, neexistuje. Standardní přístup ke kvantové mechanice, vypracovaný Bohrem a jeho skupinou a na jejich počest nazývaný *kodaňskou interpretací*, předpokládá, že kdykoli chcete pravděpodobnostní vlnu pozorovat, už samotný akt pozorování vám pokusy zhatí. Když se díváte na pravděpodobnostní vlnu

(a)



(b)



- (a) Pravděpodobnostní vlna pro makroskopický objekt je obecně velmi úzká a špičatá.
 (b) Pravděpodobnostní vlna pro mikroskopický objekt, například pro jednotlivou částici, je většinou rozprostřena do velkého objemu.

elektronu, „dívat se“ znamená „měřit polohu“ a elektron zareaguje tak, že se najednou objeví celý na jednom místě. Spolu s tím vzroste pravděpodobnostní vlna v tomto místě na 100 %, zatímco všude jinde poklesne na 0 % (jako na obrázku na straně 190). Když se chvíli nedíváte, špendlíkově ostrá pravděpodobnostní vlna se rychle rozptýlí; to znamená, že opět existuje značná naděje, že elektron lze nalézt na různých místech. Když se podíváte znovu, vlna elektronu zase zkolabuje a vyřadí většinu možných míst, kde se elektron mohl objevit, kdyby se neobjevil v tom jednom konkrétním bodě, kde jste ho našli. Zkrátka pokaždé když se pokusíte onen pravděpodobnostní mrak pozorovat, mrak zmizí – zkolabuje – a je nahrazen dobře známou realitou.

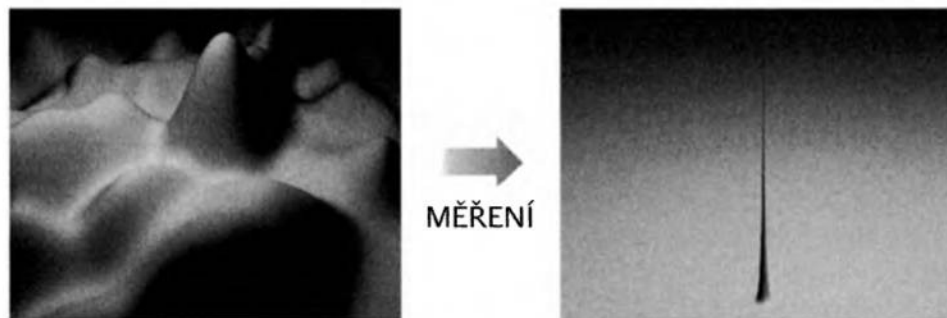
Obrazovka detektoru na obrázku *c* na straně 184 je toho příkladem: detektor měří dopadající pravděpodobnostní vlnu elektronu a tím ji okamžitě přivede ke kolapsu. Přítomnost detektoru donutí elektron, aby se vzdal práva volby, kam dopadnout, a vybral si jednu jedinou možnost – ta se projeví jako jedna malinká tečka na obrazovce.

Je mi jasné, že patrně nad tímto vysvětlení kroutíte hlavou. Nelze popřít, že kvantové dogma vypadá jako reklamní trik. Teorie nabízí ohromující nový pohled na realitu, pohled založený na pravděpodobnostních vlnách, a jedním dechem dodává, že tyto vlny nelze pozorovat. Jako kdyby Lucie tvrdila, že je blondýna – ale jen do chvíle, než se někdo podívá, protože pak se z ní stane rusovláska. Proč tedy fyzici takové nejen podivné, ale i nevyzpytatelné schéma vůbec přijali?

Je štěstí, že přes všechny záhadné a skryté součástky kvantové mechaniky lze její tvrzení ověřit. Podle kodaňských mechaniků platí, že čím větší je pravděpodobnostní vlna na konkrétním místě, tím větší je šance, že právě tam se objeví přeživší špička vlny poté, co vlna zkolabuje – a proto se tam objeví i elektron samotný. Z tohoto předpokladu lze odvodit předpovědi. Zopakujte daný experiment mnohokrát, spočítejte, kolikrát se částice objevila na různých místech, a rozhodněte, zda pozorované frekvence souhlasí s pravděpodobnostmi plynoucími z pravděpodobnostní vlny. Je-li vlna 2,874krát větší *zde* než *tam*, naleznete částici *zde* 2,874krát častěji než *tam*? Předpovědi tohoto typu byly nesmírně úspěšné. Třebaže se vám povaha kvantové mechaniky zdá záluďná, dá se těžko oponovat jejím fenomenálním výsledkům.

Ale jde to.

Tím se dostáváme ke třetí – té nejdůležitější – otázce. Kolaps pravděpodobnostní vlny v průběhu měření (viz obrázky dole) je srdcem kodaňského přístupu ke kvantové teorii. Kombinace jejich úspěšných předpovědí a Bohrova hlasitého přesvědčování obrátila na tuto novou víru většinu fyziků, jenže už přátelské rýpnutí stačí k obnažení jedné její nepřijemné vlastnosti. Schrödin-



Kodaňský přístup ke kvantové mechanice předpokládá, že když je částice měřena nebo pozorována, její pravděpodobnostní vlna okamžitě zkolabuje ve všech bodech kromě jednoho. Interval možných poloh částice se promění v jeden konkrétní výsledek.

gerova rovnice, matematické soustrojí v nitru kvantové mechaniky, určuje, jak se tvar pravděpodobnostní vlny vyvíjí v čase. Řekněte mi, jaký je počáteční tvar vlny (třeba že vypadá jako v obrázku *b* na straně 189), a já můžu vyřešit Schrödingerovu rovnici a nakreslit obrázek toho, jak bude vlna vypadat za minutu, za hodinu nebo za libovolně dlouhou dobu. Ale přímočará analýza rovnice ukazuje, že takový vývoj jako ten představený na straně 190 – okamžitý kolaps vlny ve všech bodech kromě jednoho, který připomíná osamoceného stojícího věřícího v megakostele, kde všichni klečí – podle Schrödingerovy matematiky nemůže v žádném případě nastat. Vlny jistě mohou mít tvar připomínající špendlík – za okamžik z těchto špičatých vln vytěžíme maximum –, ale nemohou se samy *zašpičatit*, jak předepisuje kodaňská filozofie. Matematika to prostě nedovoluje. (Hned uvidíte proč.)

Bohr propagoval nepříliš elegantní řešení: vyvíjejte pravděpodobnostní vlny podle Schrödingerovy rovnice, kdykoli se nedíváte ani neprovádíte jiný typ měření. Když se však podíváte, pokračoval, potom musíte Schrödingerovu rovnici opustit a *prohlásit*, že vaše pozorování způsobilo, že vlna zkolabovala.

Tento Bohřův recept je nejen nešikovný, svévolný a postrádající matematické zdůvodnění, není dokonce ani *jasný*. Kupříkladu přesně nedefinuje slova „dívat se“ nebo „měřit“. Vyžaduje účast lidské bytosti? Nebo, jak se jednou zeptal Einstein, stačí, když se myš podívá ze strany? A co sledování počítačem nebo malé štouchnutí od bakterie nebo od viru? Vytvářejí i tato „měření“ kolaps pravděpodobnostních vln? Bohr všechny fyziky informoval o tom, že namaloval tlustou čáru oddělující malé věci, například atomy a jejich součásti, pro které Schrödingerova rovnice platí, od velkých věcí, například experimentátorů a jejich zařízení, pro které neplatí. Ale nikdy přesně neřekl, kudy ta čára vede. Ani nemohl. Každý rok experimentátoři ověří platnost Schrödingerovy rovnice, bez jakýchkoli modifikací, pro stále větší shluky částic a není žádný důvod předpokládat, že by tato rovnice najednou selhala u masivních objektů, jako jste vy, já nebo cokoli jiného. Podobně jako při povodni voda pomalu stoupala ze sklepa do vašeho obývacího pokoje a nakonec hrozila zaplavením podkroví, tak i matematika kvantové mechaniky soustavně přetékala přes hráze vystavěné kolem říše atomů a slavila úspěchy na stále větších měřítkách.

Jak tedy na tento problém nahlížet? Vy, já, počítače, bakterie, viry i všechno ostatní se skládá z molekul a atomů a ty jsou zase složeny z částic, jako jsou elektrony a kvarky. Schrödingerova rovnice funguje u elektronů a kvarků a všechno nasvědčuje tomu, že funguje i u všeho, co se z těchto stavebních kamenů skládá, ať už to obsahuje jakýkoli jejich počet. To znamená, že Schrödingerova rovnice nejspíše platí i v průběhu měření. Koneckonců měření je pouze kontakt mezi jednou skupinou částic (osoba, přístroje, počítač...) a druhou skupinou částic (částice, kterou nebo které měříme). Je-li tomu tak,

potom Schrödingerova matematika odmítá vzdát se vlády nad chováním hmoty a Bohr se ocitá v potížích. Schrödingerova rovnice vlnám nedovoluje zkolabovat. Podstatný předpoklad kodaňského přístupu jako by byl podkopán.

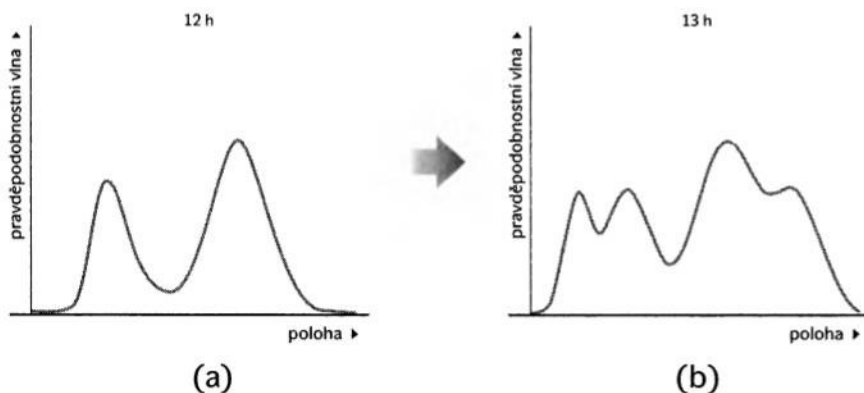
Takže třetí otázka zní: Je-li tento řetězec úvah správný a pravděpodobnostní vlny nekolabují, jak se dostaneme od množiny možných výsledků, které existují před měřením, k jedinému a konkrétnímu výsledku, který měření vybere? Obecněji řečeno: Co se stane s pravděpodobnostní vlnou během měření, které vrací realitě její obvyklou jednoznačnost a jedinečnost?

Everett, který se touto otázkou zabýval ve své dizertační práci v Princetonu, dospěl k neočekávanému závěru.

Linearita a komplikace s ní spojené

Abyste pochopili cestu, jež Everetta k jeho objevu vedla, musíte vědět ještě něco víc o Schrödingerově rovnici. Zdůrazňoval jsem, že pravděpodobnostním vlnám nedovoluje najednou zkolabovat. Ale proč? A co *povoluje*? Zkusme se trochu zamyslet nad tím, jak Schrödingerova matematika ovládá vývoj pravděpodobnostní vlny v čase.

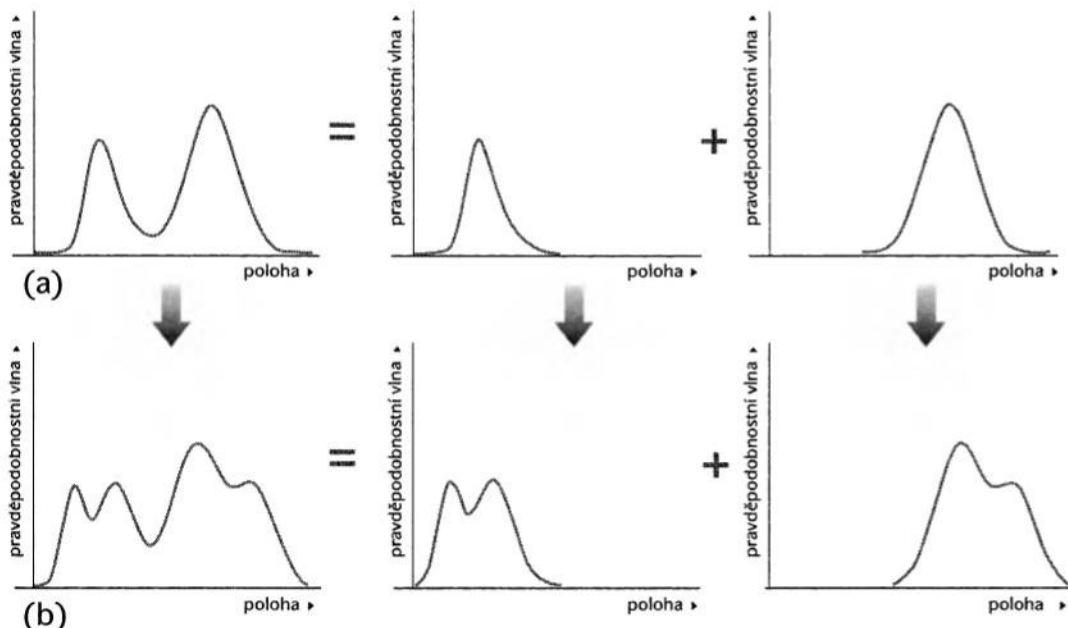
To je poměrně přímočarý úkol. Schrödingerova rovnice je totiž jedna z nejjednodušších matematických rovnic, protože je pro ni příznačná vlastnost známá jako *linearita* – matematické ztělesnění toho, že celek je součtem svých částí. Co to znamená? Představte si, že graf *a* ukazuje pravděpodobnostní vlnu daného elektronu v poledne (kvůli názornosti budu mluvit o pravděpodobnostní vlně, která závisí na pozici v jednom rozměru, a to rozměru reprezentovaném vodorovnou osou, ale úvahy mají obecnější platnost). S pomocí Schrödingerovy rovnice můžeme zjistit, jak se tato vlna vyvíjí v čase, což například ve 13 hodin vede ke tvaru vlny schematicky znázorněnému grafem *b*. Teď si všimněte následujícího. Počáteční tvar vlny z grafu *a* dole můžete



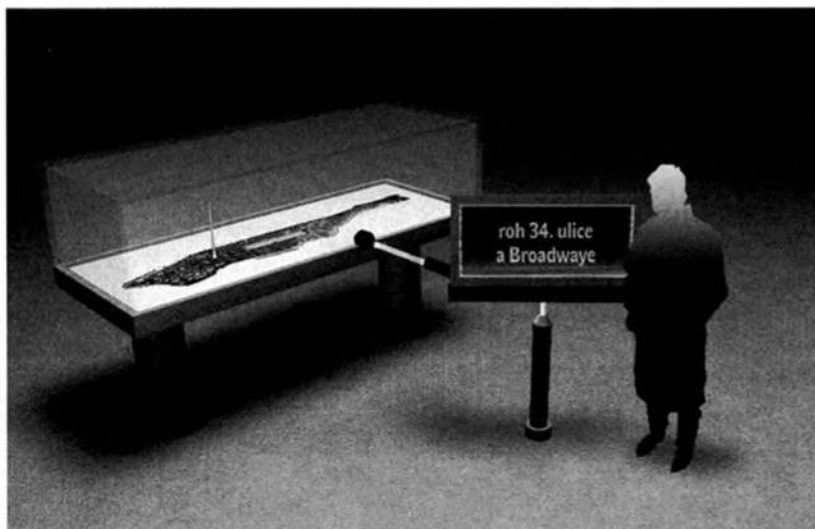
(a) Počáteční tvar pravděpodobnostní vlny v jednom okamžiku se vyvine podle Schrödingerovy rovnice v pozdější chvíli do jiného tvaru (b).

rozložit na dva jednodušší kousky, jak ukazuje dolní graf *a*; když zkombinujete tyto dvě vlny na obrázku a sečtete jejich hodnoty v každém jednotlivém bodě, získáte původní tvar vlny. Linearita Schrödingerovy rovnice znamená, že tuto rovnici lze užít na každý díl z uvedeného obrázku *a* zvlášť, spočítat, jak se tvar každého fragmentu změní do 13 hodin, a potom oba výsledky zkombinovat jako na obrázku *b* dole: takový součet se bude shodovat s výsledkem na obrázku *b* na straně 192. A na rozkladu vlny na *dva* kousky není nic zvláštního; můžete ji rozdělit na libovolný počet kousků, každý zvlášť vyvinout v čase a výsledky zase spočítat, abyste dostali konečný tvar vlny.

To by mohlo znít jako nepodstatný technický trik, ale linearita je mimořádně mocná matematická vlastnost. Umožňuje fyzikům uplatnit strategii „rozděl a panuj“. Je-li počáteční tvar vlny komplikovaný, můžete ho rozdělit na jednodušší části a každou část pak analyzovat odděleně. Na konci dílčí výsledky jednoduše sečtete dohromady. Už jsme konečně viděli důležitou aplikaci linearity při našem rozboru dvouštěřbinového experimentu z obrázku na straně 187. K určení toho, jak se pravděpodobnostní vlna elektronu vyvíjí, jsme si práci rozdělili: všimli jsme si, jak se vyvíjí část vlny procházející levou štěřbinou a jak se vyvíjí část vlny procházející štěřbinou pravou, a obě výsledné vlny jsme sečetli. Tak jsme našli slavný interferenční obrazec. Když se podíváte na tabuli, kterou popsal kvantový teoretik, budou mnohé z jeho matematických manipulací postaveny právě na této metodě.



(a) Počáteční tvar pravděpodobnostní vlny lze rozložit na součet dvou jednodušších tvarů.
 (b) Evoluci počáteční pravděpodobnostní vlny lze zreprodukovat tak, že vyvineme oba jednodušší díly a zkombinujeme oba výsledky.



Pravděpodobnostní vlna elektronu je v danou chvíli koncentrovaná na křižovatce 34. ulice a Broadwaye. Měření polohy elektronu v tomto okamžiku potvrzuje, že elektron se ocitl na vrcholu své vlny.

Linearita však nejenže ulehčuje kvantové výpočty, je i jedním z hlavních zdrojů komplikací při vysvětlování toho, co se děje v okamžiku měření. Nejlépe to uvidíme, aplikujeme-li linearitu na akt měření samotný.

Představte si, že jste experimentátor a nostalgicky vzpomínáte na své dětství v New Yorku, a tak měříte polohy elektronů, které vstřelujete do miniaturního stolního modelu tohoto města. Svůj experiment začnete s jedním elektronem, jehož pravděpodobnostní vlna má obzvláště jednoduchý tvar – je pěkně zašpičatělá (jako na obrázku nahoře), což znamená, že prakticky se 100% pravděpodobností sedí elektron na rohu 34. ulice a Broadwaye. (Nezkoumejte, jak elektron k tomuto tvaru vlny přišel, berte ho jako fakt.)* Když přesně v tomhle okamžiku měříte pozici elektronu kvalitním měřicím zařízením, výsledek bude přesný – přístroj by měl nahlásit „roh 34. ulice a Broadwaye“. A také to nahlásí, jak je vidět z uvedeného obrázku.

Bylo by mimořádně obtížné spočítat, jak Schrödingerova rovnice proplétá pravděpodobnostní vlnu elektronu s vlnami nějakého bilionu bilionů atomů, z nichž se měřicí zařízení skládá, díky čemuž elektron nakonec přiměje atomy v přístroji, aby na displeji rozsvítily nápis „roh 34. ulice a Broadwaye“, ale ať to měřidlo zkonstruoval kdokoli, od této lopotné dřiny nás osvobodil. Zaříze-

* Kvůli zjednodušení neuvažujeme o poloze elektronu ve svislém směru – soustředíme se čistě na jeho polohu na mapě Manhattanu. Rád bych znovu zdůraznil, že zatímco Schrödingerova rovnice neumožňuje vlnám, aby okamžitě zkolabovaly jako na obrázku na straně 190, což jsem snad v této podkapitole jasně vysvětlil, pečliví experimentátoři *dokážou* připravit vlny v takto špičatém tvaru (nebo alespoň ve tvaru velmi podobném).

ní bylo vymyšleno tak, aby jeho interakce s podobným elektronem způsobila, že displej zobrazí jednu konkrétní polohu, kde se elektron právě nachází. Kdyby se v takové situaci přístroj choval jinak, moudře bychom ho vyměnili za jiný, řádně fungující přístroj. Obchodní dům Macy's snad promine, řeknuli, že na křižovatce 34. ulice a Broadwaye samozřejmě není nic výjimečného; kdybychom stejný experiment provedli s pravděpodobnostní vlnou elektronu soustředěnou na Haydenově planetáriu nedaleko 81. ulice a třídy Central Park West nebo v kanceláři Billa Clintona na 125. ulici nedaleko Lenox Avenue, displej zařízení by ohlásil tato místa.

Teď se zamysleme nad trochu složitějším tvarem vlny z obrázku na straně 196. Tato pravděpodobnostní vlna nám říká, že v danou chvíli existují dvě místa, kde lze elektron najít – Strawberry Fields, což je památník Johna Lenona v Central Parku, a hrobka generála Granta v Riverside Parku. (Elektron dnes ovládla zasmušilá nálada.) Když změříme polohu elektronu, ale přitom v rozporu s Bohrem a v souladu s nejrafinovanějšími experimenty předpokládáme, že Schrödingerova rovnice stále platí – pro elektron, pro částice v přístroji i pro vše ostatní –, co se objeví na displeji? Klíčem k odpovědi je linearita. Víme, co se stane, když měříme vlny koncentrované v jednom bodě samostatně. Schrödingerova rovnice v těchto případech předepisuje displeji, aby ukázal něco jako na obrázku na straně 194. Abychom našli výsledek pro vlnu s dvojicí hrotů, musíme podle pravidla linearity zkombinovat dva výsledky měření jednotlivých vln s jedinou špičkou.

A tady se příroda začíná chovat poněkud výstředně. Na první pohled kombinované výsledky naznačují, že displej by měl zároveň ohlásit místa obou špiček vlny – jako na obrázku na straně 196. Slova „Strawberry Fields“ a „Grantova hrobka“ by měla svítit současně a obě místa by se měla míchat podobně jako na monitoru počítače, který každou chvíli zamrzne. Schrödingerova rovnice udává i to, jak jsou pravděpodobnostní vlny fotonů vyslaných displejem přístroje navzájem spjaty či propleteny (korelovány) s částicemi v tyčinkách a čípcích vašeho oka i s těmi částicemi, které o kus dále procházejí vašimi nervovými buňkami, aby ve vaší mysli vytvořily obrázek toho, co vidíte. Předpokládáme-li neomezenou hegemonii Schrödingerovy rovnice, linearita platí i zde, takže nejenže přístroj zároveň zobrazí obě místa, i váš mozek bude zmaten, protože si bude myslet, že je elektron na obou místech.

Budou-li tvary počáteční vlny ještě složitější, zmatení bude ještě divočejší. Tvar vlny se čtyřmi hroty naše závratě zdvojnásobí. A se šesti hroty ztrojnásobí. Všimněte si, že když pokračujete a přidáváte špičaté vlny o různých výškách do každého bodu vašeho modelu Manhattanu, jejich kombinovaný tvar vyplní obvyčejnější a hladší tvar kvantové vlny, takový, jako vidíte na obrázku na straně 197. Linearita stále platí, z čehož plyne, že konečná zpráva na displeji, stejně tak jako konečný stav vašeho mozku a vašeho vnitřního prožitku, jsou určeny sjednocením výsledků pro každou jednotlivou špičatou vlnu.

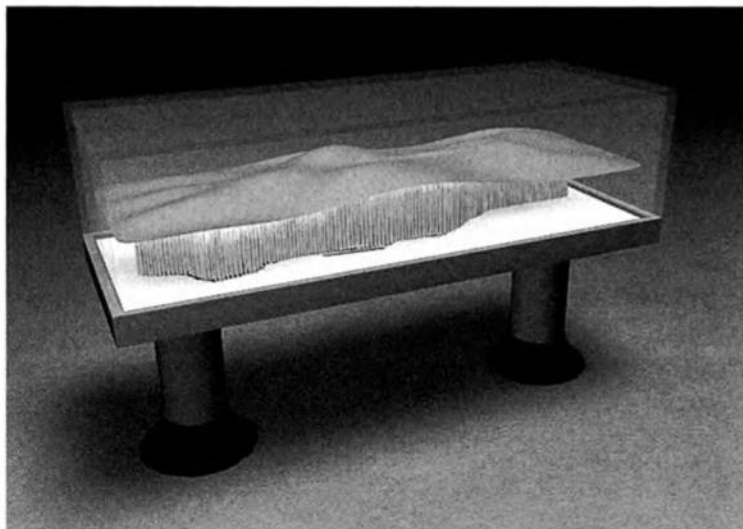


Pravděpodobnostní vlna elektronu je koncentrována ve dvou bodech. Linearita Schrödingerovy rovnice naznačuje, že měření pozice elektronu vyústí ve zmatenou směs obou míst.

Přístroj by měl zároveň zaregistrovat polohu jednoho každého hrotu – každé možné polohy v Manhattanu; spolu s tím začne být i váš mozek dokonale zmatený, protože se nedokáže rozhodnout pro žádnou konkrétní polohu elektronu.⁵

Tohle se samozřejmě zásadně přičí našim zkušenostem. Žádné dobře fungující zařízení přece nezobrazuje protichůdné výsledky. Žádná dobře fungující osoba provádějící měření nedospěje k vnitřnímu prožitku, který by byl omamnou směsicí různých pocitů.

V tuto chvíli možná oceníte půvab Bohrova předpisu. Nechte kinedryl v krabičce, poradil by vám. Podle něj mnohznačné výsledky na měřicím přístroji nemůžeme pozorovat proto, že k nim nikdy nedojde. Patrně by tvrdil, že ke špatnému závěru jsme dospěli proto, že jsme Schrödingerovu rovnici použili mimo doménu její platnosti, tedy u velkých objektů: u laboratorních zařízení, s nimiž jsou měření prováděna, a u vědců, kteří odečítají výsledky. Ačkoli Schrödingerova rovnice a její vlastnost linearit diktují, že bychom měli zkombinovat výsledky, které odpovídají odlišným konečným stavům – nic nikdy nekolabuje –, Bohr nás přesvědčuje, že to je špatně, protože samotným aktem měření platnost Schrödingerovy rovnice popřeme. Místo toho, prohlásil by, zkolabují v důsledku měření všechny hroty na obrázcích ze stran 196 a 197 kromě jednoho na nulu; pravděpodobnost, že konkrétní hrot bude tím jediným pozůstalým, je určena výškou hrotu. Tento jediný zbývající hrot vlny určuje, co zařízení naměří, stejně jako to, jaký výsledek zaregistruje váš mozek. Konec závratí.



Obecná pravděpodobnostní vlna je sjednocením mnoha špičatých vln, z nichž každá reprezentuje možnou polohu elektronu.

Podle Everetta a později i DeWitta musel však Bohr za svůj přístup zaplatit příliš vysokou cenu. Schrödingerova rovnice má popisovat částice. Všechny částice. Proč by najednou měla přestat platit pro konkrétní uspořádání částic – těch, z nichž se skládají měřicí přístroje i experimentátoři sledující přístroje? To prostě nedává smysl. Everett přišel s návrhem, že bychom neměli Schrödingera tak rychle zavrhnout. Raději bychom podle něho měli ze zcela nového pohledu zkoumat, kam nás Schrödingerova rovnice chce dovést.

Mnoho světů

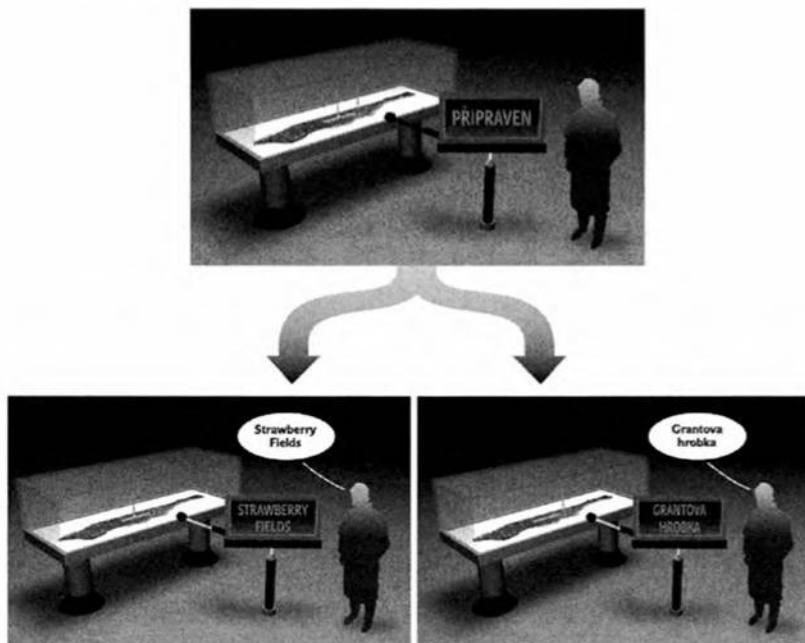
Záhada, na niž jsme narazili, tkví v tom, že se zdá nemožné představit si, že přístroj nebo mozek zároveň prožívá několik možných realit. Můžeme mít protichůdné názory na jednu nebo druhou věc, smíšené pocity ohledně konkrétní osoby, ale když přijde na fakta, z nichž se skládá realita, všechno, co víme, dosvědčuje, že existuje jednoznačný objektivní popis. Veškeré naše zkušenosti potvrzují, že jeden přístroj v jednom měření ohlásí jednu měřenou hodnotu a jedna hodnota v jednom mozku vytvoří jeden vjem.

Everetta napadlo, že Schrödingerova matematika, jádro kvantové mechaniky, je s takovými základními zkušenostmi slučitelná. Zdrojem zdánlivé mnohoznačnosti ve zprávách na displeji a v subjektivních vjemech je způsob, jakým jsme matematické operace provedli, tedy způsob, jakým jsme zkombinovali výsledky měření znázorněné obrázky na stranách 196 a 197. Podívejme se na to pořádně.

Když měříte jednu koncentrovanou vlnu, jako na obrázku na straně 194, přístroj zaregistruje její polohu. Je-li umístěna na Strawberry Fields, objeví se to i na displeji; když se podíváte na výsledek, vaše oči a mozek tuto hlášku zaznamenají a uvědomí si její obsah. Je-li vlna soustředěna na Grantově hrobce, tak přístroj o této skutečnosti informuje oči příslušnou hláškou na displeji a tu si pak uvědomí i mozek. Když měříte vlnu se dvěma hroty z obrázku na straně 196, radí vám Schrödingerova matematika, abyste sloučili oba výsledky, které jste našli před okamžikem. Podle Everetta musíte být však opatrní a přesní, když výsledky slučujete. Kombinovaný výsledek, tvrdil Everett, neodpovídá tomu, že by přístroj i mozek zároveň zaregistrovaly dvě místa. Taková interpretace je mylná.

Postupujeme-li pomalu a přesně podle pravidel, dojdeme k jiné, správnější interpretaci kombinovaného výsledku: Jak přístroj, tak i mozek zaregistrují Strawberry Fields a jak přístroj, tak mysl zaregistrují Grantovu hrobku. A co to znamená? Nejdříve zkusím odpovědět zhruba a poté odpověď upřesním. Abychom zakomponovali Everettem navržený výsledek, musí se přístroj, vy i všechno ostatní po měření rozdělit. Vzniknou tedy dva přístroje, dvě bytosti jako vy a všechno ostatní ve dvou vydáních – jediným rozdílem mezi těmito dvěma skupinami je, že v jedné přístroj i vy zaregistrujete Strawberry Fields, zatímco v druhé přístroj i vy zaregistrujete Grantovu hrobku – jako na obrázku na straně 199. To znamená, že teď máme co do činění se dvěma nezávislými realitami, se dvěma paralelními světy. Každá z obou kopií vašeho těla bude mít dojem, že výsledek měření je jasný a jednoznačný, a tudíž podle ní bude probíhat život jako obvykle. Zvláštní samozřejmě je, že existují dvě vaše těla, která tohle prožívají.

Aby výklad nevybočil z mezí srozumitelnosti, soustředil jsem se na měření polohy jedné částice, navíc popsané obzvláště jednoduchou pravděpodobnostní vlnou. Everettův recept však platí obecněji. Kdybyste měřili pozici částice, jejíž pravděpodobnostní vlna má libovolný počet hrotů, řekněme pět, potom by podle Everetta byla výsledkem pětice paralelních realit, realit lišících se pouze tím, jaká poloha byla zaregistrována přístrojem a kopií vašeho těla v dané realitě. Kdyby jedno z těchto vašich pěti těl dále měřilo polohu další částice, jejíž vlna je soustředěna na sedmi místech, toto vaše tělo by se opět rozdělilo na sedm dalších a každá z těchto kopií by zaregistrovala jeden možný výsledek. A kdybyste – jako na obrázku na straně 197 – měřili vlnu, kterou lze rozporcovat na velký počet tenkých hrotů, vzniklo by velké množství paralelních realit a každá v nich možná poloha částice by byla zaznamenána nějakým přístrojem a přečtena některým z vašich těl. Podle Everettovy filozofie platí, že cokoli je *možné* v kvantověmechanickém smyslu (to znamená všechny výsledky, jimž kvantová mechanika přisuzuje nenulovou pravděpodobnost), je *realizováno* ve svém vlastním odděleném světě. A to je těch „mnoho světů“, o nichž interpretace kvantové mechaniky v řeči mnoha světů mluví.



Má-li pravděpodobnostní vlna měřené částice dva hroty, získáme podle Everettova přístupu v případě měření dva výsledky. V jednom světě se částice nachází na prvním místě, v jiném světě se nalézá na místě druhém.

Teď tedy můžeme rozšířit názvosloví, které jsme začali vytvářet v úvodních kapitolách, a tyto mnohé světy označit za příklad mnoha vesmírů, které dohromady tvoří multivesmír. Multivesmír šestého druhu, s nímž jsme se setkali, budeme nazývat *kvantovým multivesmírem*.

Dva příběhy

Když jsem popisoval, jak může kvantová mechanika dát povstat několika realitám, použil jsem sloveso „rozdělit“. Ani Everett se mu nevyhnul. A ani DeWitt. V tomto kontextu jde ale o sloveso nebezpečné, neboť má potenciál uvést čtenáře i posluchače v omyl, a proto jsem se mu původně chtěl vyhnout. Nakonec bylo pokušení silnější. Na svou obranu uvedu, že je někdy lepší použít železnou palici na rozbití bariéry, která nás odděluje od exotického návrhu, jak popsat fungování reality, a poté škodu, kterou jsme natropili, napravit než se snažit vyřezat krásné a nepoškozené okénko, skrze které se nám nový pohled naskytne přímo. Použil jsem železné palice; v této a další podkapitole budu opravovat, co jsem rozbil. Některé z těchto myšlenek jsou o něco složitější než to, s čím jsme se zatím setkali, i řetězce úvah potřebných k vysvětlování jsou o něco delší, ale věřím, že mě neopustíte. Zjistil jsem, že

až příliš často si lidé, kteří se učí nebo už i něco vědí o mnoha světech, myslí, že tato interpretace kvantové mechaniky se zrodila ze spekulací nejextravagantnějšího druhu. Nic však není dále od pravdy. Jak vysvětlím, přístup v řeči mnoha světů je v jistém smyslu nejkonzervativnějším známým rámcem, jak definovat kvantovou fyziku. Je důležité pochopit proč.

Podstatným bodem je, že fyzici musejí vždycky mluvit o příbězích dvou typů. Jedním je matematický popis toho, jak se vesmír vyvíjí podle dané teorie. Druhý, neméně klíčový, je fyzikální příběh, který překládá abstraktní matematiku do empirického jazyka. Tento druhý příběh vypráví o tom, jak se matematický vývoj projeví z hlediska pozorovatelů, jako jste vy nebo já, a obecněji o tom, co nám matematické symboly teorie mohou prozradit o povaze reality.⁶ V Newtonových dobách byly oba tyto příběhy v podstatě totožné, jak jsem uvedl v 7. kapitole při výkladu o newtonovské „architektuře“, která je přímo použitelná a hmatatelná. Každý matematický symbol v Newtonových rovnicích má přímý a zřejmý fyzikální protějšek. Symbol x ? Ale ano, to je poloha míče. Symbol v ? To je rychlost míče. Když ale dospějeme ke kvantové mechanice, a možná už dříve, slovníček překládající matematické symboly do toho, co můžeme vidět ve světě kolem nás, začne být mnohem spleťtější. A proto se použitý jazyk i pojmy potřebné pro oba příběhy začnou natolik rozcházet, že chce-li člověk světu dobře rozumět, musí zvládnout oba jazyky. Nesmí však zapomenout, který příběh kam patří: musí stále rozlišovat, které myšlenky a popisy jsou zapotřebí jako součást fundamentální matematické struktury teorie a které jsou nutné ke stavbě mostu vedoucího k lidským vjemům a zkušenostem.

Podívejme se teď na oba tyto příběhy, které dohromady tvoří interpretaci kvantové mechaniky v řeči mnoha světů. A začněme prvním z nich.

Matematika mnoha světů je, na rozdíl od té kodaňské, čistá, jednoduchá a neměnná. Schrödingerova rovnice určuje, jak se pravděpodobnostní vlny vyvíjejí v čase, a nikdy není své úlohy zbavena; ta rovnice platí *stále*. Schrödingerova matematika ovládá tvar pravděpodobnostních vln, díky čemuž se v průběhu doby vlny posouvají, proměňují a vlní. Ať pravděpodobnostní vlna popisuje částici, skupinu částic nebo obrovskou soustavu částic, které říkáme já, vy nebo měřicí přístroj, interpretuje Schrödingerova rovnice vždycky počáteční tvar pravděpodobnostní vlny jako vstup nebo zadání úkolu a – podobně jako promyšlený grafický program pracující v jádru spořiče obrazovky – může poskytnout tvar vlny v libovolném budoucím okamžiku jako výstup nebo výsledek. Tak vypadá vývoj vesmíru podle této interpretace kvantové mechaniky. Tečka. Konec příběhu. Přesněji – konec prvního příběhu.

Všimněte si, že jsem při vyprávění tohoto příběhu nepotřeboval slovo „rozdělit“ ani „mnoho světů“, „paralelní vesmíry“ či „kvantový multivesmír“. Interpretace v řeči mnoha světů netvrdí, že tyto entity hrají roli. Nehrají žádnou úlohu ve fundamentální matematické struktuře teorie. Takové myšlenky účinkují jen v druhém příběhu této teorie, v němž jde o to, co nám matema-

tika podle Everetta a těch, kdo jeho průkopnickou práci rozpracovali, říká o pozorováních a měřeních.

Začněme jednoduše – nebo tak jednoduše, jak to umíme. Představte si, že měříte elektron, který má takovou špičatou pravděpodobnostní vlnu jako na obrázku na straně 194. (A vůbec se netrapte tím, jak vlna k tomuto tvaru přišla; berte ho jako fakt.) Jak bylo už řečeno, dokonce i tento poměrně jednoduchý proces měření je tak složitý, že podrobně popsat jeho první příběh je nad naše síly. Na to, abychom zjistili, jak se pravděpodobnostní vlna popisující polohy velkého množství částic obsažených ve mně, ve vás a v měřicím přístroji skloubí s pravděpodobnostní vlnou elektronu a jak se jejich sjednocení vyvíjí v čase, bychom museli použít Schrödingerovy matematiky. Mí studenti bakalářského studia, a to i ti dost šikovní, často svádějí boje i se Schrödingerovou rovnicí pro jedinou částici. Mezi přístrojem a vámi je přibližně 10^{27} částic. Vyřešit Schrödingerovu rovnici pro tolik stavebních kamenů je v podstatě nemožné. A přece lze zhruba pochopit, jaké důsledky z této matematiky vyplývají. Měříme-li polohu elektronu, vyvoláváme tím hromadné stěhování částic. Kolem 10^{24} částic v displeji přístroje se rozběhne na svá určená místa jako cvičenci na mety v povedeném představení na spartakiádě, aby kolektivně vytvořily nápis „Roh 34. ulice a Broadwaye“, zatímco podobně početné částice v našich očích a mozcích se činí, seč mohou, abychom tento výsledek spolehlivě vstřebali. Schrödingerova matematika – nehledě na obtížnost jejího rozboru v případě tolika částic – takovou proměnu stavu částic popisuje.

Znázornit takovou transformaci na úrovni pravděpodobnostní vlny je nad lidské možnosti. Na uvedeném obrázku na straně 194 a jemu podobných jsem na dvě osy nanesl severo-jihní a západo-východní směr čtvercové sítě v našem modelu Manhattanu, abych mohl označit možné polohy jedné částice. Velikost pravděpodobnostní vlny v každém místě byla znázorněna jako výška této vlny. Už tím jsem problém zjednodušil, protože jsem vynechal svislou polohu částice (zda se částice nachází na druhém, nebo pátém patře obchodu Macy's). Zahrnout výšku částice by bylo nešikovné, protože by mně už nezbyl žádný směr, jímž bych mohl vyjádřit velikost vlny. Taková jsou omezení našich mozků a zrakových orgánů, jež evoluce pevně ukotvila ve třech prostorových rozměrech. Abychom si správně představili pravděpodobnostní vlnu pro 10^{27} částic, potřebovali bychom začlenit tři osy pro každou částici, což by nám dovolilo matematicky vyjádřit každou kombinaci poloh všech částic.* Už přidání jedné svislé osy do obrázku na straně 194 by výrazně snížilo jeho názornost a přemýšlet o tom, že přidáme miliardu miliard miliard dalších, by byla, a teď je to slovo na místě, hloupost.

Ovšem psychologicky stravitelné znázornění klíčových myšlenek je důležité, ať už vede k jakkoli nedokonalým výsledkům, a proto se o ně pokusme. Když

* Matematický popis naleznete v poznámce 4.

Matematický příběh



Fyzikální příběh



Schematické znázornění kombinované pravděpodobnostní vlny pro všechny částice, z nichž se skládáte vy i váš měřicí přístroj.

načrtnu pravděpodobnostní vlnu pro částice, z nichž se skládáte vy a váš přístroj, budu se snažit nepřekročit omezení plochého papíru o dvou rozměrech, ale užiju neobvyklou interpretaci toho, co oba rozměry znamenají. Zhruba řečeno, každá osa bude zastupovat ohromnou množinu os, pevně svázaných do balíčku; tím symbolicky znázorním možné polohy srovnatelně ohromného množství částic. Vlna nakreslená za pomoci těchto „balíčkových“ os proto bude znázorňovat pravděpodobnosti poloh obřího množství částic. Abych zdůraznil rozdíl mezi situacemi s jednou částicí a s mnoha částicemi, zakreslím obrysy vícečásticové vlny světlejší barvou (viz obrázek nahoře).

Jednočásticové i mnohočásticové ilustrace mají jisté vlastnosti společné. Právě jako špičatý tvar vlny na obrázku ze strany 190 signalizuje pravděpodobnosti, které jsou hodně koncentrované (s téměř 100% pravděpodobností na místě hrotu a téměř 0% všude jinde), tak i špičatý tvar na obrázku nahoře je příznakem silně koncentrovaných pravděpodobností. S touto analogií je však třeba zacházet opatrně, protože poznatky odvozené od jednočásticových ilustrací mají svá omezení. Například obrázek na straně 190 by vás přirozeně mohl vést k názoru, že obrázek na této straně ilustruje chování částic, které jsou shromážděny v okolí stejného bodu. To ale není pravda. Špičatý tvar vlny na zmíněném obrázku symbolizuje, že každá z částic, z nichž jste tvořeni vy i přístroj, začíná v dobře známém stavu, v němž je její poloha určena se 100% jistotou. Ovšem polohy všech částic se obecně neshodují. Částice, z nichž se skládá vaše ruka, rameno a mozek, se téměř jistě nacházejí v místě, kde je vaše ruka, rameno a mozek; částice tvořící měřicí přístroj jsou téměř s jistotou shromážděny v blízkosti místa, kde se nachází přístroj. Špičatý tvar vlny na obrázku nahoře znamená, že každá z těchto částic má jen minimální naději, že bude nalezena kdekoli jinde.

Když teď provedete měření znázorněné na následujících obrázcích, vyvine se mnohočásticová pravděpodobnostní vlna (pro částice uvnitř vás a přístroje) kvůli interakci s elektronem (jak schematicky zachycuje obrázek na stra-

ně 204). Všechny zúčastněné částice budou i nadále obsazovat téměř přesné pozice (uvnitř vašeho těla a v přístroji), a proto si vlna na obrázku *a* uchová svůj špičatý tvar. Pak ale proběhne masivní přeuspořádání částic a vyústí v to, že se na displeji a poté i ve vašem mozku objeví slova „Strawberry Fields“ (jako v případě obrázku na straně 205). Obrázek na straně 204 zachycuje matematickou transformaci předepsanou Schrödingerovou rovnicí, tedy příběhem prvního druhu. Obrázek na straně 205 ilustruje fyzikální popis takového matematického vývoje, tedy příběh druhého druhu. Podobně když provedeme experiment z obrázků na stranách 206 a 207, dojde k analogické proměně vlny (obrázek na straně 206). Tato proměna odpovídá masivnímu přeuspořádání částic, díky němuž se na displeji a ve vaší mysli objeví nápis „Grantova hrobka“ (viz obrázek na straně 207).

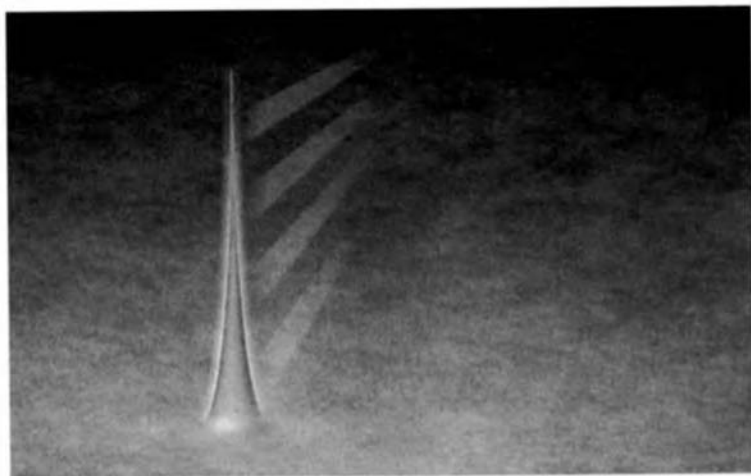
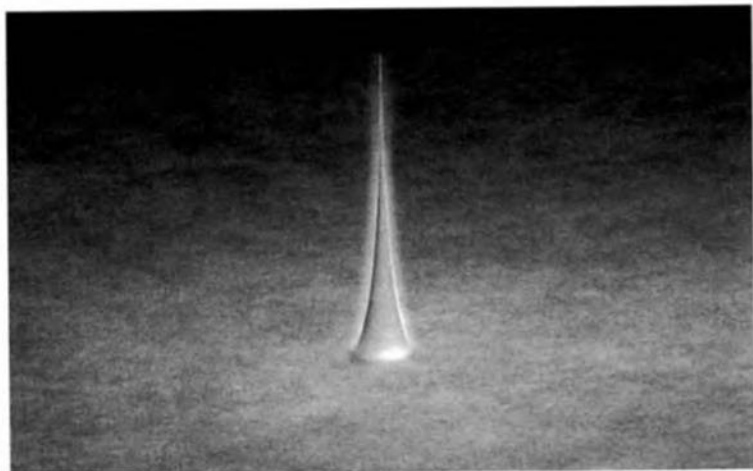
Použijte teď linearity, abyste obě části dali dohromady. Když změříte polohu elektronu, jehož pravděpodobnostní vlna je koncentrována na dvou místech, smísí se pravděpodobnostní vlna pro vás a váš přístroj s vlnou tohoto elektronu, což povede k vývoji ilustrovanému obrázkem ze strany 208 – tedy ke kombinaci vývoju z obrázků ze stran 204 a 206. Zatím jsme neudělali nic víc, než že jsme ke kvantovému příběhu prvního druhu přidali ilustrace a titulky. Na začátku je pravděpodobnostní vlna daného tvaru, Schrödingerova rovnice ji posune dopředu v čase, takže skončí jako pravděpodobnostní vlna nového tvaru. Detaily, které jsme přidali, teď však zdůrazňují jisté podstatné rysy matematického příběhu, skoro jako bychom se dostávali k příběhu druhého druhu.

Každá špička vlny z obrázku na straně 208 fyzikálně reprezentuje uspořádání nesmírného množství částic, které se projevuje rozsvícením konkrétních slov na displeji a tím, že vy tato slova spatříte a zaregistrujete. Pro levý hrot se objeví nápis „Strawberry Fields“, pro pravý zase „Grantova hrobka“. Až na tento rozdíl se oba hroty *ničím* neliší. To zdůrazňují proto, abychom si uvědomili, že žádný z nich není reálnější než ten druhý. Nic kromě nápisu na displeji a vaší mentální reakce na tento nápis tyto dvě špičky mnohočásticové vlny neodlišuje.

A to znamená, že příběh druhého druhu, znázorněný obrázkem na straně 209, mluví o dvou realitách.

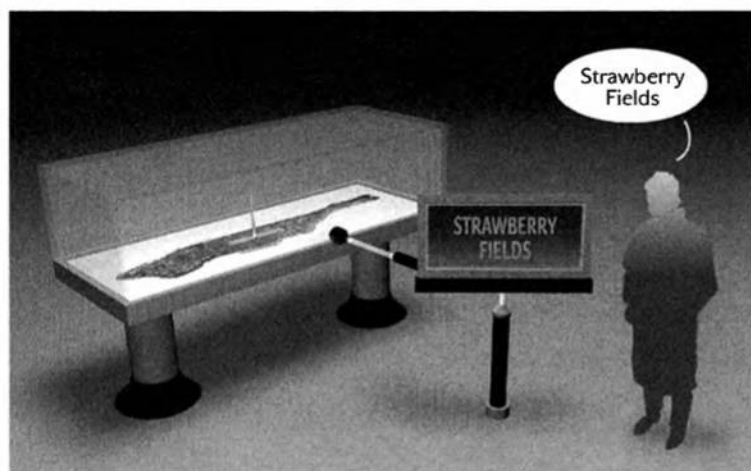
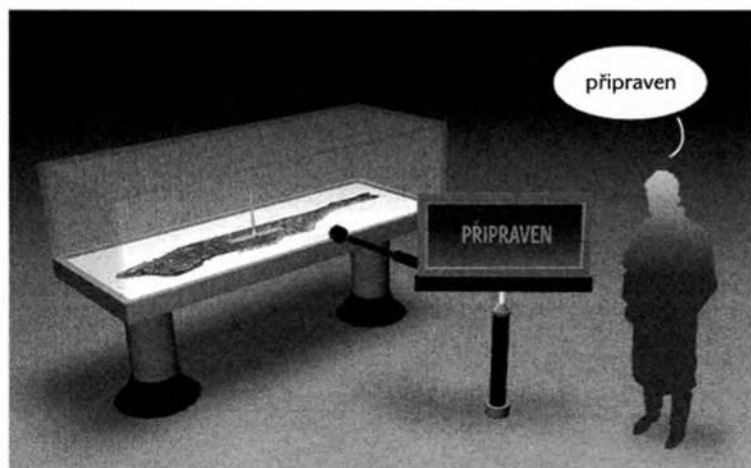
Po pravdě řečeno, na přístroj a na mozek jsme se soustředili jen proto, abychom situaci ještě víc zjednodušili. Mohl jsem zahrnout částice, z nichž se skládá laboratoř a všechno v ní, stejně jako celá Země, Slunce a tak dále. Celá diskuse by vypadala stejně, v podstatě úplně stejně. Jediným rozdílem by bylo, že zesvětlená pravděpodobnostní vlna z obrázku na straně 208 by obsahovala informaci i o všech těchto přidaných částicích. Ale protože měření, o němž mluvíme, nemá na tyto částice prakticky žádný vliv, byly by tyto částice v našem obrázku jen do počtu. Přesto je užitečné tyto částice zahrnout, protože náš druhý příběh teď můžeme rozšířit. Nebude pak vyprávět

Matematický příběh



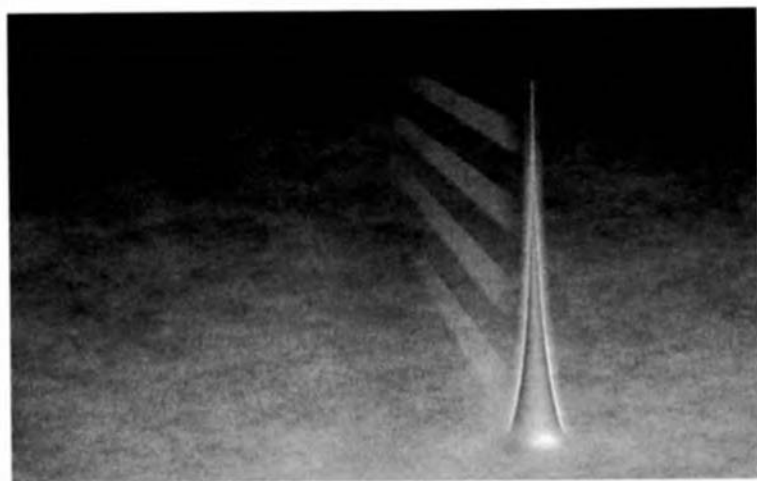
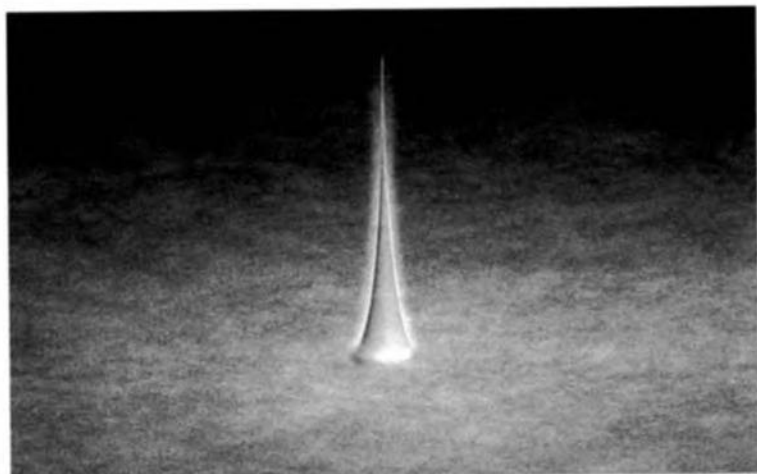
Schematické znázornění Schrödingerovou rovnicí ovládaného vývoje kombinované pravděpodobnostní vlny pro všechny částice, z nichž se skládáte vy i měřicí přístroj, ve chvíli, když měříte polohu elektronu. Pravděpodobnostní vlna elektronu samotného je koncentrovaná na Strawberry Fields.

Fyzikální příběh



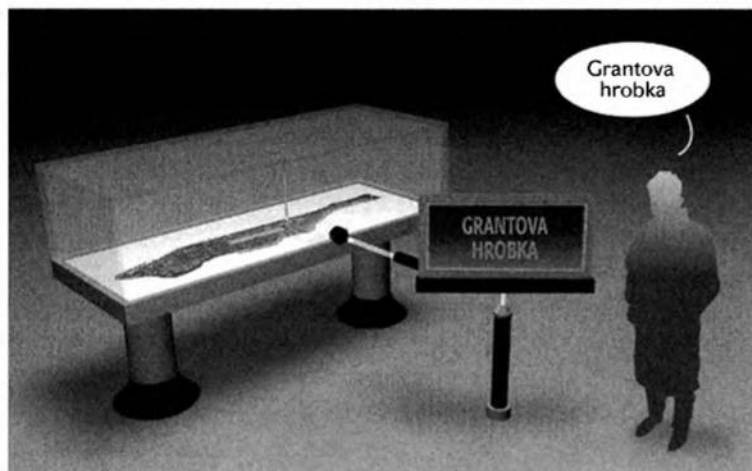
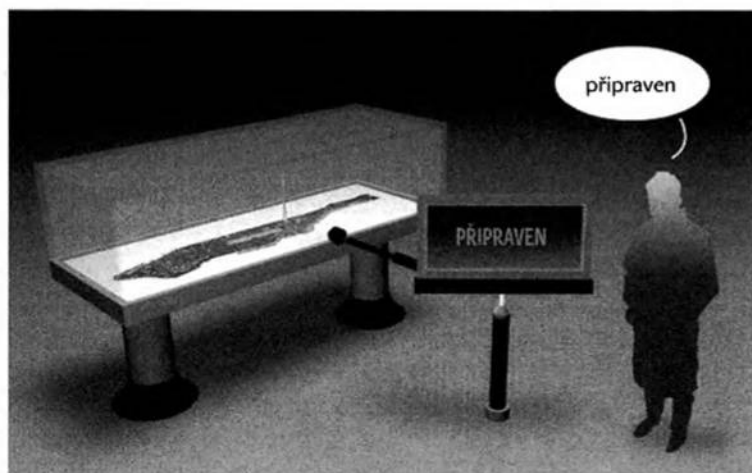
Odpovídající fyzikální čili experimentální příběh.

Matematický příběh



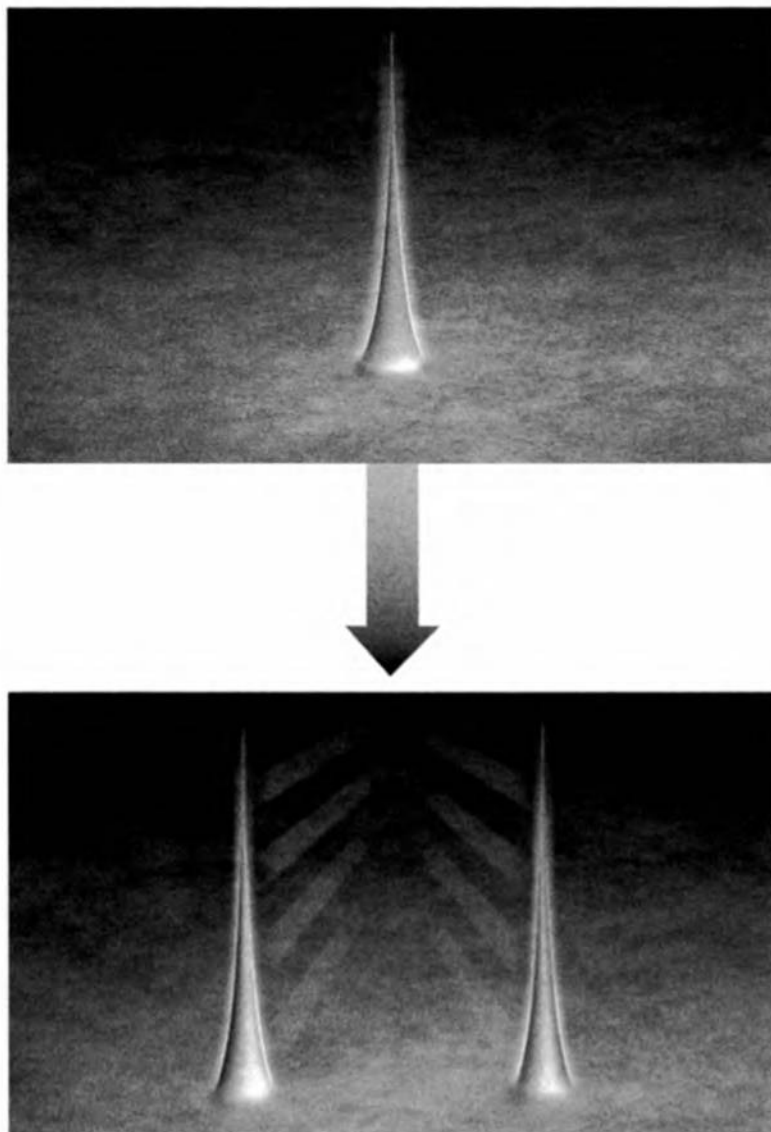
Tento obrázek zachycuje stejný typ matematického vývoje jako obrázek na straně 204, až na to, že je teď pravděpodobnostní vlna elektronu koncentrovaná na Grantově hrobce.

Fyzikální příběh



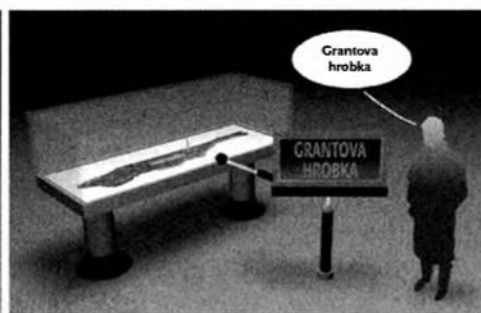
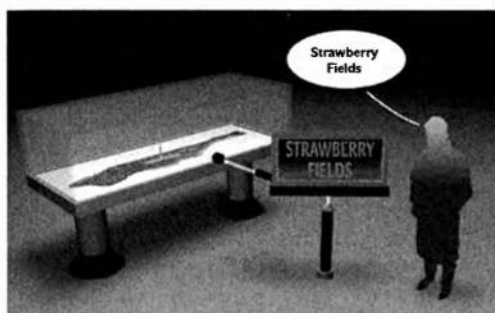
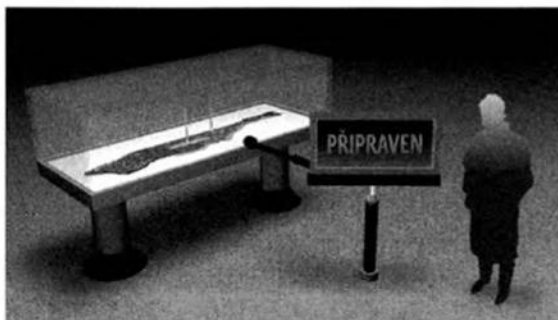
Odpovídající fyzikální čili experimentální příběh.

Matematický příběh



Schematické znázornění evoluce kombinované pravděpodobnostní vlny všech částic, z nichž se skládáte vy i váš přístroj, v případě měření polohy elektronu, jehož pravděpodobnostní vlna je koncentrovaná na dvou místech.

Fyzikální příběh



Odpovídající fyzikální čili experimentální příběh.

jen o kopii vašeho těla, jež hledí na přístroj, který právě dokončil měření, ale i o kopiích laboratoře, zbytku planety na oběžné dráze kolem Slunce a tak dále. To znamená, že každou špičku vlny v jazyce příběhů druhého druhu interpretujeme jako to, čemu jsme dříve v dobré víře říkali jeden vesmír. V jednom z těchto vesmírů vidíte na displeji nápis „Strawberry Fields“, v druhém slova „Grantova hrobka“.

Kdyby měla původní pravděpodobnostní vlna elektronu řečně špičky čtyři, pět, sto nebo jakýkoli počet, důsledky by byly stejné: evoluce vlny by vyústila ve čtveřici, pěťici, stovku nebo libovolné množství vesmírů. V nejobecnějším případě – jako na obrázku na straně 197 – je rozptýlená vlna složena z hrotů na všech místech, a proto dá evoluce vlny povstat obrovské množině vesmírů, a to jednomu pro každou možnou polohu.⁷

Jak jsem předem ohlásil, v tomto scénáři se neděje nic jiného než to, že pravděpodobnostní vlna je zadána do Schrödingerovy rovnice jako vstupní údaj, matematika odvede trochu práce a výsledkem je vlna s modifikovaným

tvarem. Součástí procedury není žádný „klonovací stroj“. Ani „rozdělovací aparát“. Proto jsem koneckonců připustil, že tyto formulace vyvolávají trochu mylný dojem. Jediný „stroj“, který existuje, je ten, který vyvíjí pravděpodobnostní vlnu podle matematického zákona kvantové mechaniky. Když mají výsledné vlny *konkrétní* tvar – jako na obrázku na straně 208 –, můžeme matematický příběh převyprávět v jazyce příběhů druhého druhu a usoudit, že každý z obou hrotů obsahuje vnímavou bytost, nacházející se v normálně vypadajícím vesmíru, která si je jistá, že vidí stejně jako osoba z obrázku na straně 209 jeden jediný výsledek daného experimentu. Kdybych mohl s těmito bytostmi nějak zapříst rozhovor, zjistil bych, že každá z nich je přesnou replikou ostatních. Odlišovaly by se jen tím, že by každá odpřísáhla jiný, ale jednoznačný výsledek měření.

Zatímco by tedy Bohr a jeho kodaňské mužstvo tvrdili, že pouze jeden z těchto vesmírů existuje (protože akt měření, který se podle nich vymyká Schrödingerově rovnici, eliminuje všechny ostatní), a navzdory podivnostem, na něž jsme narazili, když jsme se pokusili o první nesmělý pokus překonat Bohrova omezení a rozšířit Schrödingerovu matematiku na všechny částice, i na ty v přístrojích a mozcích (podivné bylo, že přístroje i mozky si zdánlivě osvojily všechny možné odpovědi najednou), podařilo se Everetovi interpretovat Schrödingerovu matematiku přesněji, což ho dovedlo k nové myšlence: k hojně realitě sestávající z neustále rostoucí množiny vesmírů.

Ještě než Everett v roce 1957 svůj článek publikoval, rozšířila se mezi fyziky na celém světě předběžná verze jeho rukopisu. Po Wheelerových připomínkách byly formulace v textu zredukovány tak razantně, že se z něho mnozí čtenáři ani nedozvěděli, zda Everett tvrdí, že všechny vesmíry obsažené v matematice jsou skutečné. Když se Everett o tom, že jeho práce je pro ně nesrozumitelná, dozvěděl, rozhodl se problém napravit. V „poznámce přidané při korektuře“, kterou se mu zřejmě podařilo vsunout do textu, aniž by si toho Wheeler všiml, pak ostře formuloval svůj pohled na reálnost různých výsledků: „Z hlediska teorie jsou všechny ... ‚skutečné‘ a žádný z nich není ‚reálnější‘ než ostatní.“⁸

Kdy se alternativa stane vesmírem?

Vedle zavádějících slov „rozdělit“ a „klonovat“ jsem v příběhu druhého druhu bezstarostně sáhl i po dvou dalších velkolepých slůvkách – „svět“ a „vesmír“ –, které jsou v tomto kontextu synonymy. Existují předpisy na to, kdy je jejich použití vhodné? Když uvažujeme o pravděpodobnostní vlně pro jediný elektron, která má dvě (nebo více) špičky, nemluvíme o dvou (nebo více) světech. Máme na mysli jeden svět – ten náš –, který obsahuje elektron s nejednoznačnou polohou. Když potom tento elektron měříme nebo pozorujeme, mluvíme podle Everetta o mnoha světech. V čem tkví onen rozdíl mezi nemě-

řenou a měřenou částicí, který se takto radikálně projeví v počtu vesmírů?

Rychlá odpověď je, že v případě jednoho izolovaného elektronu žádný příběh druhého druhu nevyprávíme, protože bez měření nebo pozorování neexistuje žádná spojitost s lidskými vjemy, o kterých by bylo třeba něco říct. Příběh prvního druhu o pravděpodobnostní vlně, která se vyvíjí podle Schrödingerovy matematiky, v sobě zahrnuje všechno podstatné. A bez příběhu druhého druhu neexistuje příležitost k propagaci mnohonásobné reality. Ačkoli by toto vysvětlení mohlo postačit, stojí za to ponořit se do problému trochu hlouběji a seznámit se se zvláštní vlastností kvantových vln, která vstoupí na scénu v případě popisu mnoha částic.

To podstatné vám pomůže pochopit rozbor starého dobrého dvouštěrbinového experimentu z obrázků na stranách 184 a 187. Vzpomeňte si, že pravděpodobnostní vlna elektronu narazí na bariéru a dvěma částem vlny se podaří projít štěrbinami a pokračovat v cestě k obrazovce detektoru. Ovlivnění úvahami o mnoha světech byste mohli být v pokušení si myslet, že tyto dvě letící vlny představují různé reality. V jedné z nich elektron proniká levou štěrbinou, v druhé štěrbinou pravou. Hned vám však dojde, že promíchání těchto údajně „odlišných realit“ zásadně ovlivňuje výsledek experimentu; toto promíchání je důvodem vzniku interferenčního obrazce. Takže není správné a nelze se nic konkrétního dozvědět, považujeme-li obě trajektorie vln za obyvatelky dvou oddělených vesmírů.

Když ale experiment změníme a umístíme měřicí přístroj za každou štěrbinu ve snaze zjistit, zda tudy elektron prošel, situace se zásadně změní. Protože jsme teď přidali makroskopické zařízení, pozměňují dvě různé trajektorie elektronu vlastnosti ohromného množství částic – velkého počtu částic v displejích přístrojů, které detekují, zda „elektron prošel vlevo“ nebo „prošel vpravo“. A kvůli tomu se obě pravděpodobnostní vlny odpovídající oběma možnostem od sebe vzdálí a začnou být natolik různorodé, že je v podstatě nemožné, aby se vzájemně ovlivnily. Rozdíly mezi miliardami a miliardami částic v přístrojích způsobí – právě jako na obrázku na straně 208 –, že se vlny odpovídající oběma výsledkům od sebe natolik vzdálí, že se budou překrývat jen zanedbatelně. Protože tento překryv vlastně zmizí, obě vlny ztratí schopnost spolu interferovat – účastnit se charakteristického jevu kvantové mechaniky. A skutečně: když jsou měřicí přístroje na svých místech, elektrony už nevytvářejí pruhovaný vzorek z obrázku *c* na straně 184, místo toho vykreslují jednoduchou a neinterferující směs výsledků z obrázků *a* a *b* na téže straně. Fyzici říkají, že pravděpodobnostní vlny se rozpojily nebo přesněji *dekoherovaly* (dekoherence je jev, o němž se více dočtete například v 7. kapitole *Struktury vesmíru*).

Pointa je pak v tom, že jakmile dekoherence nastane, vlny pro každý výsledek se začnou vyvíjet nezávisle – nedochází k žádnému dalšímu míchání různých možných konečných stavů –, a každou z nich lze tedy nazývat

samostatným světem nebo vesmírem. V našem případě obsahuje jeden z těchto vesmírů elektron procházející levou šterbinou, jež registruje levý přístroj; druhý vesmír obsahuje elektron procházející pravou šterbinou, který registruje pravý.

V tomto a pouze v tomto smyslu je Everett v souladu s Bohrem. Podle interpretace v řeči mnoha světů se velké shluky částic od malých liší. Velké věci se nevyomykají základním zákonům kvantové mechaniky, jak si Bohr myslel, ale umožňují částem pravděpodobnostní vlny nasbírat dostatečné odlišnosti, takže jejich budoucí schopnost interferovat můžeme zanedbat. A jakmile dvojice nebo větší počet vln ztratí schopnost se takto ovlivňovat, začnou být navzájem neviditelné; každá si „myslí“, že ty druhé zmizely. Takže zatímco Bohr jednoduše soudil, že všechny možné výsledky měření kromě jednoho je třeba vymizíkovat, interpretace v řeči mnoha světů zkombinovaná s dekoherencí zajišťuje, že v každém vesmíru se *zdá*, že ostatní možné výsledky zmizely. Uvnitř každého vesmíru to tedy vypadá, *jako by* pravděpodobnostní vlna zkolabovala. Ale formulace „jako by“ odráží velmi odlišný pohled na realitu, než jaký nabízela kodaňská škola. V interpretaci v řeči mnoha světů jsou realizovány všechny výsledky, nejen jediný.

Neurčitost na frontové linii výzkumu

Tato chvíle jako by byla ideální k zakončení kapitoly. Viděli jsme, že holá matematická kostra kvantové mechaniky nás nutí se s novým pojetím paralelních vesmírů seznámit. Uvidíte však, že nám tato kapitola má ještě co říct. Na zbývajících stránkách vysvětlím, proč interpretace kvantové mechaniky v řeči mnoha světů stále vyvolává spory; uvidíme, že odpor nelze zcela vysvětlit přecitlivělostí celé řady fyziků na koncepční skok, který zásadně mění náš pohled na realitu. Jestliže však už máte dost detailů a máte chuť přeskočit do následující kapitoly, přečtěte si ještě shrnutí.

V běžném životě přemýšlíme o pravděpodobnosti tehdy, když nás čeká jedna z několika možných událostí, ale z určitých důvodů nemůžeme určit, která z nich ve skutečnosti nastane. Někdy máme informaci dost, takže můžeme určit, kterou z variant je rozumnější nebo méně rozumné očekávat; pravděpodobnost je pak nástrojem, jak tyto poznatky vyjádřit kvantitativně. Naše důvěra v pravděpodobnostní úvahy vzroste, zjistíme-li, že události předem označené jako ty pravděpodobnější skutečně nastanou častěji než ty předem označené za méně pravděpodobné. Před vědci vyznávajícími interpretaci v řeči mnoha světů stále stojí obřímí úkol, protože musejí dát smysl pojmu pravděpodobnost – a pravděpodobnostním předpovědím kvantové mechaniky – ve zcela novém kontextu, v kontextu, v němž nastávají *všechny* alternativy. Jak vůbec můžeme tvrdit, že některé výsledky jsou pravděpodobnější než jiné, nastávají-li i ty první, i ty druhé?

Ve zbývajících podkapitolách vysvětlím tento oříšek podrobněji. Zmíním se i o pokusech, které se ho snaží rozlousknout. Předem vás ale varuji! Vplouváme do divokých vod nejnovějšího výzkumu, a proto se vědci liší v názoru, kde se právě teď nalézáme.

Pravděpodobný problém

Často se interpretaci v řeči mnoha světů vytýká, že je prostě příliš vyumělkovaná. Historie fyziky nás učí, že úspěšné teorie jsou jednoduché a elegantní; vysvětlují data s minimálním množstvím předpokladů a umožňují nám porozumět otázkám přesně a ekonomicky. Teorie, která zavádí neustále rostoucí populaci vesmírů, je od tohoto ideálu na hony daleko.

Obhájci mnoha světů tvrdí, a celkem důvěryhodně, že při hodnocení složitosti vědecké hypotézy by se člověk neměl soustředit na *důsledky*. To, na čem záleží, jsou matematické vlastnosti hypotézy samotné. Interpretace v řeči mnoha světů předpokládá, že jediná rovnice, ta Schrödingerova, ovládá pravděpodobnostní vlny vždycky, takže co do jednoduchosti a ekonomičnosti předpokladů obtočí tato interpretace na výbornou. Kodaňská interpretace jistě není jednodušší. I ona vychází ze Schrödingerovy rovnice, ale kromě toho zahrnuje vágní, nepřesně definovaný předpis, podle něhož je třeba na tuto rovnici někdy zapomenout a nahradit ji ještě méně přesně popsaným procesem kolapsu vlny, který podle kodaňské interpretace nastane. Fakt, že interpretace v řeči mnoha světů vede k výjimečně bohatému portrétu reality, není o nic větší kaňkou na jejím vysvědčení, než je úžasná rozmanitost života na Zemi kaňkou na vysvědčení Darwinova přírodního výběru. I mechanismy ve své podstatě jednoduché mohou vést ke komplikovaným důsledkům.

Tohle sice ukazuje, že Occamova břitva není dostatečně ostrá, aby interpretaci v řeči mnoha světů podřízla krk, přemíra vesmírů podle této interpretace nicméně skrývá potenciální problém. Už jsem uvedl, že chtějí-li fyzici aplikovat nějakou teorii, musejí vyprávět příběhy dvou druhů – příběh popisující, jak se svět vyvíjí matematicky, a příběh, který propojuje matematiku s našimi vjemy. Ve skutečnosti existuje ještě příběh třetí, s oběma související, jež fyzik také nemůže vynechat. V kontextu kvantové mechaniky sděluje třetí příběh obecně to, že naše důvěra v kvantovou mechaniku vychází z jejího fenomenálního úspěchu při vysvětlování údajů. Když kvantový expert na základě teorie vypočítá, že při opakování experimentu očekáváme, že jeden výsledek nastane řekněme 9,62krát častěji než druhý, experimentátoři právě tohle pokaždé uvidí. A opačně, kdyby experimenty nesouhlasily s kvantovými předpověďmi, experimentátoři by z toho vyvodili závěr, že kvantová mechanika není správná teorie. Protože jsou to důkladní vědci, byli by ve skutečnosti ve svých soudech opatrnější. Poznamenali by, že existují pochyby o správnosti kvantové mechaniky, ale přiznali by i to, že jejich pokusy nevyloučily

teorii definitivně. Ba i neupravená mince, kterou si hodíte 1 000krát, může přinést výsledky, nad nimiž zůstává rozum stát. Ale čím větší je odchylka od předpověděných pravděpodobností, tím větší má člověk podezření, že je mince „cinknutá“; čím větší by byly experimentální odchylky od předpovědí kvantové mechaniky, tím větší by měli experimentátoři podezření, že kvantová teorie neodpovídá skutečnosti.

To, že je možné důvěru v kvantovou mechaniku podkopat údaji, je podstatné; jakákoli navržená vědecká teorie, která byla příslušným způsobem rozpracována a pochopena, by měla být schopna alespoň v principu říct, že provedeme-li takový nebo onaký experiment a nenalezneme takové nebo onaké výsledky, měla by naše víra ve správnost této teorie poklesnout. A čím víc by se pozorování odchylovala od předpovědí, tím větší by tato ztráta důvěryhodnosti měla být.

Interpretace v řeči mnoha světů je potenciálně problematická a dodnes vyvolává polemiky hlavně proto, že možná podkopává právě uvedenou metodu, jak ohodnotit správnost kvantové mechaniky. Proč se tak děje? Když hodím mincí, mám 50% naději, že padne panna, a 50% naději, že mi padne orel. Tento závěr však závisí na obvyklém předpokladu, že výsledek bude jednoznačný. Když padne panna v jednom světě a orel v jiném a navíc existuje-li v každém z těchto světů kopie mého těla, která zjistí, jak mince dopadla, v jakém smyslu lze mluvit o obvyklých pravděpodobnostech? Bude existovat někdo, kdo vypadá přesně jako já, pamatuje si stejné věci, tvrdí o sobě, že jsem to já, a navíc vidí pannu. A bude existovat i další osoba tvrdící, že jsem to já, a uvidí orla. Protože dojde k oběma výsledkům – existuje jak Brian Greene, který vidí pannu, tak Brian Greene, který vidí orla –, obvyklé úvahy o tom, že Brian Greene uvidí *bud'* pannu, *nebo* orla, zřejmě v takovém světě nelze zdůvodnit.

Stejná potíž nastane i v případě pravděpodobnostní vlny elektronu, která je koncentrovaná v blízkosti Strawberry Fields a Grantovy hrobky (jako na obrázku na straně 209). Podle tradičního kvantového uvažování máte jako experimentátor 50% naději, že elektron naleznete na každém z obou míst. Ale v interpretaci v řeči mnoha světů dojde k oběma výsledkům. Existuje vaše tělo, které nalezne elektron na Strawberry Fields, a další vaše tělo, které ho uvidí na Grantově hrobce. Jak lze pak interpretovat tradiční pravděpodobnostní předpovědi, které by v tomto případě připsaly stejnou pravděpodobnost tomu, že uvidíte jeden, *nebo* druhý výsledek?

Řada těch, kdo se s tímto problémem střetne poprvé, má přirozený sklon soudit, že mezi vašimi různými těly v interpretaci v řeči mnoha světů existuje jedno jaksi skutečnější než ostatní. Ačkoli všechna vypadají stejně a mají i stejné vzpomínky, lidé intuitivně předpokládají, že jen jedna z těchto bytostí jste *opravdu* vy. A podle tohoto způsobu uvažování je to také právě tohle *opravdové* vy, které vidí jeden a pouze jeden výsledek, pro nějž platí pravdě-

podobnostní předpovědi. Pro takovou odpověď mám pochopení. Před lety, když jsem se o těchto myšlenkách dozvěděl, jsem si myslel totéž. Ale taková představa zcela popírá filozofii mnoha světů. Tato interpretace je vystavěná podle minimalistické architektury. Podle ní se pravděpodobnostní vlny jednoduše vyvíjejí podle Schrödingerovy rovnice. A to je vše. Představit si, že jedna z kopií vašeho těla jste „opravdu“ vy, znamená vyběhnout zadními vrátky k interpretaci až příliš podobné té kodaňské. Kolaps vlny v kodaňské interpretaci je surovým způsobem, jak označit pouze jeden z možných výsledků za jediný skutečný. Když si v řeči mnoha světů představíte, že pouze jedna z vašich kopií jste *opravdu* vy, děláte vlastně totéž, jen o něco tišeji. Takovým trikem by zmizel samotný důvod, proč Everett mnoho světů zavedl. Jeho interpretace vzešla z jeho pokusu vyléčit nedostatky kodaňského přístupu a jejím cílem bylo nezavádět nic kromě Schrödingerovy rovnice, prověřené na bojišti experimentů.

Tento poznatek vrhá na interpretaci v řeči mnoha světů nepříjemné světlo. Důvěru v kvantovou mechaniku máme proto, že experimenty její pravděpodobnostní předpovědi potvrzují. Ovšem v interpretaci v řeči mnoha světů je těžké vidět, proč by pravděpodobnost vůbec měla hrát nějakou úlohu. Jak potom můžeme vyprávět příběh třetího druhu, který by měl vysvětlit, od čeho se odvíjí naše důvěra ve schéma mnoha světů? V tomhle se skrývá ono dilema.

Když se nad tím trochu zamyslíme, vlastně nás ani nepřekvapí, že jsme narazili na zeď. V Everettově pojetí vlastně není pro nic náhodného místo. Vlny se jednoduše vyvíjejí od jednoho tvaru k druhému způsobem, který je zcela a deterministicky popsán Schrödingerovou rovnicí. Žádné kostky se nikde nevrhají; žádná ruleta se neroztáčí. To naopak v kodaňském přístupu vystoupí na scénu pravděpodobnost v okamžiku mlhavě definovaného kolapsu vlny, který je způsoben měřením (vzpomeňte si, že čím větší je vlna na daném místě, tím větší je šance, že kolaps umístí částici právě tam). V tomto okamžiku se podle kodaňské školy uplatní „hod kostkami“. Ale protože Everett kolaps zavrhl, odstranil i tradiční vstupní bod, jímž se pravděpodobnost dostala do fyzikálních zákonů.

Má tedy v řeči mnoha světů pravděpodobnost vůbec nějaké místo?

Pravděpodobnost a mnoho světů

Everett si jistě myslel, že má. Převážná část předběžné verze jeho dizertace z roku 1956 i její zkrácená verze z roku 1957 byla věnována vysvětlení, jak včlenit pravděpodobnost do interpretace v řeči mnoha světů. Jenže ani po půl století tato debata nepřestává vzbuzovat emoce. Mezi fyziky a filozofy, kteří si nad touto otázkou celou svou kariéru lámali hlavu, existuje široké spektrum názorů na to, jak a zda vůbec lze mnoho světů a pravděpodobnost

dát dohromady. Někteří tvrdili, že problém vyřešit nelze, a proto by Everetta interpretace měla jít k ledu. Jiní zase argumentovali, že pravděpodobnost nebo alespoň něco, co si na ni hraje, lze skutečně do představy zakomponovat.

Everettův původní návrh názorně předvádí, jaké složité otázky se mohou vynořit. V každodenním životě mluvíme o pravděpodobnosti proto, že naše znalosti nejsou úplné. Kdybychom při hození mince znali dostatek podrobností (o přesných rozměrech a hmotnosti mince, o pohybu ruky při házení a tak dále), potom bychom výsledek předpovědět mohli. Ale protože tyto informace obecně nemáme k dispozici, uchylujeme se k pravděpodobnostem. Podobně uvažujeme i o počasí, loterii a jakémkoli jiném dobře známém příkladu situace, v níž pravděpodobnost hraje úlohu: výsledky považujeme za náhodné jen proto, že naše znalost každé situace je omezená. Everett soudil, že pravděpodobnosti se podle jeho interpretace do fyzikálních úvah nutně vplíží kvůli analogické nevědomości, jejíž zdroj je ovšem velmi odlišný. Obyvatelé mnoha světů mají přístup jen ke svému vlastnímu světu; nemohou prožívat ty ostatní. Podle Everetta se taková omezená perspektiva bez pojmu pravděpodobnosti neobejde.

Abyste pochopili proč, zapomeňte na chvíli na kvantovou mechaniku a vezměte si na pomoc užitečnou, byť nepřesnou analogii. Představte si, že mimozemšťané z planety Zaxtar úspěšně sestrojili klonovací stroj schopný naklonovat totožné kopie mě, vás i kohokoli jiného. Kdybyste do tohoto stroje vstoupili, vyšla by z něho dvě vaše těla. Obě by si byla zcela jistá, že jste to opravdu vy, a obě by měla pravdu. Zaxtaranům dělá radost, mohou-li méně inteligentní formy života postavit před existenční dilema, a tak jednou zaletěli na Zemi s následující nabídkou. Až večer usnete, opatrně vás přesunou do klonovacího stroje; o pět minut později z něho vyjedou dvě vaše kopie. Když se první z nich vzbudí, život bude vypadat normálně – až na to, že jí (tedy vám) ještě k tomu splní jedno přání. Když se vzbudí vaše druhá kopie, život nebude vůbec normální; eskortují ji (tedy vás) do mučírny na planetě Zaxtar, odkud se nikdy nedostane (tedy nedostanete) ven. Napadla vás jedna chytrá otázka, kterou jste hbitě mimozemšťanům položili, ale odpověděli na ni bohužel záporně: Ne, vaše šťastná kopie si nesmí přát osvobození té druhé. Přistoupili byste na takovou dohodu?

Většina lidí by ji nepřijala. Protože každý z klonů jste opravdu, ale *opravdu* vy, přijmout nabídku by znamenalo, že s jistotou bude existovat vaše tělo, které stráví zbytek života v hrozných mukách. Jistě, bude také existovat i jedno vaše tělo, které se probudí do svého obvyklého rána, vylepšeného o neomezenou radost z jednoho splněného přání, ale přece jen, vaši kopii na Zaxtaru nečeká nic než trápení. Cena je příliš vysoká.

Zaxtarané očekávali, že se budete zdráhat nabídku přijmout, a tak měli v záloze jedno vylepšení. Nabízejí vám totéž jako v předcházejícím případě,

ale tentokrát z vás vytvoří milion a jednu kopii. Milion kopií se probudí na identických kopiích planety Země a bude jim splněno jedno přání, jednu ale čeká mučení na Zaxtaru. Přijmete tohle? Začnete váhat. „Krucí,“ pomyslíte si, „mám teď docela dobrou naději, že *já* na Zaxtaru neskončím a probudím se doma, navíc s jedním přáním v kapsce.“

Intuice, která vás vedla k předchozí větě, je obzvláště důležitá pro interpretaci v řeči mnoha světů. Jestliže jste o pravděpodobnostech přemýšleli proto, že si představujete, že pouze jedna z milionu a jedné kopie jste „opravdu“ vy, potom jste ještě zcela nepřijali Everettovu filozofii. Každá z kopií *jste* vy. Je na 100 % jisté, že jednoho z vás čeká po probuzení nesnesitelná budoucnost. Jestliže vás tohle vedlo ke zvažování nadějí a rizik, zapomeňte na to. Pravděpodobnost ovšem mohla vstoupit do vašich úsudků rafinovanějším způsobem. Představte si, že jste právě souhlasili s nabídkou Zaxtaranů a že přemítáte o tom, co s vámi bude zítra ráno. Když se, zkroucení pod teplou peřinou, postupně navracíte k vědomí, oči ještě zavřené, vzpomenete si na dohodu se Zaxtarany. Nejdříve se domníváte, že je to všechno pouze zlý sen, ale vaše srdce se roztluče, jakmile si v hlavě srovnáte, že ta dohoda byla skutečná – že se právě probouzí milion a jedna z vašich kopií, jednu z nich čeká Zaxtar a ty zbylé získají mimořádnou moc. „Jaká je pravděpodobnost,“ přemítáte plni neklidu, „že když otevřu oči, zjistím, že na Zaxtar si vybrali právě mě?“

Než vás naklonovali, neexistoval žádný rozumný důvod, proč mluvit o riziku, že budete odesláni na Zaxtar. Je zcela jisté, že jedno takové vaše tělo bude existovat, takže jak by to mohlo být nepravděpodobné? Po aktu naklonování se však situace změnila. Každá vaše kopie vnímá to, co obvykle vnímáte, a myslí si, že jste to opravdu vy; a skutečně, každá z kopií *jste* skutečně vy. Ale každá kopie je také oddělený a nezávislý jedinec, který může přemýšlet o své vlastní budoucnosti. Každá z milionu a jedné kopie se může ptát, jaká je pravděpodobnost, že právě *ona* bude eskortována na Zaxtar. A protože každá ví, že pouze jedna z milionu a jedné se probudí takto nešikovně, všechny si mohou spočítat, že riziko toho, že právě je postihne taková smůla, je nízké. Po probuzení zjistí milion kopií, že jejich optimismus byl na místě; jedna nikoli. Takže ačkoli neexistuje nic nejistého, nic náhodného, nic pravděpodobnostního v příběhu o Zaxtaru – opakují, žádné kostky nebyly vrženy, žádná ruleta nebyla roztočena –, přesto pravděpodobnost vstoupila na scénu. A to kvůli tomu, že žádný naklonovaný jedinec nebude vědět, který z výsledků bude pozorovat.

Zdá se, že jsme našli recept, jak uvést do interpretace v řeči mnoha světů pravděpodobnosti. Než se pustíte do experimentu, podobáte se vašemu tělu, které ještě nepodstoupilo klonování. Meditujete nad všemi výsledky, které podle kvantové mechaniky mohou nastat, a víte, že existuje 100% naděje, že každý z možných výsledků bude některou z vašich kopií pozorován. Zatím se

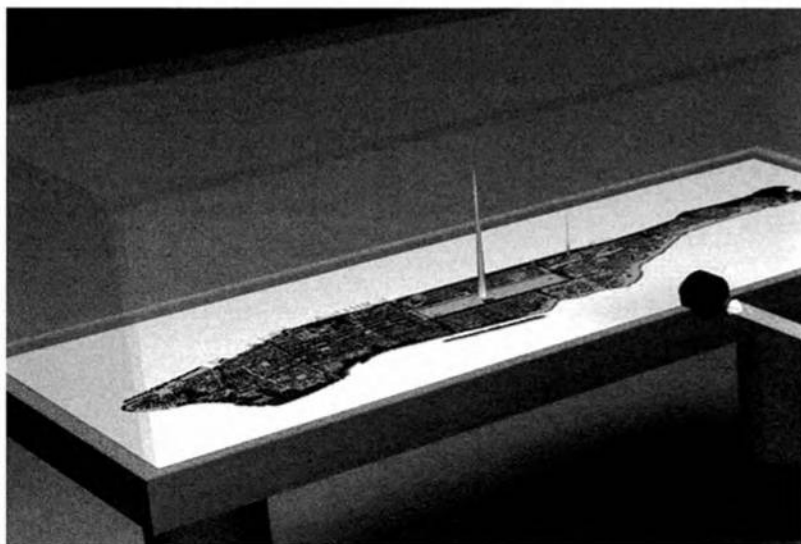
nic náhodného nestalo. Potom provedete experiment. V tomto okamžiku se podobně jako v příběhu o Zaxtaru vynoří pojem pravděpodobnosti. Každá z vašich kopií je vnímavá bytost schopná přemýšlet o tom, jaký svět právě ona obývá – tedy o pravděpodobnostech, že odkrytý výsledek měření bude takový nebo onaký. Pravděpodobnost hraje roli kvůli subjektivním vjemům každého obyvatele multivesmíru.

Everett svou interpretaci nazval „objektivně deterministickou“ a tvrdil, že se pravděpodobnost „znovuobjeví na psychologické úrovni“, což bylo v souladu s jeho původními plány. A tímto směrem uvažování byl nadšen. Jak poznamenal v konceptu své dizertace z roku 1956, tato interpretace skrývala potenciál skloubit postoj Einsteina (který, jak známo, zastával názor, že na fundamentální úrovni není ve fyzice pro pravděpodobnosti místo) a Bohra (který zase neměl s pravděpodobnostmi ve fundamentální teorii vůbec žádný problém). Everett totiž soudil, že jeho interpretace v řeči mnoha světů je slučitelná s oběma postoji, protože oba tyto postoje se liší jen v úhlu pohledu. Z Einsteina pohledu, toho více matematického, se velkolepá pravděpodobnostní vlna pro všechny částice neoblomně vyvíjí podle Schrödingerovy rovnice, zatímco pravděpodobnosti nehrají absolutně žádnou roli.* Rád si představuji Einsteina, jak se vznáší vysoko nad Everettovými mnoha světy a sleduje panoramatické představení, v němž Schrödingerova rovnice zcela určuje vývoj vesmíru, a utvrzuje se v tom, že třebaže kvantová mechanika platí, Bůh *nehraje* v kostky. Bohr na problém pohlíží z hlediska smrtelníka, který obývá jeden z těchto světů, a se stejnou radostí používá pravděpodobností k tomu, aby s ohromující přesností vysvětlil pozorování, k nimž má ze své přízemní polohy přístup.

Je to podmanivá vize – Einstein a Bohr jsou ohledně kvantové mechaniky zajedno. Přetrvávají však jisté mrzuté details, které více než půlstoletí bránily mnohým se k této vizi přihlásit. Ti, kdo studovali Everettovu práci, obecně souhlasí s tím, že zatímco jeho záměr byl jasný – deterministická teorie, která se přesto jeví jako pravděpodobnostní v očích obyvatelů vesmíru –, nepodařilo se mu přesvědčivě vysvětlit, jak tohoto záměru dosáhnout. Kupříkladu v ideové shodě s obsahem 7. kapitoly se snažil určit, co „typický“ obyvatel mnoha světů uvidí v libovolném daném experimentu. Ale (na rozdíl od předmětu našeho zájmu v 7. kapitole) obyvatelé mnoha světů, kteří si zdánlivě konkurují, jsou jednou a touž osobou; kdybyste byli experimentátor, všechny vaše kopie jsou vy a jako kolektiv upozorují celý interval možných výsledků. Která z kopií jste „typický“ vy?

Příběh o planetě Zaxtar by vás mohl přirozeně inspirovat k tomu, spočítat počet vašich kopií, které uvidí určitý výsledek; výsledek pozorovaný nej-

* Kdyby tento náhodnosti zbavený pohled byl správný, potom by bylo velmi odůvodněné zavrhnout hovorový termín „pravděpodobnostní vlna“, jehož jsem užíval i já, a nahradit ho odborným označením „vlnová funkce“.



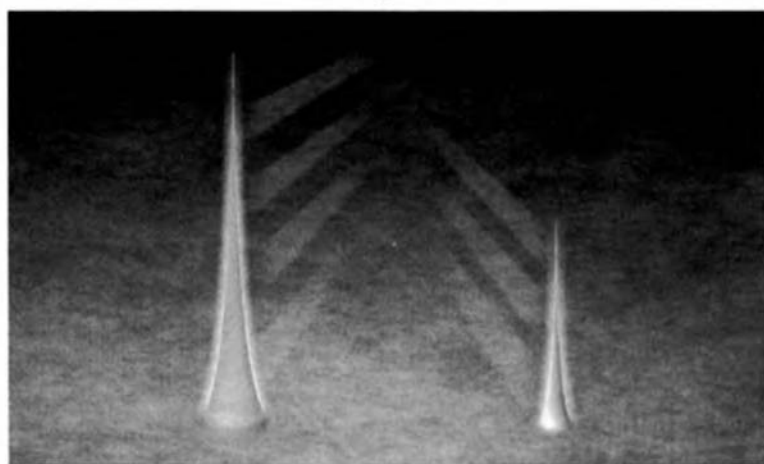
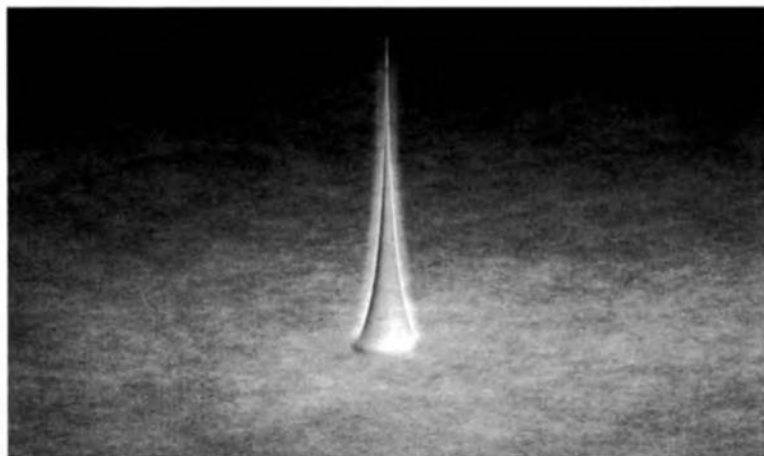
Kombinovaná pravděpodobnostní vlna pro vás a váš přístroj se setkává s pravděpodobnostní vlnou elektronu, která má několik špiček o různé výšce.

větším počtem vašich kopií lze pak považovat za typický. Nebo si můžete z matematiky vypůjčit pojem přímé úměrnosti a definovat pravděpodobnost výsledku jako číslo úměrné počtu vašich kopií, které ho vidí. V jednoduchých případech to funguje: Na obrázcích na stranách 208 a 209 existuje pro každý možný výsledek jedna vaše kopie, která ho vidí, a tak můžete vypočítat 50% pravděpodobnost, že uvidíte jeden, nebo druhý výsledek. To je v pořádku; obvyklá kvantověmechanická předpověď také přisuzuje každé z variant pravděpodobnost 50 %, protože výšky pravděpodobnostní vlny na obou místech se rovnají.

V obecnější situaci, například v takové, jakou vidíte na obrázku nahoře, však výška pravděpodobnostní vlny na různých místech stejná není. Je-li vlna stokrát vyšší na Strawberry Fields než na Grantově hrobce, potom kvantová mechanika předpovídá, že máte stokrát větší naději nalézt elektron na Strawberry Fields. V interpretaci v řeči mnoha světů však produkuje měření stále jen jeden váš klon, který vidí Strawberry Fields, a další, který vidí Grantovu hrobku; pravděpodobnosti založené na vyčíslení počtu vašich klonů jsou stále 50 % na 50 % – a to je špatný výsledek. Původ neshody je jasný. Počet vašich klonů, které vidí jeden, nebo druhý výsledek, je určen počtem vrcholů v pravděpodobnostní vlně. Ale kvantověmechanické pravděpodobnosti jsou určeny něčím jiným – ne počtem hrotů, ale jejich výškami. A tyto předpovědi, kvantověmechanické předpovědi, byly přesvědčivě potvrzeny experimenty.

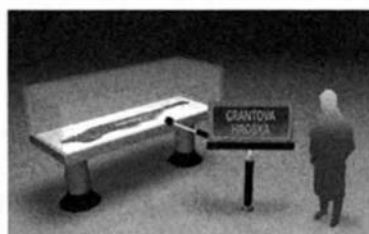
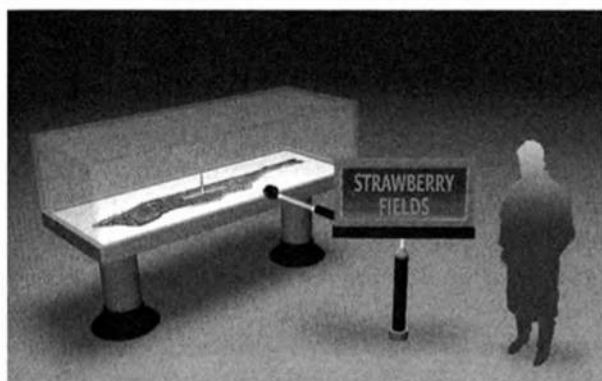
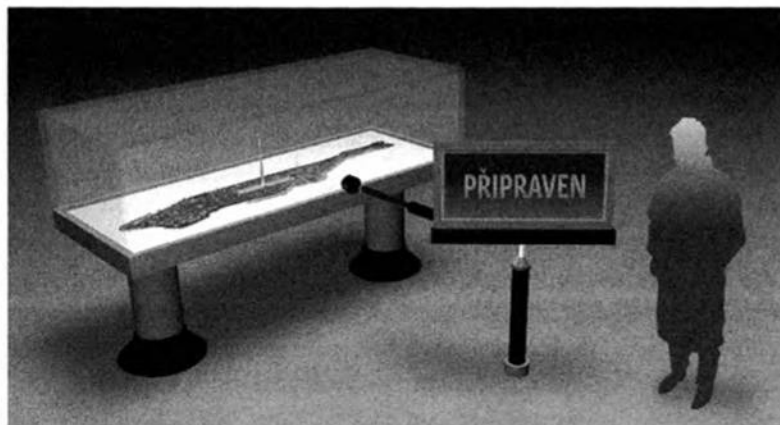
Everett vyvinul matematický argument, jehož cílem bylo tuto neshodu napravit; mnozí další později jeho argument dále rozvinuli.⁹ Vtip je zkrátka

Matematický příběh



Schematické znázornění Schrödingerovou rovnicí řízeného vývoje kombinované pravděpodobnostní vlny pro všechny částice, ze kterých jste složeni vy i měřicí přístroj, s nímž určujete polohu elektronu. Vlastní vlna elektronu se koncentruje na dvou místech, ale má na nich odlišnou výšku.

Fyzikální příběh



Jistí fyzici přišli s nápadem, že různě vysoké vlny na různých místech podle interpretace v řeči mnoha světů znamenají, že některé z těchto světů jsou méně opravdové nebo méně důležité než jiné. Zda tento výrok dává smysl, a pokud ano, tak jaký, zůstává spornou otázkou.

v tom, že při výpočtu pravděpodobnosti jednoho nebo druhého výsledku bychom měli přisuzovat stále menší váhu vesmírům, jež odpovídají stále menší výšce vlny, jak znázorňují obrázky na stranách 220 a 221. To je však matoucí pravidlo. A je to i pochopitelný zdroj rozporů. Je snad vesmír, ve kterém se elektron ocitne na Strawberry Fields, jaksí stokrát skutečnější, stokrát pravděpodobnější nebo stokrát důležitější než vesmír, v němž elektron sedí na Grantově hrobce? Takové vysvětlení by jistě bylo v ideovém rozporu s vírou, že každý svět by měl být stejně reálný jako všechny ostatní.

I po více než padesáti letech, v nichž se uznávání vědci vraceli k Everetto-
vým argumentům, revidovali je a rozšiřovali, souhlasí mnozí s tím, že ne-
srovnalosti zatím vyřešeny nebyly. A přece stále láká představa, že matematic-
ky jednoduchá, od zbytečností oprostěná a zcela revoluční interpretace v řeči
mnoha světů vytváří pravděpodobnostní předpovědi, od nichž se odvíjí víra
v kvantovou teorii. To motivovalo další fyziky, aby zkusili zkombinovat mno-
ho světů a pravděpodobnost i jinými způsoby, než je uvažování podobné to-
mu zaxtarskému.¹⁰

Jeden význačný návrh pochází od elitní skupiny badatelů z Oxfordu; patří
do ní David Deutsch, Simon Saunders, David Wallace, Hilary Greaves a další.
Vypracovali důmyslnou strategii založenou na zdánlivě přízemní otázce. Jste-
li hazardní hráč a věříte-li Everettově interpretaci, na základě jaké optimální
strategie si vsadíte na výsledek kvantověmechanických experimentů? Jejich
odpověď, zdůvodnili ji i matematicky, zní, že byste si vsadili stejně jako Niels
Bohr. Když hovoří o maximalizaci zisku, mají tito vědci na mysli něco, co by
u Bohra vyvolalo nervozitu – uvažují o průměrném zisku mezi všemi obyva-
teli multivesmíru, kteří tvrdí, že jsou vámi. Přesto docházejí k závěru, že bys-
te se při sázení měli řídit stejnými pravděpodobnostmi, jaké vypočítal Bohr
i všichni jeho následovníci. Tedy i když je kvantová teorie plně deterministic-
ká, měli byste s těmito čísly zacházet, *jako by* to byly pravděpodobnosti.

Řada vědců je přesvědčena, že tímto je Everettův program završen. Jiní
s tím nesouhlasí.

Chybějící shoda ohledně zásadní otázky, jak zacházet s pravděpodobnost-
mi v interpretaci v řeči mnoha světů, by pro nás neměla být úplným překva-
pením. Potřebné rozbory jsou vysoce odborného rázu a pracují s pojmem –
s pravděpodobností – notoricky záludným dokonce i v těch situacích, v nichž
nejde o kvantovou teorii. Hodíte-li kostkou, všichni se jistě shodneme na tom,
že máte naději 1 ku 6, že vám padne trojka, a proto bychom samozřejmě před-
pověděli, že z 1 200 hodů padne trojka 200krát. Je-li však možné a fakticky
i pravděpodobné, že se počet trojek odchýlí od čísla 200, co potom ta před-
pověď vlastně znamená? Máme chuť říct, že je velmi pravděpodobné, že 1/6
výsledků budou trojky, ale když to řekneme, potom jsme k definování prav-
děpodobnosti toho, že padne trojka, potřebovali pojem pravděpodobnosti.
Místo skutečné definice máme jen definici kruhem. To je jen drobný příklad
toho, že tato témata nejsou jen matematicky složitá, ale i koncepčně vratká.
Přidejte do této směsi problémů složitost slůvka „vy“, které v případě mno-
ha světů neoznačuje jedinou bytost, a pak se nedivte, že se badatelé snadno
dostanou do sváru ohledně mnoha bodů. Nepochybuji příliš o tom, že jed-
noho dne se všechny podobné otázky zcela vyjasní. Nebude to ovšem dnes
a pravděpodobně ani v blízké budoucnosti.

Předpovědi a pochopení světa

Přes všechny tyto spory zůstává kvantová mechanika samotná nejúspěšnější teorií v dějinách lidských myšlenek. To proto, že – jak jsme viděli – pro široké spektrum experimentů, které můžeme uskutečnit v laboratoři, i pro mnohá prováděná pozorování astrofyzikálních procesů funguje dobře známý „kvantový algoritmus“, který poskytuje ověřitelné předpovědi. Použijte Schrödingerovu rovnici k výpočtu evoluce odpovídajících pravděpodobnostních vln a interpretnujte výsledky – různé výšky vlny – jako předpověděné pravděpodobnosti jednoho nebo druhého výsledku. Jsou-li předpovědi přesné, příčina fungování tohoto algoritmu – zda vlna při měření kolabuje, zda jsou různé možnosti realizovány ve svých vlastních vesmírech nebo zda dochází k nějakému jinému procesu – není tak důležitá.

Někteří fyzici zdůrazňují, že dokonce i přívlasek „druhotná“ přisuzuje této otázce větší význam, než si zaslouží. Podle nich je úkolem fyziky *pouze* vytváření předpovědí, a když různé interpretace tyto předpovědi neovlivní, není důvod starat se o to, která z nich je v konečném důsledku správná. S tímto pohledem nesouhlasím a pokusím se oponovat třemi argumenty.

Zaprvé, od fyzikálních teorií neočekáváme jenom předpovědi, očekáváme od nich i vnitřní matematickou konzistenci. Kodaňská interpretace, výsledek hrdinského úsilí, tomuto standardu nevyhovuje: v životně důležitém okamžiku měření ztratí matematickou řeč. To je podstatný nedostatek. Interpretace v řeči mnoha světů je pokusem ho napravit.¹¹

Zadruhé, existují situace, v nichž Everettova interpretace *předpovídá* jiné výsledky než ta kodaňská. Podle kodaňské školy by proces kolapsu upravil obrázek ze strany 208 tak, že by zbyl pouze jeden vrchol. Kdyby se vám tedy podařilo donutit obě vlny z obrázku – označující makroskopicky odlišné situace – vzájemně interferovat a vytvořit obrazec podobný tomu na obrázku *c* na straně 184, prokázalo by se, že žádný hypotetický kolaps vlny podle kodaňské školy nenastal. Kvůli dekoherenci, o níž jsem se už zmínil, je realizace takového testu mimořádně obtížná, ale přinejmenším v principu vyplývají z obou přístupů odlišné výpovědi.¹² Je to důležitá koncepční otázka. Kodaňský a Everettův přístup se většinou považují za dvě „interpretace“ kvantové mechaniky. Takové pojmenování je nevhodné. Mohou-li dva přístupy vytvářet odlišné předpovědi, potom je nemůžeme považovat za pouhé dvě interpretace. Přesněji řečeno můžeme. Lidé to dělají. Ale takové názvosloví je neobyčejně zavádějící.

Zatřetí, fyzika není pouze vytváření předpovědí. Kdybychom jednoho dne našli černou skříňku, která by vždy a přesně předpověděla výsledek našich experimentů v částicové fyzice i naše astronomická pozorování, existence takové skříňky by výzkum v těchto vědních disciplínách neukončila. Existuje rozdíl mezi *vytvářením* předpovědí a *porozuměním* těmto předpovědím. Krása fyziky a vlastně i důvod její existence je v tom, že nabízí poznatky o tom, *proč*

se vše ve vesmíru chová tak, jak se chová. Schopnost předpovědět chování objektu se významně podílí na velké vnitřní síle fyziky, ale fyzika by přišla o srdce, kdyby nám nenabídla hluboké porozumění realitě, která se skrývá za našimi pozorováními. A kdyby se jednou správnost interpretace v řeči mnoha světů prokázala, potom bychom věděli, že naše neutuchající snaha předpovědi pochopit odkryla skutečně pompézní aspekt reality.

Nepředpokládám, že by k teoretické nebo experimentální shodě ohledně toho, kterou verzi reality – jeden vesmír, multivesmír, nebo něco úplně jiného – ztělesňuje kvantová mechanika, došlo za mého života. Ale nepochybuji příliš o tom, že až se budoucí pokolení budou ohlížet zpět, budou náš výzkum ve 20. a 21. století vnímat jako úctyhodné první kroky na cestě za konečným vysvětlením, které bude jednou nalezeno.

Kapitola devátá

Černé díry a hologramy

Holografický multivesmír

Platon přirovnával náš pohled na svět k pohledu vzdáleného předka, který v šeru sledoval stíny mihotající se na nepřítliš osvětlené stěně jeskyně. Představoval si, že naše vjemy jsou pouhými nejasnými odrazy daleko bohatší reality, která probleskuje z nedosažitelných končin. O dvě tisíciletí později se zdá, že Platonova jeskyně může být více než jen metaforou. Ve skutečnosti může být pravdivý pravý opak myslitelovy domněnky, protože realita – a nejen její stín – se může odehrávat na vzdáleném povrchu vesmíru, zatímco všechno to, co prožíváme ve třech obvyklých prostorových rozměrech, je jen projekcí těchto vzdálených událostí. Jinými slovy, realita se může podobat hologramu. Přesněji řečeno – holografickému filmu.

Pravděpodobně nejpodivnější člen naší rodinky teorií paralelních světů, *holografický princip*, předpokládá, že všechno, co prožíváme, lze stejně dobře a zcela popsat jako události, jež se odehrávají na tenké a vzdálené ploše. Princip říká, že kdybychom mohli pochopit fyzikální zákony ovládající tento vzdálený povrch a kdybychom znali slovník, s nímž lze tyto vzdálené události přeložit do řeči zkušeností, které zažíváme zde, potom bychom mohli zjistit o realitě úplně všechno. Varianta Platonova světa stínů – paralelní, ale zcela neobvyklé zapouzdření každodenních jevů – *by byla* realitou.

Při cestě za touto nezvyklou možností budeme muset dát dohromady poznatky hluboké i abstraktní – partie obecné relativity, výzkum černých děr, části termodynamiky, kvantovou mechaniku a nejnovější výsledky strunové teorie. Rysem, který tyto rozmanité disciplíny spojuje, je otázka povahy informace v kvantovém vesmíru.

Informace

John Wheeler vynikal nejen dovedností vybrat si nejnadanější studenty (kromě Hughha Everetta mezi nimi byli i Richard Feynman, Kip Thorne a Jacob Bekenstein, o němž si brzy povíme víc), ale i téměř nadpřirozenou schopností identifikovat témata, jejichž výzkum skrývá potenciál změnit naše nejhlubší paradigma ohledně fungování přírody. Když jsem s ním někdy v roce 1998

obědval v Princetonu, zeptal jsem se ho, co bude podle něho ve fyzice dominantním tématem v následujících desetiletích. Hlava mu trochu poklesla, jak se mu tehdy už stávalo, protože jeho stárnoucí kostra a svalstvo projevovaly únavu z toho, že musely dlouhá léta podepírat jeho obrovský intelekt. Ta dlouhá odmlka ve mně na okamžik vyvolala podezření, že buď odpovédět nechce, nebo že snad na otázku zapomněl. Potom však pomalu zvedl hlavu a vyřkl jediné slovo: „Informace.“

Nepřekvapilo mě to. Už nějakou dobu obhajoval na fyzikální zákony takový pohled, který se liší od pohledu vštěpovaného studijními osnovami do hlav fyzikálních nováčků. Fyzika se tradičně soustřeďuje na *objekty* – planety, kameny, atomy, částice, pole – a zkoumá síly, které ovlivňují jejich chování a ovládají jejich interakce. Wheeler hlásal, že *objekty* – hmota a záření – by se měly považovat jen za druhotné nosiče něčeho abstraktnějšího a podstatnějšího: informace. Ne že by tvrdil, že hmota a záření jsou jen jakousi iluzí; spíše by podle něho měly být interpretovány jako materiální projevy něčeho základnějšího. Věřil, že informace – kde částice je, zda rotuje v jednom směru, nebo v směru opačném, zda je její náboj kladný, nebo záporný a tak dále – je tím nedělitelným jádrem v srdci reality. To, že takovou informaci lze doložit na příkladu částic, které zaujímají reálné polohy a mají konkrétní spin a náboje, lze připodobnit situaci, kdy někdo architektovy kresby promění v mrakodrap. Tu fundamentální informaci však podávají nákrsky. Mrakodrap je pouhou fyzikální realizací informace obsažené v architektovcích náčrtcích.

Z tohoto pohledu lze vesmír považovat za informační procesor. Zadájí se mu vstupní údaje o tom, jak se věci mají teď, a on vypočítá informaci udávající, v jakém stavu budou ve chvíli následující i v té další. Naše smysly si běhu programu všimnou proto, že naše fyzikální prostředí se s časem mění. Toto fyzikální prostředí samotné je však odvozené čili emergentní; vyvěrá ze základnější ingredience, z informace, a vyvíjí se podle jistých prvotních pravidel, fyzikálních zákonů.

Nejsem si jistý, zda přístup založený na teorii informace dosáhne ve fyzice takové dominance, jak Wheeler předvídal. V nedávné době však nastal, zejména zásluhou fyziků Gerarda 't Hoofta a Leonarda Susskinda, důležitý průlom, k němuž fyziky zavedly matoucí otázky týkající se informace v jednom obzvláště exotickém druhu objektů: v černých dírách.

Černé díry

Méně než rok po publikaci obecné teorie relativity našel německý astronom Karl Schwarzschild první přesné řešení Einsteinových rovnic, které určilo tvar prostoru a času v okolí masivního kulového objektu, jako je hvězda nebo planeta. Je pozoruhodné, že Schwarzschild to nejen dokázal v době první světové války na ruské frontě, kde počítal trajektorie německých dělo-

vých koulí, ale navíc pokořil objevitele celé disciplíny: Einstein se do té doby zmožil jen na přibližné řešení rovnic obecné relativity. Ohromený Einstein Schwarzschildův husarský kousek propagoval a představil jej pak před Pruskou akademií věd, ale ani on plně nedocenil detail, z něhož se později stal nejprovokativnější Schwarzschildův příspěvek vědě.

Schwarzschildovo řešení ukazuje, že dobře známá tělesa jako Slunce nebo Země mírně zakřivují časoprostorovou trampolínu, která by jinak zůstala plochá. V tom se shoduje s přibližnými výsledky, které Einstein našel o něco dříve, ale protože se Schwarzschild zbavil aproximací, mohl pokročit. Jeho přesné řešení ukázalo něco záračejícího: když se do malé koule napěchuje dostatek hmoty, vznikne tak bezedná gravitační propast. Zakřivení časoprostoru začne být natolik extrémní, že libovolný předmět, který se dostane do jeho blízkosti, bude zachycen. A protože tím „předmětem“ může být i světlo, budou takové oblasti prostoru černé, což inspirovalo vědce k původnímu označení „temné hvězdy“. Extrémní pokřivení také způsobí, že čas se na hranici objektu zcela zastaví; proto vědci pro takové objekty vymysleli i název „zamrzlé hvězdy“. O půl století později popularizoval Wheeler, téměř stejně obratný v marketingu jako ve fyzice, takové hvězdy ve vědecké komunitě i mimo ni tím, že jim dal nový a zapamatovatelnější název: černé díry. A ten se uchytil.

Když Schwarzschildův článek četl Einstein, souhlasil s ním ohledně případů, kdy je matematika aplikována na obyčejné hvězdy či planety. Ale co když jde o objekty dnes známé jako černé díry? Einstein se jen ušklíbl. V raných údobích obecné relativity bylo obtížné, dokonce i pro něj, zcela proniknout skrze zamotanou matematiku obecné relativity. Na moderní pochopení černých děr si svět tehdy musel ještě desítky let počkat, a tak mohl Einstein považovat intenzivní zkroucení prostoru a času vyplývající z rovnic za příliš radikální, než aby bylo považováno za skutečné. Podobně jako o několik let později, kdy odmítl uvěřit rozpínání vesmíru, vzepřel se i představě takového uspořádání hmoty, které považoval za příklad matematických manipulací – s jeho vlastními rovnicemi –, které se vymkly kontrole.¹

Seznámíte-li se s dotýcnými čísly, snadno dospějete k podobnému závěru. Hvězda o podobné hmotnosti jako Slunce by se musela stlačit do koule o průměru asi 5 kilometrů; těleso stejně hmotné jako Země by se stalo černou dírou jen tehdy, kdyby bylo stlačeno do centimetrové velikosti. Představa, že by takové extrémní shluky hmoty mohly existovat, vypadá doslova absurdně. A přesto v následujících desítkách let astronomové svými pozorováními nashromáždili nepřímé důkazy o tom, že černé díry jsou nejen skutečné, ale i početné. Panuje téměř dokonalá shoda v tom, že ve středu mnoha galaxií sedí ohromná černá díra; naše vlastní galaxie, Mléčná dráha, se okolo takové černé díry, jejíž hmotnost je asi třímilionkrát větší než hmotnost Slunce, otáčí. A nelze dokonce vyloučit ani to, co jsme uvedli ve 4. kapitole, že totiž Velký

hadronový srážec (LHC) vyrobí černé díry v laboratorních podmínkách: že nahustí hmotnosti (a energii) zuřivě se srážejících protonů do tak miniaturního objemu, že Schwarzschildovo řešení bude opět vystihovat situaci, byť půjde o mikroskopické vzdálenosti. Černé díry se tedy staly mimořádným symbolem schopnosti matematiky osvětlit nejen temné končiny vesmíru, ale i objekty, k nimž se upíná pozornost moderní fyziky.

Kromě toho, že černé díry přináší radost astronomům, kteří je mohou hledat, jsou i štědrým zdrojem inspirace teoretického výzkumu. Fyzikům poskytují matematické pískoviště, na němž mohou s pomocí tužky a papíru zkoumat, jak daleko lze navržené myšlenky extrapolovat a zda se mohou pořádat i s jedněmi z nejextrémnějších podmínek v přírodě. Důležitým příkladem takových her bylo i pozorování Johna Wheelerera, který si na začátku sedmdesátých let všiml, že posvátný druhý termodynamický zákon – zákon, který byl pro fyziku více než jedno století důležitým vodítkem při všech úvahách o souvislostech mezi energií, prací a teplem – v blízkosti černé díry zdánlivě přestává platit. Svěží myšlenky Wheelerova mladého postgraduálního studenta Jacoba Bekensteina ovšem tento pilíř termodynamiky zachránily a staly se základem holografického principu.

Druhý zákon

Aforismus o tom, že „méně je někdy více“, se objevuje v mnoha situacích. „Ten toho ale napovídá.“ „Připravte si shrnutí pro ředitele.“ „Prosím stručně.“ „To neřeš.“ Podobné výroky jsou časté proto, že v každém okamžiku a každý den nás zahlcují informace. Naše smysly díkybohu podrobnosti pominou a uchovají jen ty podstatné údaje. Když v savaně potkám lva, nestarám se o polohu každého fotonu, který se odrazil od jeho těla. Očividně by to bylo příliš mnoho informací. Chci jen znát několik konkrétních vlastností množiny všech těchto fotonů jako celku, konkrétně ty, k jejichž sledování se vyvinuly naše oči a k jejichž dekódování se vyvinul náš mozek. Běží lev ke mně? Je přikrčený? Lepí se mi na paty? Samozřejmě že když mě obdarujete přehledem všech fotonů, jak se postupně od lva odrážely, budu mít k dispozici veškeré podrobné údaje. Nepochopím však to, na čem záleží. Méně by skutečně bylo o dost více.

Podobné úvahy hrají klíčovou roli v teoretické fyzice. Někdy chceme znát každý mikroskopický detail systému, který studujeme. Na několika místech podél sedmadvacetikilometrového obvodu Velkého hadronového srážec (LHC), kde se částice navádějí k čelním srážkám, umístili fyzici mamutí detektory schopné extrémně přesně vysлідit pohyb každé jednotlivé částice, která se v místě kolize odštěpí nebo zrodí. Údaje o tomto pohybu jsou pro získání nových poznatků o fundamentálních zákonech částicové fyziky tak podstatné, že je fyzici musejí měřit velmi detailně. Data získaná za rok se

dají vypálit na DVD nosiče, z nichž můžete postavit věž o výšce třisetnásobku výšky Petřínské rozhledny. Kromě občasných improvizovaných setkání se lvem existují i častější situace, v nichž se fyzik musí zbavit detailů, protože by důležité poznatky spíše zamlžily než osvětlily. Na některé z nich se soustřeďuje fyzikální obor zvaný *termodynamika*, který vzkvétal zejména v 19. století, i jeho modernější ztělesnění, *statistická mechanika*. Parní stroj, vynález techniky, díky němuž se termodynamika – a také průmyslová revoluce – rozvíjela na počátku, představuje dobrý příklad termodynamických úvah v praxi.

Srdcem parního stroje je nádrž s vodní párou, která se rozpíná, je-li zahřívána, a tak tlačí píst stroje směrem dopředu, a smršťuje se, je-li ochlazována, čímž vrací píst do původní polohy, aby ho připravila na další cestu vpřed. Na přelomu 19. a 20. století pochopili fyzici molekulární strukturu hmoty a to jim kromě jiného umožnilo osvětlit i chování páry v řeči atomů. Když ji zahříváme, její molekuly H_2O zrychlí svůj pohyb a naženou se ke spodní straně pístu. Čím je pára teplejší, tím jsou molekuly rychlejší a tím silněji na píst tlačí. Jednoduchým poznatkem, ovšem podstatným pro celou termodynamiku, je, že k pochopení tlaku páry nepotřebujeme znát detailní polohy, rychlosti a směry pohybu jednotlivých molekul v blízkosti pístu. Když mě zavalíte seznamem miliard a miliard trajektorií molekul, dočkáte se ode mě stejně rozpačitého pohledu, jako kdybyste mi předložili seznam fotonů odražených od lva. Abych spočítal tlak na píst, potřebuji znát jen průměrný počet molekul, které se od něj odrazí za jednotku času, a průměrnou rychlost, jíž se pohybují. To jsou data mnohem hrubší, ale právě takto zeštíhlené informace jsou nejužitečnější.

Když fyzici vynalézali matematické metody, jak systematicky odfiltrovat detaily a jak extrahovat podobná úhrnná data a předpovědi na vyšší úrovni, zdokonalili širokou paletu postupů a definovali řadu velmi užitečných pojmů. Jedním z nich je *entropie*, pojem, s nímž jsme se v předchozích kapitolách už setkali. Původně byla zavedena v polovině 19. století ve snaze vyčíslit ztrátu energie ve spalovacích motorech. Ale modernější pohled, odvozený od výzkumu Ludwiga Boltzmannova v sedmdesátých letech 19. století, ji považuje za vyčíslení toho, jak jemně je – nebo není – třeba uspořádat ingredience v dané fyzikální soustavě, aby se v celkovém pohledu jevila tak, jak se jeví.

Patrně to zní nesrozumitelně, a tak si představte Felixe, který propadl hysterii, protože si myslí, že do bytu, v němž bydlí s Oskarem, se někdo vloupal. „Vykradli nás!“ oznámí Oskarovi. Oskar ho odbude – i Felix má očividně své dny, myslí si. Aby svou skepsi doložil, vykopne Oskar dveře do své ložnice a ukáže podlahu posetou oblečením, prázdnými krabicemi od pizzy a sešlápnutými plechovkami od piva. „Všechno vypadá přesně jako včera,“ řekne. Felixovu jistotu ale nenahodá. „Samozřejmě že to vypadá stejně – vyrabuj chlívěk, a zbude z něho zase jen chlívěk. Ale podívej se do mého pokoje.“

A otevře vlastní dveře. „Vypleněná ložnice,“ vysmívá se Oskar. „Je to tu uklizenější než šestkrát destilovaná vodka.“ „Uklizené to je, ale vetřelci zanechali důkazy o svém působení. Moje lahvičky s vitamíny? Nejsou seřazené podle velikosti. A Shakespearova díla? Nejsou abecedně seřazená. A co moje zásuvky s ponožkami? Podívej se sem – několik černých párů je v modré přihrádce. Jistojistě to tu pročešali.“

Ponecháme-li Felixovu nepřičetnost stranou, ilustruje tento příběh jednu prostou, ale podstatnou věc. Když je něco velmi neuspořádané, jako například Oskarův pokoj, potom lze jednotlivé složky přeházet mnoha způsoby, ale celkový dojem zůstane nedotčený. Uchopte 26 zmačkaných triček, rozptýlených po posteli, na podlaze a v šatníku, a náhodně je rozházejte, a halabala přeházejte 42 sešlápnutých plechovek sem a tam – místnost bude vypadat pořád stejně. Je-li však něco vysoce uspořádané, jako Felixův pokoj, lze odhalit dokonce i malé úpravy.

Na tomto rozdílu je založena Boltzmannova matematická definice entropie. Vezměte libovolný systém a spočítejte množství způsobů, jimiž lze jeho součásti přeuspořádat, aniž by byla dotčena jeho celková, hrubá, makroskopická podoba. Výsledný počet se nazývá entropií systému.* Když je takových přeuspořádání mnoho, entropie je vysoká: takový systém je velmi neuspořádaný. Je-li takových přeuspořádání málo, jde o entropii nízkou: systém je vysoce uspořádaný (jinak řečeno – má nízkou míru neuspořádanosti).

Standardnějším příkladem je nádoba s párou a kostka ledu. Soustředte se na jejich celkové makroskopické vlastnosti – můžete je změřit nebo pozorovat, aniž byste zkoumali detailní stav molekulárních součástí obou těles. Když uvnitř nádoby s párou zamáváte rukou, promícháte polohy miliard a miliard molekul H_2O , a přesto bude stejnorodá mlha v nádobě vypadat stále stejně. Když však náhodně změňte polohy a rychlosti stejného počtu molekul v kostce ledu, okamžitě uvidíte následky – naruší se krystalická struktura ledu. Objeví se praskliny a štěrby. Pára, jejíž molekuly H_2O náhodně poletují zásobníkem, je velmi neuspořádaná, led, jehož molekuly H_2O jsou srovnány do pravidelné krystalické struktury, je vysoce uspořádaný. Entropie páry je vysoká (velký počet přeuspořádání ponechá její celkovou podobu beze změny), entropie ledu je nízká (jen malý počet přeuspořádání zachová celkové vlastnosti ledu).

Entropie je přirozeným pojmem v matematickém formalismu, který se zaměřuje na úhrnné fyzikální vlastnosti, protože dokáže ohodnotit citlivost makroskopické podoby systému na změny jeho mikroskopických podrobností. Druhý termodynamický zákon tyto myšlenky přepracoval do tvaru matematické nerovnosti. Podle tohoto zákona postupem času entropie každé fyzikální soustavy narůstá.² K pochopení toho, proč tomu tak je, postačí základní

* Tato přibližná definice bude zatím stačit; za chvíli ji zpřesníme.

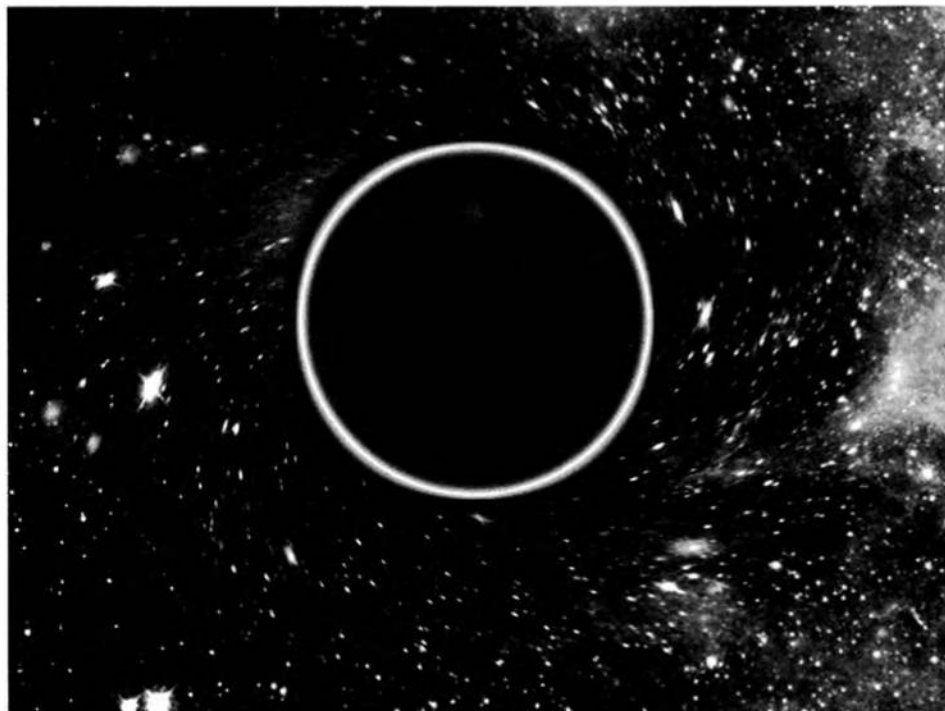
znalosti statistiky a pravděpodobnosti. Konfiguraci o vyšší entropii lze podle definice realizovat větším počtem uspořádání jejích mikroskopických součástí než konfiguraci o nižší entropii. Jak se systém vyvíjí, je mnohem pravděpodobnější, že se dostane do stavů o vyšší entropii, a při troše zjednodušení je to prostě proto, že takových stavů je více. *Mnohem* více. Když se peče chléb, line se jeho vůně po budově proto, že množství způsobů, jimiž se molekuly unikající z pece mohou rozptýlit po budově do rovnoměrného aroma, je více než trilionkrát větší než počet způsobů, jak je všechny nahustit do těsné blízkosti pece v rohu kuchyně. Horké molekuly svými náhodnými pohyby s téměř naprostou jistotou dospějí do jednoho z početných homogenních rozptýlených uspořádání, a nikoli do jednoho z mnohem méně početných shluků. Množina molekul se tedy vyvíjí od stavu o nižší entropii ke stavu s entropií vyšší. Tak vypadá druhý zákon v akci.

Jde o myšlenku zcela obecnou. Rozbíjení skla, pálení svíčky, roztékání inkoustu, rozptýl parfému: byť jde o různé procesy, platí pro ně stejné statistické úvahy. V každém z těchto příkladů se zvrhne pořádek v nepořádek, a to proto, že existuje mnoho způsobů, jak mohou ingredience být v nepořádku. Krása této analýzy – tento poznatek ve mně vyvolal jedno z nejprocitěnějších zvolání „Aha!“ za celá má studia fyziky – spočívá v tom, že aniž bychom se ztratili v mikroskopických detailech, máme k dispozici princip, s nímž můžeme vysvětlit, proč se široká paleta jevů odvíjí jistým způsobem.

Také si povšimněte, že jelikož je druhý zákon statistického rázu, neříká nic o tom, že by entropie *nemohla* poklesnout, sděluje pouze, že je to velmi nepravděpodobné. Molekuly mléka, které jste přilili do kávy, se třeba v důsledku svého náhodného pohybu mohou spojit do plovoucí postavičky Mikuláše. Ale příliš s tím nepočítejte. Plovoucí mléčný Mikuláš má velmi nízkou entropii. Když s několika biliony molekul zatřepete, výsledek nebude možné přehlédnout – Mikuláš přijde o hlavu nebo o ruku, pokud se ovšem nerozstříkne do abstraktních mléčných provázků. Molekuly mléka rovnoměrně rozptýlené v šálku mají ve srovnání s Mikulášem mnohem vyšší entropii: velké množství přeuspořádání nezmění nic na tom, že molekuly stále vypadají jako obyčejná káva s mlékem. Je tedy nadmíru pravděpodobné, že se mléko nalité do vaší černé kávy promění v rovnoměrnou hněď a že Mikuláše ani na okamžik nevidíte. Podobné úvahy platí pro velkou většinu objektů – vyvíjejí se od nízké entropie k vysoké. Proto se druhý zákon zdá nedotknutelný.

Druhý zákon a černé díry

Dostáváme se k Wheelerovi a černým dírám. Na začátku sedmdesátých let si uvědomil, že jakmile na jeviště vstoupily černé díry, druhý zákon byl zdánlivě porušen. Černá díra umístěná v blízkosti kontejnerů na odpad vypadá jako



Černá díra obsahuje oblast časoprostoru, která je ohraničena povrchem, z něhož není návratu – horizontem událostí.

hotový a spolehlivý prostředek, s nímž lze snížit celkovou entropii. Hoďte do ní cokoli, co studujete: střepy skla, spálené svíčky, rozlitý inkoust. Poněvadž z černé díry nemůže nic uniknout, nepořádek skrývající se ve zmizelých objektech jako by byl zcela tentam. Máte-li k dispozici černou díru, zdá se velmi snadné snížit celkovou entropii, byť vám takový způsob může připadat surový. Mnozí usoudili, že druhý zákon nalezl svého přemohitele.

Wheelerova studenta Bekensteina to ale nepřesvědčilo. Usoudil, že entropie se v černé díře neztratila, pouze se do ní přemístila. Koneckonců nikoho nenapadlo tvrdit, že je narušen první termodynamický zákon, tedy zákon zachování energie, jen proto, že černé díry hladově „požírají“ okolní prach a hvězdy. Einsteinovy rovnice místo toho ukazují, že černá díra tak roste a tloustne. Energie v určité oblasti se může přerozdělit, část může do černé díry spadnout a jiná třeba zůstane venku, ale její celková velikost se nemění. Bekenstein tvrdil, že stejná logika může platit i u entropie. Část entropie může zůstat venku a část zase zapadnout do černé díry, přesto se žádná entropie neztratí.

To zní rozumně, ale experti Bekensteinovo tvrzení okamžitě rozcupovali. Schwarzschildovo řešení, jakož i řada prací, které je zobecnily, podle všeho

ukazuje, že černé díry jsou ztělesněním pořádku. Hmota i záření vlétající do černé díry jsou, nehledě na jejich chaos, nečistotu a nepořádek, rozdrčené do nekonečně malé velikosti ve středu černé díry: černá díra se tak stává nepřekonatelným lisem na odpad. Nikdo sice přesně neví, co se při takovém extrémním stlačování děje, protože obrovské zakřivení a hustota energie narušují Einsteinovy rovnice, zdá se však, že střed černé díry nemá žádnou schopnost nepořádek skladovat. A mimo oblast středu není černá díra ničím více než prázdnou oblastí časoprostoru, která se rozprostírá až k hranici, odkud není návratu – k horizontu událostí (jako na obrázku na straně 232). Protože neobsahuje žádné atomy ani molekuly, které by se mohly vznášet jedním nebo druhým směrem nebo si vyměňovat místa navzájem, vypadá jako objekt bez jakékoli entropie.

V sedmdesátých letech byl tento závěr podepřen takzvanými *teorémy o plešatosti černé díry* (černá díra nemá vlasy), anglicky *no-hair theorems*, které matematicky ustanovily, že černé díry, podobně jako členové skupiny Blue Man Group se vzhledem Fantomase, postrádají vlastnosti, jimiž by se odlišovaly od ostatních. Podle těchto teorémů platí, že dvě černé díry se stejnou hmotností, nábojem a momentem hybnosti (rychlostí rotace kolem osy) jsou *to-žné*. Protože navíc postrádají i další charakteristické znaky – podobně jako členové Blue Man Group nenosí ofinu, účes mullet jako Jaromír Jágr v devadesátých letech ani zčuchané dredy jako Bob Marley –, podle všeho nemají žádné odlišnosti, v nichž by se mohla skrývat entropie.

To byl sám o sobě dost přesvědčivý argument, ale existoval argument ještě průkaznější a ten zdánlivě zatloukl poslední hřebíky do rakve Bekensteinova nápadu. Podle základní termodynamiky totiž existuje těsný vztah mezi entropií a teplotou. Teplota je mírou průměrného pohybu součástí objektu: horké objekty mají součástky pohybující se rychle, studené objekty zase součástky pohybující se pomalu. Entropie číselně udává množství přeuspořádání těchto základních stavebních kamenů, které by z makroskopického pohledu proběhly bez povšimnutí. Jak entropie, tak teplota proto závisejí na úhrnných vlastnostech součástí objektu a nárůst jedné je obvykle doprovázen nárůstem té druhé. Když tento vztah rozebereme matematicky, vyjasní se, že kdyby měl Bekenstein pravdu a černé díry měly entropii, musely by také mít teplotu.³ Tento závěr spustil poplašné sirény. Jakýkoli objekt s nenulovou teplotou totiž vyzařuje. Horké uhlí vyzařuje viditelné světlo, my lidé obvykle vyzařujeme infračervené paprsky. Kdyby měla černá díra nenulovou teplotu, musela by podle termodynamických zákonů, o jejichž obhajobu Bekenstein usiloval, vyzařovat. Ale to nestydatě protirečí dobře známému faktu, že z gravitačního sevření černé díry nemůže uniknout zhola nic. V podstatě všichni se shodli, že se Bekenstein mýlí. Černé díry nemají teplotu. Černé díry nejsou zásobárnou entropie. Černé díry jsou požíračky entropie. V jejich přítomnosti přece druhý zákon přestává platit.

Navzdory důkazům, které se proti jeho tvrzení hromadily, měl Bekenstein na své straně jeden provokující poznatek. V roce 1971 si Stephen Hawking uvědomil, že se černé díry řídí jedním zvláštním zákonem. Zkoumáte-li skupinku černých děr s různými hmotnostmi a velikostmi, z nichž některé kolem sebe poslušně obíhají v rytmu polky, další hltají okolní hmotu a záření a ještě další se spolu navzájem srážejí, potom *úhrrnný povrch černých děr s časem roste*. „Povrchem“ Hawking mínil plochu horizontu událostí každé černé díry. Ve fyzice sice existuje řada zákonů zajišťujících, že se veličiny s časem nemění (zachování energie, zachování náboje, zachování hybnosti a tak dále), ale jen velmi malý počet zákonů předepisuje veličinám, aby rostly. Bylo proto přirozené si představit, že mezi Hawkingovým výsledkem a druhým zákonem existuje nějaký vztah. Předpokládáme-li, že povrch černé díry je mírou entropie, kterou díra obsahuje, potom není nárůst celkového povrchu ničím jiným než nárůstem celkové entropie.

Analogie to byla lákavá, ale nikoho nenalákala. Podobnost mezi Hawkingovým zákonem o ploše a druhým zákonem byla v očích téměř všech fyziků pouhou shodou okolností. Bylo tomu tak několik let – dokud Hawking nedokončil jeden z nejvýznamnějších výpočtů v moderní teoretické fyzice.

Hawkingovo záření

Protože kvantová mechanika nehraje v Einsteinově obecné teorii relativity roli, Schwarzschildovo řešení popisující černou díru je založeno čistě na klasické fyzice. Jenže správné zacházení s hmotou a zářením – s částicemi, jako jsou fotony, neutrina a elektrony, které přenášejí hmotnost, energii a entropii z jednoho místa na druhé – vyžaduje mechaniku kvantovou. Abychom důkladně posoudili povahu černých děr a pochopili, jak interagují s hmotou a zářením, musíme poněkud aktualizovat Schwarzschildovu práci a zahrnout kvantové úvahy. To není nic snadného. Nehledě na pokrok ve strunové teorii (a v dalších částech výzkumu, jako je smyčková kvantová gravitace, twistory a geometrická teorie kategorií a toposů, o nichž jsme nemluvili) jsme v úsilí o skloubení kvantové fyziky a obecné relativity stále na začátku. V sedmdesátých letech byly základy výzkumu kvantověmechanických jevů ovlivňujících gravitaci ještě méně stabilní.

Přesto už tehdy skupina badatelů kvantovou mechaniku a obecnou relativitu částečně skloubila. Uvažovali o kvantových polích (to je ta kvantová část) vyvíjejících se v pevném, ale zakřiveném časoprostorovém prostředí (to je ta obecněrelativistická část). Jak jsem zdůraznil ve 4. kapitole, plnohodnotné spojení obou teorií by muselo přinejmenším započítat nejen oscilace kvantových polí obývajících časoprostor, ale i oscilace časoprostoru samotného. Kvůli usnadnění pokroku byla tato komplikace v prvních letech výzkumu systematicky zanedbávána. Hawking se na toto částečné sjednocení zaměřil

a zkoumal, jak by se kvantová pole chovala na velmi konkrétním časoprostorovém jevišti: na tom, které ve svém srdci skrývá černou díru. To, co zjistil, vyrazilo jeho kolegům dech.

Dobře známým rysem kvantových polí v obyčejném, prázdném, nezakřiveném časoprostoru je, že jejich chvění může vyvolat vznik párů částic, například elektronu a jeho antičástice pozitronu, které se na okamžik zrodí z nicoty, prožijí jepičí život a potom se srazí a anihilují. Tento proces, *kvantová produkce párů*, byl intenzivně studován jak teoreticky, tak i experimentálně a fyzici mu dokonale rozumějí.

Na kvantové produkci párů je neobvyklé to, že zatímco jeden člen páru nese energii kladnou, druhý kvůli zákonu zachování energie stejně velkou energii *zápornou* – takový pojem by v klasickém vesmíru byl nesmyslný.* Princip neurčitosti toleruje mírnou dávku šílenosti, a tak částice se zápornou energií mohou existovat, pokud se ovšem nezabydlí na delší dobu a nestanou se nevítanými hosty. Žije-li částice jen krátkou dobu, kvantová neurčitost zaručí, že žádný experiment nebude ani v principu schopný naměřit špatné znaménko, protože k tomu nebude mít dost času. Proto je také pár částic podle kvantových zákonů odsouzen k bleskové anihilaci. Kvantové oscilace tedy opakovaně kvantové páry vytvářejí a anihilují, vytvářejí a anihilují, pod taktovkou kvantové neurčitosti dirigují jinak prázdný prostor.

Hawking toto všudypřítomné chvění přepočítal nikoli pro prázdný prostor, ale pro podmínky v blízkosti horizontu událostí černé díry. Zjistil, že některé události vypadají jako předtím. Páry částic se náhodně vytvoří, potom se rychle střetnou a jsou zničeny. Občas se však přihodí něco zcela jiného. Vzniknou-li částice dostatečně blízko okraje černé díry, může se stát, že jednu z nich vcucne černá díra do sebe, zatímco její partnerka je odvanuta do vnějšího prostoru. V nepřítomnosti černé díry by se to nikdy nestalo, protože zakázaná částice se zápornou energií by tak překročila lhůtu, po níž jí život povoluje mlha kvantové neurčitosti. Hawking si uvědomil, že dramatické pokroucení prostoru a času může způsobit, že částice se zápornou energií, podle pozorovatelů nacházejících se vně černé díry, mohou zdánlivě nést *kladnou* energii z hlediska nešťastného pozorovatele uvnitř černé díry. Takto tedy černá díra poskytuje bezpečné útočiště částicím se zápornou energií, a ty se proto už nemusejí schovávat v kvantových vibracích. Vytvořené částice se tak mohou anihilaci vyhnout a pokračovat v cestě po svých vlastních oddělených trajektoriích.⁴

Částice o kladné energii jsou vystřeleny z blízkosti horizontu událostí černé díry ven, takže se vzdálenému pozorovateli jeví jako záření, jež dnes nese

* V 3. kapitole jsme mluvili o tom, že energie obsažená v gravitačním poli může být záporná; šlo ovšem o energii potenciální. Energie představovaná zde, kinetická energie, závisí na hmotnosti a pohybu elektronu. Podle zákonů klasické fyziky musí být kladná.

názvu jméno svého objevitele: *Hawkingovo záření*. Částice o záporné energii nelze přímo vidět, protože uvíznou v černé díře, ale mají jeden detekovatelný důsledek. Stejně jako hmotnost černé díry roste, pokud díra absorbuje cokoli s kladnou energií, tak tato hmotnost klesá, absorbuje-li černá díra cokoli s energií zápornou. Kombinace těchto dvou procesů dělá z černé díry něco jako žhnoucí uhel: černá díra vysílá trvalý proud záření a spolu s tím její hmotnost neustále klesá.⁵ Vezmeme-li tedy kvantové poznatky do úvahy, nejsou černé díry úplně černé. Hawkingův objev přišel jako blesk z čistého nebe.

Tím bych ale zase nechtěl říct, že průměrná černá díra je doruda rozpálená. Jak částice z blízkosti černé díry unikají, musejí svádět úporný boj se silnou gravitační přitažlivostí. Tím spotřebují energii a ochladí se. Hawking spočítal, že pozorovatel daleko od černé díry zjistí, že teplota výsledného „unaveného“ záření je nepřímo úměrná hmotnosti černé díry. Obří černá díra, jako ta ve středu naší galaxie, Mléčné dráhy, má teplotu rovnou ani ne biliontině stupně nad absolutní nulou. Černá díra s hmotností srovnatelnou se Sluncem by měla teplotu nižší, než je miliontina kelvinu, tedy teplotu nepatrnou i ve srovnání s 2,7 kelvinu reliktního záření, které po sobě zanechal velký třesk. Aby byla teplota černé díry dostatečně vysoká na rodinné nedělní grilování masa, musela by její hmotnost být asi desettisíckrát menší, než je hmotnost Země, tedy z astrofyzikálního hlediska hmotnost neobyčejně malá.

Velikost teploty černé díry je ovšem druhotná. Ačkoli záření přicházející ze vzdálených astrofyzikálních černých děr noční oblohu nerozzáří, fakt, že nějakou teplotu *mají* a že *emitují* záření, naznačuje, že experti Bekensteinův výrok o tom, že černé díry *mají* entropii, odmítli příliš ukvapeně. Hawking všechny jejich pochyby vyvrátil. Teoretické výpočty teploty určité černé díry a záření, které vysílá, mu poskytly všechny údaje, které potřeboval k určení množství entropie, již by černá díra měla podle standardních termodynamických zákonů obsahovat. A jím nalezená odpověď je úměrná povrchu černé díry – přesně taková, jak navrhl Bekenstein.

Na sklonku roku 1974 už tedy druhý zákon opět platil pro všechny. Bekensteinovy a Hawkingovy poznatky prokázaly, že celková entropie roste v libovolné situaci, pokud ovšem připočtete nejen entropii obyčejné hmoty a záření, ale i tu obsaženou v černých dírách a měřenou jejich povrchem. Místo aby byly černé díry požíračkami entropie, vysmívajícími se druhému zákonu, aktivně se na dodržování zákona o tom, že vesmír má stále vyšší míru nepořádku, podílejí.

Po tomto závěru si všichni oddechli. Pro celou řadu fyziků měl druhý zákon, vyvěrající ze zdánlivě nenapadnutelných statistických úvah, ze všech fyzikálních zákonů nejbližší k Božím přikázáním. Obnovení jeho platnosti znamenalo, že je se světem zase jednou všechno v pořádku. Netrvalo však dlouho, a jeden zásadní detail v entropickém účetnictví nenechal nikoho na

pochybách, že samotná účetní bilance druhého zákona není tím *nejhlubším* problémem. Tento přívlastek náleží úkolu určit, *kde je entropie uschována*. Důležitost této otázky vyjde najevo, když doceníme hlubokou souvislost mezi entropií a ústředním tématem této kapitoly: informací.

Entropie a skrytá informace

Zatím jsem entropii popisoval neformálně jako míru nepořádku a přesněji jako počet přeuspořádání mikroskopických součástí systému, která nezmění jeho celkové makroskopické vlastnosti. Jen mezi řádkami jsem se zmínil o něčem, co teď vyslovím naplno, totiž že entropie měří *informační schodek*, tedy rozdíl mezi údaji, které máte (celkové makroskopické vlastnosti), a těmi, které nemáte (konkrétní mikroskopické uspořádání systému). Entropie vyjadřuje, kolik dodatečné informace se skrývá v mikroskopických detailech systému, jejichž zjištění by vám umožnilo rozlišit toto mikroskopické uspořádání od všech zdánlivých makroskopických dvojnίκů.

Představte si Oskara, který si pokoj uklidil, tedy až na tisícovku po podlaže rozházených starých jednokorunových mincí, které vyhrál minulý týden v pokeru. I poté co je shrabe na úhlednou hromádku, pozoruje jen nahodilou množinu mincí; na některých vidí pannu, na jiných orla. Kdybyste některé mince převrátili a změnili pannu na orla nebo naopak, ani by si toho všimnout nemohl; to dokazuje, že systém s tisíci mincemi má vysokou entropii. Tento příklad je fakticky tak konkrétní, že entropii můžeme spočítat. Kdyby šlo jen o dvě mince, existovala by čtyři možná uspořádání: (panna, panna), (panna, orel), (orel, panna), (orel, orel), tedy dvě možnosti pro první minci krát dvě možnosti pro minci druhou. Se třemi mincemi by už šlo o osm uspořádání: (panna, panna, panna), (panna, panna, orel), (panna, orel, panna), (panna, orel, orel), (orel, panna, panna), (orel, panna, orel), (orel, orel, panna), (orel, orel, orel). Dvě možnosti pro první minci musíme násobit dvěma možnostmi pro druhou a dvěma možnostmi pro třetí minci. Při tisíci minci bychom mohli počet možností spočítat podle stejné šablony – každá mince by přidala činitel 2, takže by jich celkově bylo 2^{1000} neboli 10 715 086 071 862 673 209 484 250 490 600 018 105 614 048 117 055 336 074 437 503 883 703 510 511 249 361 224 931 983 788 156 958 581 275 946 729 175 531 468 251 871 452 856 923 140 435 984 577 574 698 574 803 934 567 774 824 230 985 421 074 605 062 371 141 877 954 182 153 046 474 983 581 941 267 398 767 559 165 543 946 077 062 914 571 196 477 686 542 167 660 429 831 652 624 386 837 205 668 069 376. Velká většina těchto uspořádání panen a orlů by se svými vlastnostmi nijak nelišila ani by nijak nevyčnívala. Některá by ale přece jen jiné vlastnosti *měla*: například kdyby všech 1 000 mincí ukazovalo pannu nebo všechny orla. Nebo kdyby alespoň 999 z nich ukazovalo pannu nebo 999 zase orla. Ale počet takovýchto neobvyklých uspořádání je mimořádně nízký ve srov-

nání s celkovým počtem možností, takže vyřadíme-li je z množiny možností, v podstatě se nezmění nic.*

Naše dřívější povídání by vás mohlo vést k názoru, že číslo 2^{1000} je entropií sbírky mincí. V některých případech byste s takovým tvrzením obstáli. Abychom však vysvětlili co možná nejtěsnější souvislost mezi entropií a informací, musíme předchozí popis upřesnit. Entropie systému *souvisí* s počtem nerozlišitelných přeuspořádání součástí, ale přesně řečeno není rovna tomuto počtu samotnému. Přesný vztah je vyjádřen matematickou operací známou jako *logaritmus*; nenechte se odradit slůvkem, které vám třeba nepříjemně připomíná středoškolské hodiny matematiky. V našem příkladu s mincemi to znamená jednoduše to, že musíte vzít z počtu přeuspořádání exponent – takže entropie nemá hodnotu 2^{1000} , ale zkrátka 1 000.

Práce s logaritmy je výhodná v tom, že nám umožňuje operovat s příjemnějšími čísly, ale existuje i jedno důležitější zdůvodnění, proč mluvíme o logaritmech počtů přeuspořádání a nikoli o počtech samotných. Představte si, že se vás zeptám, kolik informací potřebujete znát, abyste přesně zjistili, která z posloupností 1 000 panen nebo orlů nastala. Nejjednodušší odpověď by zněla, že potřebujete celý seznam – panna, panna, orel, panna, orel, orel... –, který zcela specifikuje rozestavení každé z 1 000 mincí. Ano, potvrdil bych, z toho seznamu byste zjistili všechny detaily o uspořádání, ale na to jsem se neptal. Ptal jsem se, *kolik informace* je v seznamu obsaženo.

Zapnete mozkové buňky. Co to vlastně informace *je* a co dokáže? Rychle a jednoduše si odpovíte. Informace podává odpovědi na otázky. Roky výzkumu matematiků, fyziků a informatiků tuto odpověď zpřesnily. Vědci ukázali, že nejužitečnější mírou informačního obsahu je *počet různých otázek ano/ne, na něž může informace dát odpověď*. Informace uložená v mincích takových otázek zodpoví 1 000: Ukazuje první dolarovka pannu? Ano. Ukazuje ta druhá pannu? Ano. Ukazuje třetí pannu? Ne. Ukazuje čtvrtá pannu? Ano. A tak dále. Údaj, který je schopen odpovědět na jedinou otázku ano/ne, se nazývá *bit*. Jde o termín naší počítačové doby, jímž se zkracuje anglické označení *binary digit* čili *dvojková číslice*, což znamená *0 nebo 1*, tedy číslice, již můžete považovat za číselné vyjádření odpovědí *ne* a *ano*. Uspořádání panen a orlů na 1 000 mincích proto obsahuje 1 000 bitů informace. Analogicky platí, že kdybyste se vžili do Oskarovy makroskopické perspektivy a soustředili se pouze na celkový dojem z nahodilého uspořádání všech mincí, zatímco „mikroskopické“ podrobnosti o pannách a orlech byste přehlédli, „skrytá“ informační hodnota mincí by byla 1 000 bitů.

Všimněte si, že hodnota entropie a množství skryté informace jsou si rovny. Nejde o nějakou náhodu. Počet možných uspořádání panen a orlů *je* počet

* Mince byste mohli nejen převracet, ale i přesouvat z místa na místo, ale při vysvětlování základních myšlenek můžeme tuto komplikaci bezpečně zanedbat.

možných odpovědí na 1 000 otázek – (ano, ano, ne, ne, ano, ...) nebo (ano, ne, ano, ano, ne, ...) nebo (ne, ano, ne, ne, ne, ...) a tak dále – tedy $2^{1\,000}$. Poněvadž je entropie definována jako logaritmus počtu takových uspořádání – v tomto případě 1 000 –, je entropie počet otázek ano/ne, na něž libovolná poslušnost může odpovědět.

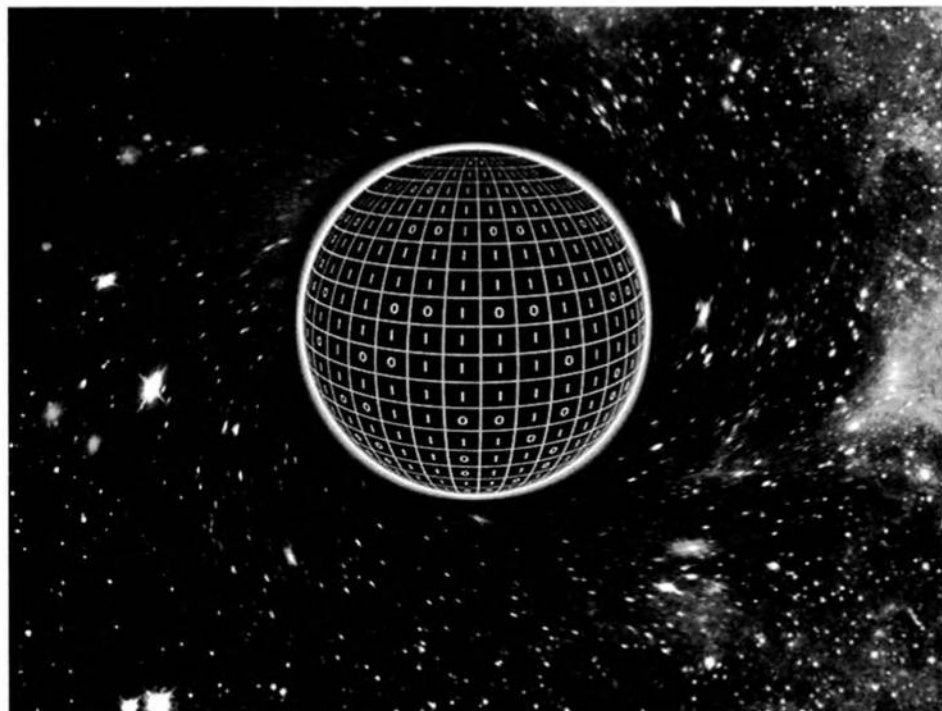
Na 1 000 mincích jsem vám chtěl předvést konkrétní příklad, ale souvislost mezi entropií a informací platí obecně. Mikroskopické detaily libovolného systému obsahují informaci, která je skrytá, pokud pozorujeme pouze jeho úhrnné, makroskopické vlastnosti. Můžete třeba znát teplotu, tlak a objem nádoby s párou, ne to, zda molekula H_2O vrazila právě do pravého horního předního rohu krabice. Trefila se nějaká další do středu dolní levé hrany? Právě jako v případě rozsypaných dolarových mincí je *entropie systému počtem otázek ano/ne, na něž jsou schopné odpovědět mikroskopické detaily systému, a proto je mírou skrytého informačního obsahu systému.*⁶

Entropie, skrytá informace a černé díry

Jak funguje pojem entropie a jeho vztah ke skryté informaci v případě černých děr? Když Hawking dokončil svůj podrobný kvantověmechanický argument spojující entropii černé díry s velikostí jejího povrchu, nejenže kvantitativně upřesnil původní Bekensteinův odhad, poskytl světu i algoritmus, jak entropii spočítat. Vezměte horizont událostí černé díry, radí vám Hawking, a nakreslete na něj čtvercovou síť, takovou, v níž strana každého čtverečku měří jednu Planckovu délku (10^{-35} metru). Hawking matematicky dokázal, že entropie černé díry je počet kostiček, které budete potřebovat k vyplnění jejího horizontu událostí – je tedy rovna jejímu povrchu měřenému v jednotkách Planckovy plochy (která má velikost 10^{-70} čtverečního metru). V jazyce skryté informace se zdá, že každá taková kostička tajně skrývá jeden bit, 0 nebo 1, který může zodpovědět jednu otázku ano/ne týkající se nějakého aspektu mikroskopické konstituce černé díry.⁷ (To je schematicky znázorněno na straně 240.)

Einsteinova obecná teorie relativity a s ní i teorémy o plešatosti černých děr ignorují kvantovou mechaniku, a proto zcela veškerou tuto informaci přehlížejí. Vyberete-li hodnotu její hmotnosti, náboje a momentu hybnosti, zcela tím černou díru specifikujete, říká obecná relativita. Z nejpřímočařejší interpretace Bekensteinových a Hawkingových výsledků však plyne, že tomu tak není. Práce obou vědců prokázaly, že musí existovat mnoho různých černých děr se stejnými makroskopickými vlastnostmi, které se přesto mikroskopicky odlišují. Stejně jako v případě obvyklejších objektů – mincí na podlaze nebo páry v nádrži – odráží entropie černé díry informaci ukrytou v jemnějších detailech.

Tyto poznatky objasnily, že přes svou exotičnost se co do entropie černé díry chovají stejně jako všechno ostatní. Takové výsledky postavily fyziky i před



Stephen Hawking matematicky ukázal, že entropie černé díry se rovná počtu čtverečků Planckovy velikosti, které jsou potřeba k pokrytí horizontu událostí. Vypadá to, jako by každý čtvereček obsahoval jeden bit, jednu základní jednotku informace.

jeden rébus. Bekenstein a Hawking nám sice řekli, kolik informace se v černé díře skrývá, ale neupřesnili, co ta informace vlastně je. Neřekli nám, na jaké konkrétní otázky ano/ne tato informace odpovídá, ani neurčili totožnost mikroskopických součástí údajnou informaci popisovaných. Matematické rozborů určily *velikost* informace obsažené v dané černé díře, aniž poskytly vhled do této informace samotné.⁸

Tohle byly – a stále jsou – matoucí záležitosti. Navíc je tu ještě jedna záhada, a to záhada snad ještě podstatnější: Proč je vlastně množství informace určeno povrchem černé díry? Kdybyste se mě totiž zeptali, kolik informace je uloženo v Knihovně Kongresu, asi bych se pídil po tom, jak velký prostor *uvnitř* Knihovny Kongresu je. Zjišťoval bych, jakou kapacitu k ukládání knih, archivování mikrofišů a skládání map, fotografií a dokumentů mají regály této prostorné knihovny. Totéž platí pro informaci v mé hlavě, podle všeho spojenou s objemem mého mozku, tedy s dostupným prostorem pro vzájemná spojení nervových buněk. Stejně tak je tomu i s informací v nádobě s párou, která je uložena v částicích vyplňujících nádobu. Bekenstein a Hawking však překvapivě prokázali, že informační kapacita černé díry není určena objemem vnitřku, ale velikostí povrchu.

Před jejich objevy by podle mínění fyziků tím, že Planckova délka (10^{-35} metru) je zřejmě nejkratší vzdáleností, u níž pojem „délka“ má ještě vůbec nějaké opodstatnění, měl být nejmenší smysluplný objem malinká krychlička o hraně jedné Planckovy délky (asi 10^{-105} krychlového metru). Obecně byla přijímána a zdánlivě rozumná domněnka, že nehledě na budoucí revoluce v technice nebude tento nejmenší objem nikdy schopen uchovávat více než nejmenší jednotku informace, jeden bit. A proto se očekávalo, že oblast prostoru by svou kapacitu maximálně využila, kdyby obsahovala tolik bitů, na kolik Planckových krychliček se dá rozdělit její objem. To, že Hawkingův výsledek závisel na Planckově délce, proto překvapivé nebylo. Překvapením bylo, že kapacita informačního skladiště černé díry byla určena počtem čtvercůků na povrchu, a nikoli počtem kostiček, jimiž lze objem vyplnit.

Představa, že schopnost oblastí skladovat informaci je určena plochami na hranici objemu, nikoli objemem uvnitř těchto ploch, byla prvním náznakem holografie. Různými kličkami se v průběhu třiceti následujících let z tohoto náznaku vyvinul dramaticky nový způsob uvažování o fyzikálních zákonech.

Jak vystopovat informaci skrytou v černé díře

Planckova čtvercová síť s nulami a jedničkami rozmístěnými po horizontu událostí (na obrázku na straně 240) je symbolickým znázorněním Hawkingova výsledku pro množství informace obsažené v černé díře. Lze takové ilustraci zcela věřit? Když nám matematika říká, že zásobárna informace v černé díře se měří velikostí povrchu, odráží to pouze způsob, jak administrativně rozpočítat celkovou velikost, nebo to znamená, že povrch černé díry je faktickým místem uložení informace?

S touto hlubokou otázkou se celé desítky let potýkal ne jeden proslulý fyzik.* Odpověď citlivě závisí na tom, zda se na černou díru díváte zvenku, nebo zevnitř; zvenku existuje dobrý důvod si myslet, že informace je skutečně uskladněna na povrchu.

Pro každého, kdo je obeznámen s podrobnostmi toho, jak si obecná teorie relativity představuje černé díry, je tohle jistě nesmírně podivný výrok. Z obecné teorie relativity jasně vyplývá, že kdybyste propadli horizontem událostí černé díry, necítili byste vůbec nic – žádnou blánu na povrchu, žádné směrové tabule, žádné semaforey –, co by vás jakýmkoli způsobem informovalo o tom, že jste už překročili hranici, za níž není návratu. Tento závěr vychází z jednoho z Einsteinových nejjednodušších, ale zároveň i nejhlubších poznatků. Einstein si uvědomil, že když se (vy nebo jakýkoli objekt) necháte unášet volným pádem, pocítíte stav beztlíže; připevněte si na chodidla váhu,

* Zajímáte-li se o tento příběh podrobněji, vřele doporučuji vynikající knihu Leonarda Susskinda *Válka o černé díry*.

skočte z vysokého skokanského můstku, a uvidíte, že váha v průběhu letu ukáže nulu. V podstatě gravitaci zcela kompenzujete tím, že jí ponecháte své tělo zcela napospas. Z toho dokázal Einstein hned vydedukovat jeden důsledek. Třebaže použijete cokoli, co můžete ve svém nejbližším okolí pozorovat a vnímat, nebudete schopni rozeznat volný pád k hmotnému objektu od volného vznášení se v hlubinách prázdného prostoru: v obou situacích se ocítáte v dokonalém stavu beztlíže. Ano, když se podíváte o něco dále a uvidíte například povrch Země, který se k vám rapidně přibližuje, celkem snadno vám dojde, že už byste za ten provázek od pádaku měli zatáhnout. Ale zůstáváte-li uvězněni v malé kabině bez oken, nerozlišíte zážitky spojené s volným pádem od toho, co prožíváte ve volném prostoru.⁹

Počátkem 20. století se Einstein chopil tohoto jednoduchého, ale hlubokého spojení mezi pohybem a gravitací a po deseti letech přemýšlení z něho vystavěl obecnou teorii relativity. Námi zkoumaná aplikace tohoto spojení je skromnější. Předpokládejte, že jste ve zmíněné kabině, ale nepadáte k Zemi, nýbrž do černé díry. Úplně stejnými argumenty lze dokázat, že neexistuje způsob, jak byste mohli pocítit cokoli jiného, než když se vznášíte v prázdném prostoru. A to znamená, že se nestane nic zajímavého či neobvyklého, ani když prolétnete horizontem událostí černé díry. Když nakonec dorazíte do středu černé díry, už ve stavu volného pádu nebudete, a tato příhoda vás ovlivní. A to dost tragicky. Do té doby si však klidně můžete myslet, že se jen tak nazdařbůh vznášíte v temných hlubinách meziplanetárního prostoru.

Kvůli této neviditelnosti horizontu událostí se entropie černé díry zdá ještě podivnější. Když se při průletu horizontem událostí neseťkáte s ničím, čím by se tato plocha odlišila od prázdného prostoru, jak by se tam mohla skrývat informace?

Jedna odpověď – a fyzici ji v posledním desetiletí začali věřit – rezonuje s tématem dualit, s nimiž jsme se setkali v úvodních kapitolách. Připomeňte si, že dualita označuje situaci, v níž existují dva doplňující se pohledy, které vypadají zcela odlišně, ale které jsou úzce spojeny, protože jsou ukotveny v totožných fyzikálních jevech. Portrét Marilyn-Alberta (na straně 107) nabízí dobrou vizuální představu; matematické příklady nalezneme v zrcadlitých tvarech dodatečných rozměrů teorie strun (4. kapitola) a ve zdánlivě odlišných, a přece duálních strunových teoriích (5. kapitola). V průběhu posledních let si badatelé v čele se Susskindem uvědomili, že černé díry v sobě skrývají ještě jeden kontext, v němž se lze mnohé dozvědět z doplňujících se úhlů pohledu, které se zdánlivě zcela rozcházejí.

Jeden podstatný úhel pohledu je ten váš, když právě padáte do černé díry. Další je pohled vzdálené pozorovatelky, která vaši pouť sleduje výkonným dalekohledem. Pozoruhodné je, že zatímco vy se při průchodu horizontem černé díry nudíte, vzdálená pozorovatelka vidí zcela odlišnou, dramatickou posloupnost událostí. Neshoda má co do činění s Hawkingovým zářením čer-

né díry.* Když vzdálená pozorovatelka měří teplotu Hawkingova záření, zjistí nepatrnou hodnotu, řekněme 10^{-13} kelvinu; to naznačuje, že černá díra má velikost srovnatelnou s černou dírou, která se usadila ve středu naší galaxie, Mléčné dráhy. Ale pozorovatelka ví, že záření jí připadá chladné jen proto, že fotony na své cestě z těsného okolí horizontu do jejího dalekohledu musely spotřebovat energii, jinak by se nevymanily z gravitačního sevření černé díry, jak jsem popsal před chvílí, a jsou tedy unavené. Slečna se tedy dovtipí, že když se blížíte k horizontu událostí, musíte potkávat fotony stále svěžejší a svěžejší, právě začínající svou cestu, a proto energetičtější a teplejší. A když jste už na dosah horizontu, stává se svědkem toho, jak je vaše tělo bombardováno stále intenzivnějším zářením, z něhož nakonec zbudou jen spálené ostatky.

Vaše zážitky jsou naštěstí mnohem příjemnější. Žádné známky horkého záření nevidíte, necítíte ani jinak neregistrujete. Protože i v tomto ohledu váš pohyb volným pádem kompenzuje efekty gravitace,¹⁰ pocítíte totéž, jako byste se vznášeli prázdným prostorem. A jestliže něco víme jistě, pak je to fakt, že při letu volným prostorem zničehonic nevzplanete. Takže ze svého pohledu proplujete horizontem událostí bezproblémově a řítíte se (to už s menším optimismem) vstříc singularitě v černé díře, zatímco podle vzdálené pozorovatelky vás sežehne žhnoucí koróna, která obklopuje horizont.

Která z perspektiv je správná? Susskind a další obhajovali názor, že obě. Uznávám, že takový pohled se dost přičí obyčejné logice, podle níž jste buď živí, *nebo* mrtví. Zde však nejde o obyčejnou situaci. A ještě důležitější je, že tyto dva úhly pohledu se už nikdy nepostaví tváří v tvář, aby je šlo porovnat. Nemůžete vyšplhat z černé díry a vzdálené pozorovatelce dokázat, že jste naživu. Lze matematicky vypočítat i to, že ona zase nemůže do černé díry skočit, aby vám sdělila, že jste mrtví. Když jsem tvrdil, že vzdálená pozorovatelka „vidí“, že vás spálilo Hawkingovo záření, poněkud jsem vše zjednodušil. Vzdálená pozorovatelka totiž může unavené záření, které k ní dospělo, podrobně prozkoumat a na základě toho zrekonstruovat příběh o vašem zániku v plamenech. Jenže trvá nějakou dobu, než se k ní potřebná informace dostane. A matematika ukazuje, že v době, kdy konečně získá údaje, z nichž může usoudit, že vás na horizontu čekalo krematorium, bude už příliš pozdě na to, aby skočila do černé díry a setkala se tam s vámi ještě předtím, než vás rozdrtí singularita. Úhly pohledu se mohou lišit, ale fyzika má v sobě zabudovanou pojistku proti paradoxům.

A co informace? Z vašeho hlediska projde veškerá informace obsažená ve vašem těle, mozku i notebooku, který držíte v rukou, horizontem událostí

* Čtenář obeznámený s černými dírami možná poznamená, že i bez kvantových úvah, které dokazují existenci Hawkingova záření, by se oba pohledy lišily v rychlosti plynutí času. S Hawkingovým zářením se tato skutečnost stává hmatatelnější.

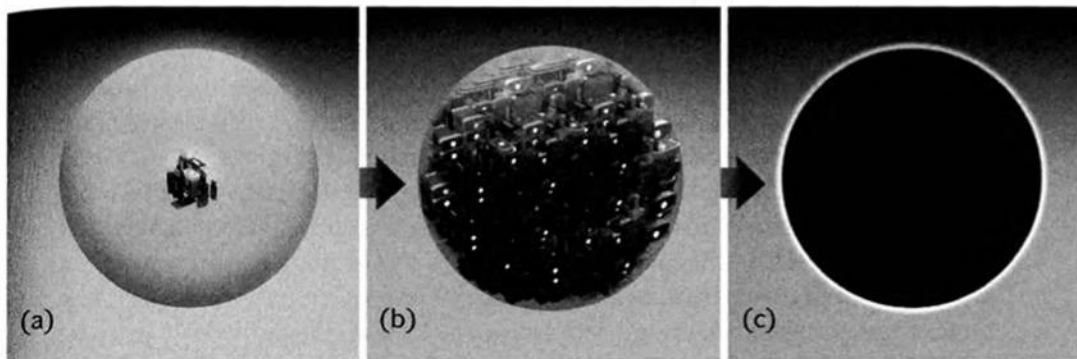
spolu s vámi. Z pohledu vzdálené pozorovatelky informaci, kterou s sebou nesete, absorbuje vrstva záření, ustavičně bublajícího těsně nad horizontem. Bity obsažené ve vašem těle, mozku a notebooku se neztratí, ale dokonale se zamíchají a zakódují ve chvíli, kdy se srazí a spojí s horkým a syčícím horizontem. A to znamená, že podle vzdálené pozorovatelky je horizont událostí *skutečným* místem, kde existují skutečné věci. A do těch je fyzikálně zabudována informace, kterou jsme na straně 240 symbolicky vyobrazili jako čtvercovou síť.

Můžeme tedy uzavřít, že vzdálený pozorovatel – my – usoudí, že entropie černé díry je určena plochou jejího horizontu událostí, protože právě tam je entropie uložena. Takto zformulovaný soud zní absolutně rozumně. Ale nezapomeňte, že je zcela nečekané, že informační kapacitu neurčuje objem černé díry. Jak hned uvidíte, tento výsledek zvýrazňuje jednu podivnou vlastnost černých děr. Ty nás neinformují jen o tom, jak ony samy informaci uskladňují, ale učí nás, jak se informace ukládá v libovolném kontextu. Okna holografického pohledu na gravitaci jsou tak otevřena dokořán.

Svět nejsou jen černé díry

Představte si libovolný objekt nebo množinu objektů – například sbírky Knihovny Kongresu, všechny počítače firmy Google, archivy CIA – v určité oblasti prostoru. Kvůli zjednodušení ji zvýrazníme tak, že ji obklopíme imaginární sférou (jako na obrázku *a* na straně 245). Dále předpokládejte, že celková hmotnost objektů je, ve srovnání s jejich objemem, natolik nízká, že má hodně daleko do hodnot, které jsou třeba ke zrodu černé díry. Takové je naše aranžmá. Stěžejní otázka teď zní: Jaké maximální množství informace je možné v takové oblasti prostoru uskladnit?

Dva neočekávaní spojenci, druhý zákon a černé díry, dokážou na tuto otázku společně odpovědět. Představte si, že do nějaké oblasti přidáváte hmotu s cílem navýšit informační kapacitu této oblasti. Tak třeba do počítačů v halách firmy Google zasunete velkokapacitní paměťové čipy nebo rozsáhlé pevné disky; do sbírek Knihovny Kongresu byste mohli zaslat knihy nebo čtečky Kindle s pamětí zcela zaplněnou e-knihami. Protože informaci nesou i nezpracované materiály – Jsou molekuly vodní páry tady, nebo o kus dále? Pohybují se takovou, či onakou rychlostí? –, mohli byste napěchovat tolik hmoty, kolik jen lze sehnat, i do té poslední skulinky. Ale nakonec byste dospěli ke kritickému bodu. V určitém okamžiku by byla oblast tak nacpaná hmotou, že by stačilo zrnko písku, a vnitřek by zčernal: oblast by se proměnila v černou díru. Když se tak stane, máte po zábavě. Velikost černé díry je zcela určena její hmotností, takže když se pokusíte kapacitu dále přidáváním hmoty zvětšovat, černá díra zareaguje tím, že se zvětší. A protože chceme studovat informaci, kterou lze dostat do předem určeného *pevného* objemu v prostoru,



(a) Skupina objektů, v nichž je uložena informace, se nachází uvnitř zvýrazněné oblasti prostoru. (b) Dodáním další hmoty se zvětší schopnost oblasti informaci schraňovat. (c) Když množství hmoty překročí kritickou mez (jejíž hodnotu lze spočítat na základě obecné teorie relativity),¹¹ oblast se promění v černou díru.

protiřečí takový nárůst našemu základnímu úkolu. Informační kapacitu černé díry nemůžete navýšit, aniž byste černou díru nezvětšili.¹²

K dokončení argumentace nám postačí dvě další pozorování. Druhý zákon zaručuje, že entropie v průběhu celého procesu roste, a tak je informace uchovaná v pevných discích, ve čtečkách Kindle, v klasických papírových knihách i ve všem ostatním, co jste do oblasti napěchovali, menší než informace skrytá v černé díře. Z Bekensteinových a Hawkingových prací víme, že skrytý informační obsah černé díry je určen plochou jejího horizontu událostí. Protože jste si navíc dávali pozor, abyste nepřekročili hranice původní oblasti prostoru, shoduje se horizont událostí s hranicí této oblasti, a entropie černé díry se tedy rovná velikosti této ohraničující plochy. Docházíme proto k důležitému poznatku, že *množství informace obsažené v oblasti prostoru a uložené v jakémkoli objektu libovolné konstrukce je vždycky menší než velikost plochy (měřené v čtverečnících Planckových délkách), která tuto oblast ohraničuje.*

O takový závěr jsme usilovali. Všimněte si, že ačkoli jsou černé díry pro toto uvažování klíčové, stejný rozbor platí i pro *libovolnou* jinou oblast v prostoru, ať už v ní nějaká černá díra je nebo není. Navýšíte-li informační kapacitu oblasti na maximum, přispějete ke vzniku černé díry, ale dokud se udržíte pod touto hranicí, černá díra nevznikne.

Musím rychle dodat, že toto omezení informační kapacity nepředstavuje v praxi vůbec žádný problém. Srovnáme-li tuto maximální informaci s pamětí běžných přístrojů, zjistíme, že potenciální kapacita na povrchu oblasti prostoru je nesmírná. Hromádka pěti běžně prodávaných terabajtových pevných disků se pohodlně vejde do koule o poloměru 50 centimetrů, jejíž povrch lze pokrýt asi 10^{70} Planckovými čtverečky. Povrch má tedy schopnost pojmout až 10^{70} bitů, tedy asi miliardu bilionů bilionů bilionů bilionů terabajtů; nesmírně

tedy převyšuje jakékoli obyčejné médium. Nikdo v Silicon Valley ani ve firmě Seznam.cz se proto o tato teoretická omezení nestará.

A přece – považujeme-li omezení informační kapacity za zprávu o tom, jak funguje vesmír, leccos se z ní dozvídáme. Představte si nějakou oblast prostoru, například místnost, v níž píšu tuto knihu, nebo pokoj, v němž ji čtete. Přijměte Wheelerův úhel pohledu a představte si, že cokoli se v oblasti stane, představuje zpracovávání informace – informace o tom, jak vše vypadá teď, se transformuje fyzikálními zákony do informace o tom, jak to bude vypadat za sekundu, minutu nebo hodinu. Protože fyzikální jevy, jichž jsme svědky, i ty, které ovládají nás, se zdánlivě odehrávají uvnitř oblasti, měli bychom přirozeně očekávat, že také informace, kterou tyto procesy zpracovávají, se nachází uvnitř oblasti. Jenže výsledky, ke kterým jsme právě dospěli, naznačují něco jiného. V případě černých děr jsme zjistili, že souvislost mezi informací a velikostí povrchu přesahuje pouhou numerickou shodu okolností; v určitém konkrétním smyslu je informace uskladněna na povrchu černých děr. Susskind a 't Hooft zdůraznili, že by mělo jít o poučení univerzální: protože informaci potřebnou k popisu fyzikálních jevů uvnitř *libovolné* pevné oblasti prostoru lze zcela zakódovat v datech na ploše, která tuto oblast ohraničuje, máme důvod předpokládat, že povrch je místo, na němž se fundamentální fyzikální procesy fakticky odehrávají. Naše obvyklá třírozměrná realita je podle těchto směšných myslitelů analogická holografické projekci těchto vzdálených dvou-rozměrných fyzikálních procesů.

Je-li tato má posloupnost úvah správná, potom na nějaké vzdálené ploše probíhají fyzikální procesy, připomínající loutkáře tahajícího za provázky, dokonale propojené s procesy uvnitř mých prstů, paží a v mém mozku, po způsobu loutky, jež mi dovolují tento text psát. Naše prožitky na tomto místě a realita na vzdálené ploše, by tedy dohromady vytvořily pár paralelních světů, sprážených spolu více než všechny předchozí. Jevy na těchto dvou místech – budu jim říkat *holografické paralelní vesmíry* – by byly tak dokonale propojené, že evoluce v obou z nich by byly stejně neoddelitelné jako pohyb mého těla od pohybu mého stínu.

Místo pro pochyby

To, že obvyklá realita může mít odraz v jevech odehrávajících se na vzdálené ploše o nižším počtu rozměrů a že třeba může být i důsledkem těchto jevů, se řadí k těm nejneočekávanějším poznatkům v historii teoretické fyziky. Ale jakou důvěru bychom měli mít ve správnost holografického principu? Vplouváme do hlubokých vod teoretického oceánu a téměř zcela se spoléháme na poznatky experimentálně neověřené, takže důvodů ke skepsi můžeme mít habaděj. Na mnoha místech může být náš argument chybný. Mají černé díry opravdu nenulovou entropii a nenulovou teplotu, a pokud mají, souhlasí

jejich hodnoty s teoretickými předpověďmi? Je informační kapacita oblasti opravdu určena velikostí informace, kterou lze uložit na plochu oblast ohraničující? A je na takové ploše mezní hustota informace opravdu jeden bit na Planckovu plochu? Myslíme si, že odpověď na každou z těchto otázek je kladná, protože máme k dispozici ucelenou, konzistentní a pečlivě logicky promyšlenou teoretickou konstrukci, do níž tyto závěry perfektně zapadají. Ale jelikož žádná z těchto myšlenek ještě neprošla experimentátorským skalpelem, lze si jistě představit (třebaže je to podle mého názoru nepravděpodobné), že nás budoucí poznatky přesvědčí, že jeden z podstatných mezikroků (nebo hned několik z nich) je chybný. Holografická myšlenka by tím byla znehodnocena.

Důležité rovněž je, že jsme zatím mluvili o oblasti prostoru, o jejím povrchu a o informačním obsahu obou. Ale protože jsme se soustředili na entropii a druhý zákon – a jelikož se oba tyto pojmy starají primárně o *množství* informace v daném kontextu –, nerozvedli jsme podrobnosti o tom, *jak* je tato informace uložena nebo fyzikálně realizována. Mluvíme-li o informaci zaplňující kulovou plochu na hranici nějaké oblasti prostoru, co taková informace znamená? Jak se projevuje? Jakou má formu? Do jaké míry můžeme sestavit jednoznačný slovník, s nímž lze přeložit jevy probíhající na hranici do řeči událostí, které se odehrávají uvnitř?

Fyzici zatím neformulovali obecný systém pravidel, jak na tyto otázky odpovědět. Vzhledem k tomu, že jak gravitace, tak kvantová mechanika hrají v těchto úvahách ústřední úlohu, mohli byste očekávat, že strunová teorie by mohla poskytnout užitečný základ teoretickým badáním. Když ale 't Hooft formuloval holografický princip, trápily ho pochyby, zda bude teorie strun schopná o tomto předmětu říct něco nového: „Příroda na Planckových vzdálenostech je mnohem ztřeštěnější, než si i strunoví teoretici vůbec dokážou představit.“¹³ Netrvalo ani deset let, a strunoví teoretici přinesli důkaz, že se 't Hooft mýlil, a to důkaz, který zároveň potvrdil, že 't Hooft měl pravdu. V článku, který se stal mezníkem ve výzkumu, ukázal mladý teoretik, že teorie strun představuje konkrétní ztělesnění holografického principu.

Strunová teorie a holografie

Když mě v roce 1998 na Kalifornské univerzitě v Santa Barbaře vyzvali, abych účastníkům každoroční mezinárodní konference řekl něco o teorii strun, udělal jsem něco, co jsem neudělal nikdy předtím a pravděpodobně ani neudělám nikdy potom. S tváří obrácenou k obecenstvu jsem postupně předpažil obě ruce, postupně je zkřížil na ramenou, pak se s rukama v bok zakroutil v pase, nadskočil a zároveň se otočil o 90 stupňů a bohudíky za smích obecenstva postupně dokráčel k pódiu a začal přednášet. Houf fyziků vtip pochopil. Předchozí večer totiž účastníci konference předvedli zpěv kombinovaný s tancem,

jímž tak, jak to dovedou pouze fyzici, oslavili senzační výsledek argentinského strunového teoretika Juana Maldaceny. S textem obsahujícím verše jako „Černé díry byly kdysi záhadné, teď už jejich entropie je na bráně Dé“ se dav bavil strunovou verzí jednoho pomíjivého tanečního šilenství devadesátých let, macareny. Choreografie fyziků byla o něco hbitější než výstup Alberta Gorea na Demokratickém národním konventu, o něco méně libozvučná než původní jediný velký hit skupiny Los del Rio, ale nepřekonatelná co do vášnivosti. Byl jsem jedním z mála řečníků, který na konferenci nemluvil o Maldacenově revoluci, a proto jsem považoval za ještě důležitější projevit hned na začátku svého vystoupení osobní gesto uznání.

Dnes, o více než desetiletí později, souhlasí mnozí s tím, že žádný objev v teorii strun od té doby nedosáhl srovnatelné velikosti ani vlivu. Maldacenův objev má mnoho důsledků, ale jeden je obzvláště důležitý pro naše úvahy. V konkrétním hypotetickém vesmíru Maldacenův objev *přeměnil neurčitě představy o holografickém principu v konkrétní a hmatatelnou realitu, a tím poskytl fyzikům první matematický příklad holografických paralelních vesmírů*. Maldacena této mety dosáhl rozbořením teorie strun ve vesmíru, jenž se tvarem liší od toho našeho, ale jehož holografické aspekty se snáze analyzují. V jistém přesném matematickém smyslu má tento tvar hranici, tedy neproniknutelný povrch, který zcela ohraničuje vnitřek. Tím, že se Maldacena zaměřil na tento povrch, mohl přesvědčivě tvrdit, že všechno, co se odehrává ve zmíněném vesmíru, je odrazem zákonů a dějů probíhajících na hranici.

Třebaže nelze Maldacenuv metodu přímo vztáhnout na vesmír, který tvarem připomíná ten náš, její výsledky jsou rozhodující, protože vystavěly základy přesvědčivých matematických důkazů a výzkumů holografických vesmírů. Výsledky takových studií si vydobily přízeň i mnohých fyziků, kteří dříve na holografický princip pohlíželi s nedůvěrou, a tak odstartovaly lavinu výzkumu, z níž vzešly tisíce článků a výrazně hlubší pochopení problematiky. Nejvíce fyziky vzrušuje, že už máme důvod věřit, že spojení mezi těmito teoretickými poznatky a fyzikou našeho vesmíru *lze* nalézt. V blízké budoucnosti díky tomu snad holografické myšlenky i experimentálně ověříme.

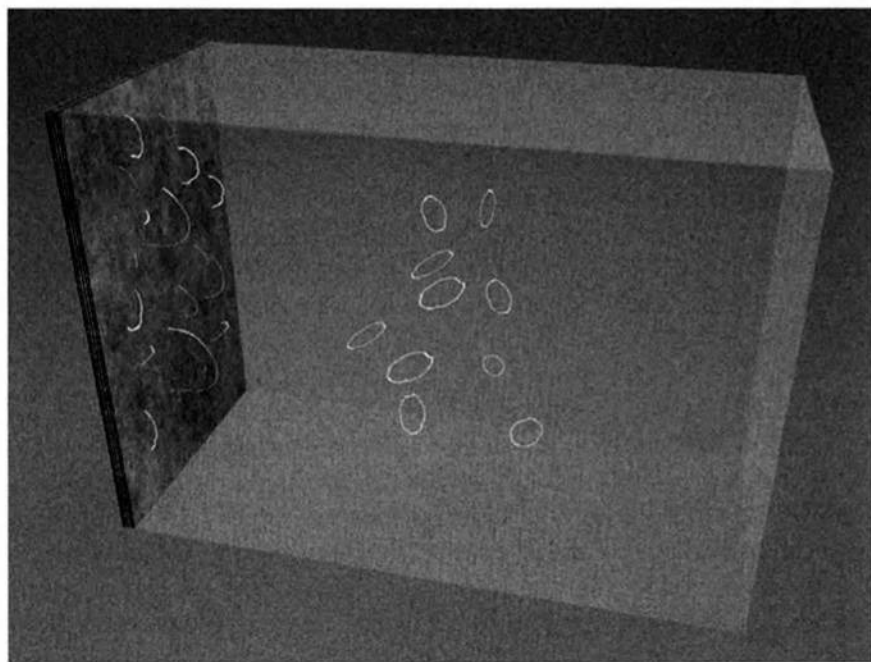
Ve zbylé části této podkapitoly i v podkapitole následující se dozvíte, jak vlastně Maldacena svou revoluci provedl. Pohrajeme si s nejobtížnějším materiálem celé knihy. Začnu krátkým shrnutím, jakýmsi „rozumem do kapsy“; poslouží vám i jako povolenka přeskočit bez pocitu provinění do poslední podkapitoly, kdyby vás hutné vyprávění v některé chvíli připravilo o chuť na podrobnosti.

Tím Maldacenovým chytrým tahem bylo, že použil novou verzi argumentů o dualitě zmiňovaných v 5. kapitole. Vzpomeňte si, že jsme tam zavedli brány – vesmíry jako „krajíce chleba“. Maldacena vrhl dva různé pohledy na vlastnosti pevně svázaného „stohu“ třírozměrných brán (jako na obrázku na straně 249). Jeden jeho pohled, ten „vnitřní“, se soustředil na struny, které se

pohybovaly, vibrovaly a vlnily podél brán samotných. Druhá perspektiva, ta „vnější“, se zaměřila na způsob, jak brány ovlivňují své nejbližší okolí gravitačně, podobně jako ovlivňuje své okolí Slunce a Země. Maldacena tvrdil, že oba pohledy popisují stejnou fyzikální situaci z různých hledisek. Vnitřní perspektiva zahrnuje struny pohybující se na „stohu“ brán, zatímco vnější perspektiva obsahuje struny pohybující se oblastí zakřiveného prostoru, který je „stohem“ brán ohraničen. Tím, že mezi ně položil rovnítko, našel jasnou souvislost mezi fyzikálními jevy probíhajícími v oblasti a fyzikálními jevy probíhajícími na hranici této oblasti; našel konkrétní realizaci holografie. V tom spočívala jeho základní myšlenka.

Když přidáme trochu barev, bude příběh vypadat následovně.

Uvažujte o „stohu“ tříbrán, říká Maldacena, které jsou tak blízko sebe, že vypadají jako jedna monolitická deska (obrázek dole), a studujte chování strun, které se v tomto prostředí pohybují. Určitě si vzpomenete, že existují dva druhy strun – otevřené úsečky a uzavřené smyčky – a že koncové body otevřených strun se mohou pohybovat uvnitř brán a skrze ně, ale opustit je nemohou, zatímco uzavřené struny žádné konce nemají, a proto se mohou pohybovat volně po celém prostoru. V žargonu expertů říkáme, že zatímco otevřené struny jsou uvězněny na bránách, uzavřené struny se mohou pohybovat *objemem* prostoru, *bulkem*.



Skupinka tříbrán oddělených malými mezerami spolu s otevřenými strunami uvězněnými na jejich povrchu a uzavřené struny, které se pohybují *bulkem*.

Nejprve Maldacena matematicky zkoumal struny, které mají nízkou energii – tedy které vibrují poměrně pomalu. To proto, že gravitační síla mezi libovolnými dvěma objekty je úměrná hmotnosti každého z nich; totéž platí o gravitační síle mezi dvěma strunami. Struny o nižší energii mají nižší hmotnost, proto téměř na gravitaci nereagují. Tím, že se Maldacena soustředil na struny o nízké energii, potlačil vliv gravitace. To jeho práci podstatně zjednodušilo. V teorii strun, jak jsme viděli (v 5. kapitole), se přenáší gravitace z místa na místo při výměně uzavřených smyček. Potlačit vliv gravitace tedy znamenalo potlačit vliv uzavřených strun na cokoli, s čím by se mohly setkat – především na otevřené strunové úsečky, které obývají „stoh“ brán. Maldacena stanovil podmínky, za kterých se tyto dva druhy strun, otevřené úsečky a uzavřené smyčky, vzájemně neovlivňují, takže je mohl studovat nezávisle na sobě.

Poté si uvědomil, že o stejnou situaci lze přemýšlet i jinak. A přesvědčoval i ostatní, aby na tříbrány nepohlíželi jako na substrát, v němž se vyskytují pohybující se otevřené struny, ale aby je považovali za jediný objekt, objekt s vlastní hmotností, jenž proto ve svém okolí zakřivuje prostor a čas. Měl štěstí, že pro tento alternativní pohled položil základy předchozí výzkum mnoha fyziků. Starší práce ukázaly, že když dohromady svážete stále větší počet brán, posílíte jejich kolektivní gravitační pole. Nakonec se deska z brán chová jako černá díra, která má ovšem bránový tvar, a proto vešla ve známost jako *černá brána*. Když se k ní dostanete příliš blízko, stejně jako v případě obvyklejších černých děr už nikdy neuniknete. A stejně jako v případě obvyčejných černých děr uvidí vzdálený pozorovatel, že z oblasti černé brány vychází světlo, ovšem unavené tím, že se muselo prodírat ven z gravitačního pole v jejím okolí. Kvůli tomu se pohyb každého objektu v blízkosti černé brány bude jevit vzdálenému pozorovateli pomalejší a pomalejší a stále méně energický.¹⁴

I z tohoto druhého úhlu pohledu se Maldacena soustředil na nízkenergetické objekty ve vesmíru, který takovouto „černou desku“ obsahuje. Právě jako v prvním pohledu našel i zde dva druhy objektů a dějů o nízké energii, které bylo možné analyzovat odděleně. Pomalu vibrující uzavřené struny, které se pohybují kdekoli v bulku prostoru, jsou nejočividnějšími nosiči nízké energie. Druhý druh objektů závisí na přítomnosti černé brány. Představte si, že jste od černé brány daleko a máte k dispozici uzavřenou strunu, která vibruje s libovolně vysokou energií. Potom si představte, že tuto strunu spouštíte k horizontu událostí, ale udržujete si od něho bezpečnou vzdálenost. Jak jsme před okamžikem zopakovali, černá brána způsobí, že energie struny se bude zdát stále nižší a nižší; světlo, které se k vám dostane, udělá ze struny hrdinku zpomaleného filmu. Druhým druhem nosičů nízké energie jsou tedy všechny vibrující struny, které se nacházejí dostatečně blízko horizontu událostí černé brány.

Jako poslední krok Maldacena tyto dva pohledy porovnal. Všiml si, že jelikož popisují stejný „stoh“ brán, jen z různých hledisek, musejí spolu souhla-

sit. Každý popis obsahuje uzavřené struny o nízké energii, které se pohybují bulkem prostoru, takže shoda v tomto ohledu nijak nepřekvapuje. Ale i zbývající části obou popisů musejí souhlasit.

A to je ohromující.

Zbývajícimi aktéry prvního popisu jsou otevřené struny o nízké energii, které se pohybují uvnitř tříbrán. Vzpomeňte si na poznatek ze 4. kapitoly, že struny o nízké energii lze dobře popsat kvantovou teorií pole pro bodové částice. Právě to se nám teď hodí. Odpovídající druh kvantové teorie pole obsahuje důmyslné matematické ingredience (a nese i těžkopádný název: *konformně invariantní supersymetrická kalibrační kvantová teorie pole*), ale dvě klíčové vlastnosti této teorie není tak těžké pochopit. Nepřítomnost uzavřených strun znamená nepřítomnost gravitačního pole. A protože se struny mohou pohybovat jen v těsně svázaných několikavrstvých třírozměrných bránách, obývá tato kvantová teorie pole tři prostorové rozměry (vedle jednoho časového, takže celkově má čtyři časoprostorové rozměry).

Zbývajícimi aktéry druhého popisu jsou uzavřené struny v libovolném stavu vibrace, jsou-li ovšem dostatečně blízko horizontu událostí černých brán, aby se jejich pohyb zdál strnulý – to znamená, aby měl nízkou energii. Takové struny se mohou navzdory omezení jejich povolené vzdálenosti od brán stále pohybovat a vibrovat v devíti prostorových rozměrech (a v jednom časovém, takže časoprostor má dohromady deset rozměrů). A protože je tento sektor složen z uzavřených strun, působí v něm i gravitační síla.

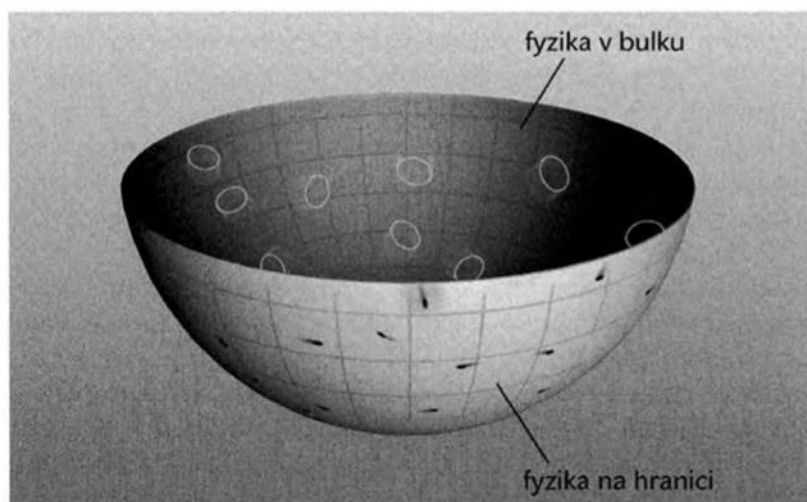
Byť jde o dva velmi odlišné pohledy, popisují stejnou fyzikální situaci, a proto musejí souhlasit. Konkrétní *negravitační, bodově-částicová* kvantová teorie pole ve *čtyřech* časoprostorových rozměrech (první perspektiva) popisuje stejné fyzikální jevy jako *struny, včetně jejich gravitačních účinků*, pohybující se konkrétním vesmírem s *deseti* časoprostorovými rozměry (druhá perspektiva). To je za vlasy přitažené stejně, jako kdybychom tvrdili... No, přiznám se, že jsem se snažil, ale nemohl jsem v reálném světě přijít na žádnou dvojici objektů či situací, které by si byly méně podobné než tyto dvě teorie. Maldacena se však nechal vést matematikou a s argumenty, které jsme právě načrtli, došel k zmíněnému závěru.

Naprostá podivnost tohoto výsledku – a smělost jeho tvrzení – nevybledne ani po chvíli, kterou potřebujeme k jeho zařazení do posloupnosti úvah rozvinutých na začátku této kapitoly. Jak schematicky znázorňuje obrázek na straně 252, gravitace vyvolaná soustavou černých brán připomínajících dřevěnou desku zakřivuje oblast deseti-rozměrného časoprostoru v jejich okolí (detaily jsou podružné, ale tento zakřivený časoprostor se nazývá *anti de Sitterův pětiprostor krát pětisféra*); samotná deska z černých brán je hranicí tohoto prostoru. Maldacena tedy v podstatě říká, že strunová teorie definovaná v *bulku* tohoto časoprostorového tvaru je totožná s kvantovou teorií pole platící pro jeho *hranici*.¹⁵

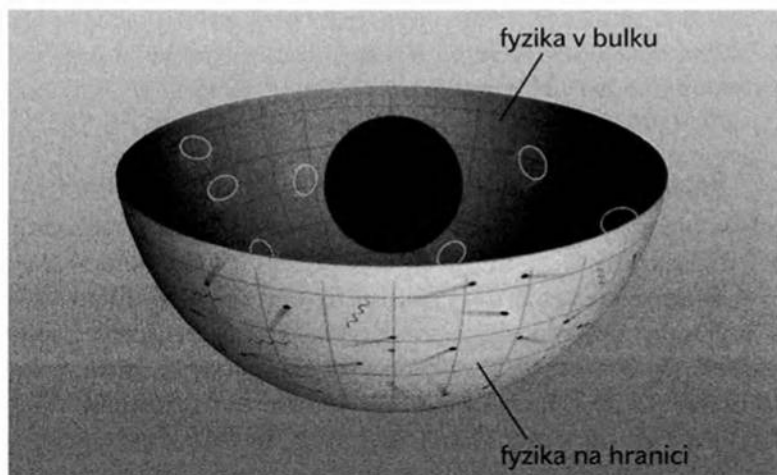
Holografii byl právě vdechnut život.

Maldacena vybudoval soběstačnou matematickou laboratoř, v níž mohli fyzici kromě mnoha dalších věcí detailně zkoumat holografickou realizaci přírodních zákonů. Během několika měsíců se objevily dva články, jeden od Edwarda Wittena, druhý od Stevena Gubsera, Igora Klebanova a Alexandra Poljakova, které pozdvihly porozumění Maldacenově dualitě na novou, vyšší úroveň. Zavedly přesný matematický slovník pro překládání mezi oběma perspektivami: ten pro daný fyzikální jev na bránové hranici ukázal, jak by tento jev vypadal v bulku, a naopak. V hypotetickém vesmíru takový slovník ukázal, proč všechny děje dodržují holografický princip. Na hranici tohoto vesmíru je informace vtělena do kvantových polí. Když se tato informace za pomoci matematického slovníku přeloží, vypráví příběh o strunových jevech probíhajících ve vnitřku vesmíru.

Slovník samotný ukazuje, že analogie s hologramy je opravdu případná. Obyčejný hologram nevykazuje žádnou podobnost s třírozměrnými obrazy, které vytváří. Na jeho povrchu jsou vidět jen různé proužky, obloučky a spirály vyleptané do plastu. A přece komplexní transformace, v praxi realizovaná laserovým paprskem dopadajícím na plast, promění tyto značky ve viditelný třírozměrný obraz. A to znamená, že plastový hologram a třírozměrný obraz ztělesňují stejné údaje, třebaže informaci uloženou v jednom z nich nelze identifikovat z pohledu druhého. Podobně z rozboru kvantové teorie pole na hranici Maldacena vesmíru plyne, že nevykazuje žádnou podobnost s teorií strun ovládající vnitřek vesmíru. Kdybyste fyzikovi obě teorie představili a neřekli mu o uvedených spojeních, nejspíš by usoudil, že tyto dvě teorie spolu nijak nesouvisejí. A přesto matematický slovník tyto dva popisy spoju-



Schematické znázornění duality mezi zákony strunové teorie platnými uvnitř konkrétního časoprostoru a zákony kvantové teorie pole ovládajícími hranici tohoto časoprostoru.



Holografická ekvivalence přiřazuje černé díře v bulku časoprostoru horkou lázeň částic a záření na hranici oblasti.

jící – a hrající stejnou roli jako laser u obyčejných hologramů – podrobně přiřazuje každému jevu v jednom popisu protějšek v popisu druhém. Zároveň analýza tohoto slovníku ukazuje, že stejně jako v případě opravdového hologramu je informace v každé z obou jejích forem složitě zamíchána a zakódována, převede-li se do formy druhé.

Witten prozkoumal jeden obzvláště působivý příklad a zjistil, jak by obyčejná černá díra ve vnitřku Maldacena vesmíru vypadala z pohledu teorie na hranici. Vzpomeňte si, že teorie na hranici neobsahuje gravitaci, a proto slovník černou díru nutně přeloží do něčeho velmi odlišného. Witten došel k závěru, že tak jako byla strašidelná tvář čaroděje ze země Oz vytvořena obyčejným člověkem, i hladová černá díra je holografickou projekcí něčeho stejně obyčejného: horké lázně s částicemi v teorii na hranici (obrázek nahoře). Stejně jako opravdový hologram a obraz, který tvoří, ani tyto dvě teorie – černá díra uvnitř a horká kvantová teorie pole na hranici – nevykazují žádnou nápadnou podobnost, a přesto jsou ztělesněním totožné informace.*

V Platonově jeskyni mají naše smysly přístup pouze k zploštělé a zredukované verzi opravdové, bohatší reality. Maldacenuv zploštělý svět se od

* Fyzici se už dlouhou dobu přeli o jednu důležitou otázku, která s naším hlavním tématem souvisí, ale které jsme se nevěnovali. Týká se toho, zda černé díry vyžadují úpravu kvantové mechaniky – zda nás jejich schopnost pohltit informaci nutí vzdát se představy, že vždycky můžeme přesně vyvíjet pravděpodobnostní vlny v čase. Jednou větou lze závěry shrnout tak, že Wittenův výsledek, který prokázal ekvivalenci černé díry a fyzikální situace, v níž se informace neztrácí (horká kvantová teorie pole), přinesl definitivní důkaz toho, že veškerá informace, která „zahučela“ do černé díry, bude nakonec okolnímu světu přístupná. Kvantová mechanika žádnou úpravu nevyžaduje. Posvítíme-li si Maldacenuv metodou na tuto situaci, zjistíme i to, že teorie na hranici představuje úplný popis informace (entropie), kterou obsahuje povrch černé díry.

Platonova podstatně liší. Není nijak zredukováný, o vesmíru nám říká úplně všechno. Vypráví nám příběh velmi odlišný od toho, nač jsme zvyklí. Ale jeho zploštělý svět může být i hlavním vypravěčem.

Paralelní vesmíry, nebo paralelní matematika?

Maldacenův objev a mnohé další objevy, které se zrodily v následujících letech, patří do kategorie hypotéz. Protože je potřebná matematika tak náročná, fyzikům se zatím nepodařilo dát dohromady neprůstřelný důkaz. Zato holografické myšlenky prošly velkým množstvím nadmíru přísných matematických zkoušek, a protože z nich vyšly na výbornou, staly se součástí uvažování hlavního proudu fyziků, kteří hledají hluboké kořeny přírodních zákonů.

Jeden faktor, kvůli němuž je tak obtížné přesvědčivě dokázat, že světy v bulku i na hranici jsou tímtéž světem, jen ve dvou přestrojeních, zároveň dokazuje, že pokud je Maldacena domněnka pravdivá, skrývá v sobě nesmírně dalekosáhlé důsledky pro naše chápání přírody. V 5. kapitole jsem popsal, že fyzici většinou spoléhají na přibližné metody, zejména na mnou nastíněné poruchové metody (vzpomeňte na metaforu s loterií, Stanislavem a Šárkou). Také jsem zdůrazňoval, že takové metody jsou přesné pouze tehdy, je-li odpovídající vazbovou konstantou malé číslo. Když analyzoval vztah mezi kvantovou teorií pole na hranici a teorií strun v bulku, uvědomil si Maldacena, že je-li vazbová konstanta jedné teorie malá, potom je vazbová konstanta té druhé velká, a naopak. Přírozeným testem a možnou strategií, jak dokázat, že obě teorie jsou totožné, byť to skrývají, je provedení nezávislých výpočtů v obou teoriích a následná kontrola, zda se výsledky rovnají. To je ale obtížné, protože kdykoli fungují poruchové metody v jedné teorii, selžou v té druhé.¹⁶

Přijmete-li však Maldacenův abstraktnější argument, načrtnutý v minulé podkapitole, začne být poruchová vada vlastně výpočetní předností. Podobně jako v případě strunových dualit v 5. kapitole, i bulko-hraniční slovník překládá odstrašující, vysokou vazbovou konstantou sužované výpočty v jednom teoretickém rámci do přímočarých výpočtů s nízkou vazbovou konstantou v tom druhém. V několika posledních letech byla tato skutečnost zužitkována ve výpočtech, které lze experimentálně testovat.

Relativistický srážkový urychlovač těžkých iontů RHIC (z anglického Relativistic Heavy Ion Collider) v Brookhavenu ve státě New York sráží jádra zlata o rychlosti jen o málo menší než rychlost světla. Protože tato jádra obsahují mnoho protonů a neutronů, vyvolávají srážkami částicovou bouři o teplotě až 200 000krát vyšší, než jaká panuje v jádru Slunce. To je teplota dostatečná na to, aby se protony a neutrony přeměnily v tekutinu z kvarků a gluonů, které mezi kvarky působí. Fyzici vynaložili velké úsilí, aby toto tekuté skupenství zvané *kvarko-gluonové plazma* pochopili, protože je pravděpodobné, že se v takovém skupenství ocitla hmota chvíli po velkém třesku.

Úkol je to obtížný, protože kvantová teorie pole (*kvantová chromodynamika*) popisující tuto horkou polévku s kvarky a gluony má vysokou hodnotu vazbové konstanty, kvůli čemuž jsou poruchové metody nepřesné. Tuto překážku měly obejít rozmanité geniální metody, ale experimentální měření neustále některé teoretické výsledky vyvracela. Například když tekutina – ať už voda, šťáva nebo kvarko-gluonové plazma – teče, každá její vrstva působí třecí silou na vrstvy nad ní i pod ní. Tato třecí síla je známa jako *smyková viskozita*. Experimenty na RHIC měřily smykovou viskozitu kvarko-gluonového plazmatu a dospěly k hodnotám daleko nižším, než byly ty předpověděné poruchovými výpočty v kvantové teorii pole.

Jak tedy problém řešit? Holografický princip poskytuje jednu možnou odpověď. Když jsem jej představoval, zvolil jsem pohled, podle něhož se všechno to, co prožíváme, odehrává uvnitř časoprostoru. A přidal jsem k němu neočekávanou zápletku – představu, že se na vzdálené hranici odehrávají jevy, v nichž se ty první zrcadlí. Teď celou logiku převrátíme. Představte si, že náš vesmír – nebo přesněji: kvarky a gluony v našem vesmíru – obývá hranici; tam tedy probíhají i experimenty na RHIC. A teď si přizvěme na pomoc Maldacenu. Jeho výsledek ukazuje, že experimenty na RHIC (popsané kvantovou teorií pole) lze alternativně matematicky popsat v řeči strun, které se pohybují v bulku. Detaily takového popisu jsou složité, ale proč je užitečné problém takto přeformulovat, pochopíme okamžitě: obtížné výpočty v popisu s hranicí (v němž je vazbová konstanta vysoká) se promění na snadnější výpočty v bulku (kde je vazbová konstanta nízká).¹⁷

Pavel Kovtun, Andrej Starinac a Dam Son takové matematické výpočty provedli. Nalezli výsledek působivě blízký experimentálním údajům. Jejich průkopnická práce inspirovala celou armádu teoretiků k řadě dalších výpočtů ve strunové teorii; chtěli tak nalézt styčný bod s pozorováními na RHIC. Stimulovali tím intenzivní souhru mezi teorií a experimentem, což byla pro strunové teoretiky vítaná novinka.

Neztrácejte ze zřetele, že teorie na hranici nepopisuje náš vesmír zcela, protože v ní kromě dalšího chybí gravitační pole. To nemá vliv na srovnávání s údaji z RHIC, protože v těchto experimentech mají částice (navzdory své téměř světelné rychlosti) natolik malou hmotnost, že u nich gravitační síla nehraje téměř žádnou úlohu. Z tohoto faktu je jasné, že ve službách RHIC nehraje strunová teorie žádnou roli „teorie všeho“, poskytuje jen nový výpočetní nástroj, s nímž lze překonat překážky, které stály v cestě tradičnějším metodám. Analýzu kvarků a gluonů na základě vícerozměrné teorie strun lze skromně považovat za účinný matematický trik inspirovaný strunami. O něco ambicióznější je představa, že vícerozměrný strunový popis je v jistém smyslu, a to ještě ne zcela pochopeném, fyzikálně reálný.

Nehledě na to, zda přijmeme či nepřijmeme opatrný pohled, je výsledné přibližování matematických výsledků k experimentálním pozorováním nesku-

tečně působivé. Nijak si nelibují v nadsázkách, ale tyto teoretické úspěchy řadím k těm nejúžasnějším za poslední desítky let. Z matematických manipulací, v nichž se uplatňují struny pohybující se konkrétním desetiřozměrným časoprostorem, se dozvídáme mnoho nového o kvarcích a gluonech, které obývají čtyřrozměrný časoprostor – a to, co se z těchto výpočtů dozvídáme, je podepřeno i experimenty.

Kóda čili závěr: budoucnost teorie strun

Myšlenkový vývoj, který jsme v této kapitole sledovali, svým dosahem překračuje hranice strunové teorie samotné. Trmáceli jsme se klikatou cestou, hledanou fyziky desítky let, a dospěli jsme k spletité síti výsledků a myšlenek, od Wheelerova pohledu na vesmír jako na informační procesor, přes skloubení druhého termodynamického zákona s černými dírami a přes zjištění, že černé díry uchovávají na svém povrchu informaci, až k pochopení toho, že černé díry mají monopol na maximální informaci, kterou je možné do oblasti prostoru napěchovat. Naše cesta, překypující pozoruhodnými poznatky, nás zavedla až k novému druhu sjednocení fyziky – k holografickému principu. Podle tohoto principu, jak jsme viděli, se všechno to, co prožíváme, odráží na vzdálené a tenounké ploše ohraničující svět uvnitř. Když pohlížím do budoucnosti, předpokládám, že holografický princip zůstane pro fyziky majákem i po velkou část 21. století.

Strunoví teoretici považují holografický princip za součást strunové teorie. Poskytuje jim konkrétní příklady holografických paralelních světů, což dokazuje, že se nejnovější teoretické výsledky sbíhají do jednoho bodu, do jedné působivé syntézy. Fakt, že nám tyto příklady dodaly základnu pro zcela konkrétní výpočty a že některé z výsledků byly porovnány s experimenty v reálném světě, je uspokojivý krok na cestě vedoucí k začlenění holografického principu do experimentálně ověřitelné vědy. Ale na všechny tyto poznatky lze nazírat i z pohledu strunové teorie; tam vedou k ještě obecnějšímu poučení.

Po více než tři desítky let od chvíle, kdy se teorie strun poprvé objevila, chyběla fyzikům úplná matematická definice teorie. První teoretici strun přišli s obecnými představami o vibrujících strunách a o dodatečných rozměrech, ale celé desítky let intenzivního výzkumu zůstaly matematické základy teorie přibližné, a tudíž neúplné. Maldacenuv poznatek je zásadní změnou k lepšímu. Odrůda kvantové teorie pole, kterou Maldacena identifikoval jako popis jevů na hranici, patří mezi matematicky nejlépe chápané teorie, které částicoví fyzici studovali od poloviny 20. století. Tyto teorie neobsahují gravitaci a to je jejich velká přednost, protože, jak jsme viděli, pokusy o přímé začlenění obecné relativity do kvantové teorie pole vždycky připomínaly posezení u táborového ohně v továrně na střelný prach. Teď jsme zjistili, že tato matematicky přívětivá, negravitační kvantová teorie pole *vytváří* strunovou

teorii – teorii, která gravitaci obsahuje – holografickým způsobem. Tato teorie ovládá vesmír ze svého řídicího centra na hranici vesmíru (jehož specifický tvar je znázorněn na straně 252), a obsahuje tak všechny fyzikální vlastnosti, procesy a interakce strun, které se pohybují uvnitř. Toto spojení lze přímo vyjádřit slovníkem, který překládá jevy mezi oběma jazyky. A protože máme k dispozici spolehlivou matematickou definici kvantové teorie pole na hranici, *můžeme ji použít i jako matematickou definici strunové teorie*, alespoň pro struny, které se pohybují tímto tvarem časoprostoru. Holografické paralelní vesmíry mohou být tedy něčím víc než jen potenciálním výhonkem fundamentálních zákonů; mohou být součástí definice fundamentálních zákonů samotných.¹⁸

Když jsem ve 4. kapitole uvedl na scénu teorii strun, řekl jsem, že zapadá do odzkoušené tradice, protože poskytuje nový pohled na přírodní zákony, ale nezavrhuje zcela teorie starší. Poznatky uvedené v této kapitole takovou toleranci ke starším teoriím zesilují zásadním způsobem. Teorie strun není jen složitější teorií, která se za jistých okolností redukuje na kvantovou teorii pole. Maldacenuv výsledek naznačuje, že strunová teorie a kvantová teorie pole jsou ekvivalentními pohledy na fyzikální jevy, jen vyjádřenými v různých jazycích. Překlad mezi nimi je složitý, a proto uběhlo více než čtyřicet let, než toto spojení vyšlo na světlo. Jsou-li Maldaceny poznatky zcela platné, a všechny dostupné údaje tomu nasvědčují, pak teorie strun a kvantová teorie pole mohou být dvěma stranami téže mince.

Fyzici teď pilně pracují na zobecnění těchto metod, aby je bylo možné aplikovat na vesmír libovolného tvaru; je-li strunová teorie tou správnou teorií vesmíru, měla by zahrnovat i ten náš. Ale dokonce i s dnešními omezeními lze říct, že byly vybudovány pevné základy pro budoucí pokrok, neboť máme konečně k dispozici solidní definici teorie, na níž jsme mnoho let pracovali. A to určitě mnoha fyzikům stačí k tomu, aby se dali do zpěvu a tance.

Kapitola desátá

Vesmíry, počítače a matematická realita

Simulované a definitivní multivesmíry

Teorie paralelních vesmírů, s nimiž jsme se setkali v předchozích kapitolách, se zrodily z matematických zákonů, které fyzici našli při svém úsilí o nejhlubší pochopení toho, jak funguje příroda. Tyto zákony se dramaticky liší svou věrohodností – kvantová mechanika je považována za prokázaný fakt, inflační kosmologie nachází podporu v pozorováních, teorie strun je zcela spekulativní – stejně jako povahou a mírou logické nezbytnosti paralelních světů, které se od těchto teorií odvíjejí. Všechny tyto zákony však mají i něco společného. Předáme-li řízení matematické podstatě nejdůležitějších fyzikálních zákonů, nakonec nás doveze do jedné z odrůd paralelních světů.

Podívejme se na to teď z jiného úhlu. Co se stane, když se řízení ujmete my? Můžeme my, lidé, zasahovat do toho, jak se kosmos vyvíjí, a záměrně vytvářet vesmíry paralelní s tím naším? Věříte-li stejně jako já, že chování živých bytostí je ovládáno přírodními zákony, potom takový plán ani nebudete považovat za pohled z jiného úhlu, ale spíše za zúžení pohledu na důsledky fyzikálních zákonů v případě, že jsou servírovány za účasti člověka. Takovým uvažováním se rychle zapleteme do pavučiny odvěkých záhad, jako je determinismus a svobodná vůle, ale těmto problémům se věnovat nechci. Raději bych chtěl znát odpověď na otázku, zda můžeme vytvořit vesmír se stejným pocitem svobodné volby a kontroly nad situací, jako když si vybíráme film nebo jídlo.

Otázka má nádech fantazie. A fantazií také je. Předem vás musím varovat, že při zodpovídání této otázky se ocitáme na území ještě spekulativnějším než ve všech předchozích kapitolách, a když si uvědomíte, o čem všem jsme už mluvili, tak to srovnání opravdu o něčem vypovídá. Ale užijme si trochu zábavy a podívejme se, kam až se dostaneme. Rád bych nejdříve vysvětlil pravidla hry. Když se zamyslíme nad vytvářením vesmírů, nepůjde nám o praktická omezení, ale o možnosti, které jsou k dispozici podle fyzikálních zákonů. Takže kdykoli budu mluvit o „vás“, bytostech vytvářejících vesmír, budu mít vždy na mysli vás, vašeho vzdáleného praprotomka nebo celou armádu takových praprotomků někdy za tisíce let. Dnešní nebo budoucí lidské bytosti budou stále podřízeny fyzikálním zákonům, ale já budu předpokládat, že bu-

dou mít k dispozici libovolně vyspělé technologie. Budu se také zajímat o vytváření dvou různých druhů vesmíru. Obvyklých vesmírů, které se rozprostírají v prostoru a jsou vyplněny různými formami hmoty a energie. A vesmírů méně hmatatelného druhu: půjde o virtuální vesmíry, jež se zrodily na počítačích. Přirozeně nás diskuse zavede i k třetí odrůdě multivesmírů. V tomto případě nepůjde o vytváření vesmírů samotné, ale o otázku, zda je matematika „skutečná“, nebo je jen produktem lidské mysli.

Jak vytvořit vesmír

Navzdory nejistotám ohledně složení vesmíru – Co je to skrytá (temná) energie? Jak vypadá úplný seznam fundamentálních částicových ingrediencí? – jsou vědci přesvědčeni, že kdyby zvážili všechno, co se nachází uvnitř našeho kosmického horizontu, zjistili by, že se tam ukrývá na 10 000 miliard miliard miliard miliard tun hmoty. Kdyby šlo o hmotnost výrazně nižší nebo výrazně vyšší, gravitační vliv této hmoty na reliktní záření by velikost skvrn na obrázku na straně 61 viditelně zmenšil nebo zvětšil, což by protirečilo pracovaným měřením jejich úhlové velikosti. Přesná hmotnost pozorovatelného vesmíru je však teď podružná, důležité je jen to, že jde o číslo ohromné. Tak ohromné, že představa o tom, jak my, lidé, vytváříme ještě jeden takový svět, vypadá pošetile.

Vezmeme-li za předlohu pro náš plán stvořit nový vesmír kosmologii velkého třesku, nenajdeme v ní žádný recept, jak tuto překážku překonat. Podle standardní teorie velkého třesku byl pozorovatelný vesmír ve stále ranějších okamžicích menší a menší, zato obsahoval vždy to ohromné množství hmoty a energie, které dnes měříme, jen stlačované do stále menšího objemu. Chcete-li stvořit vesmír podobný tomu, který nás dnes obklopuje, musíte začít s polotovary o stejné hmotnosti a stejné energii, jež dnes ve vesmíru pozorujeme. Teorie velkého třesku považuje ohromné množství tohoto surového materiálu za nevysvětlitelný předpoklad.¹

Zhruba řečeno nás dějiny velkého třesku učí, že pro vznik vesmíru, jako je ten náš, potřebujeme shromáždit obrovské množství hmoty a stlačit je do fantasticky malého objemu. I kdyby se nám to povedlo, byt' je to dost nepravděpodobné, čelili bychom další překážce. Jak nastartovat velký třesk? Tento problém začne být ještě ožehavější, když si vzpomene, že velký třesk není exploze, která se odehrává uvnitř statické oblasti prostoru; velký třesk pohání rozpínání prostoru samotného.

Kdyby byla teorie velkého třesku posledním slovem v kosmologii, snaha vědců o stvoření umělého vesmíru by tímto skončila. Ona tím však nekončí. Viděli jsme, že teorie velkého třesku uvolnila místo robustnější inflační kosmologii. A inflace nabízí způsob, jak se pohnout z místa. Protože má inflace patent na explozivní rozpínání prostoru, dodává velkému třesku samotný

počáteční třesk, který, když už o tom mluvím, je navíc dost velký; podle inflační teorie je prvotním hybatelem, který rozpínání prostoru nastartoval, závan antigravitace. A stejně důležité, jak hned uvidíme, je i to, že podle inflačních výpočtů lze to nesmírné množství hmoty *vyždímat* z neobyčejně skromného semínka.

Vzpomeňte si, že podle 3. kapitoly vznikl vesmír jako ten náš – podle inflačního paradigmatu jedna díra v kosmickém ementálu – proto, že se hodnota inflatonového pole skutálela po křivce potenciální energie dolů a tam nakonec ukončila fenomenální rozpínání v našem kosmickém okolí. Jak velikost inflatonu poklesla, energie v něm obsažená se změnila v lázeň částic, které naši bublinu rovnoměrně vyplnily. V této lázni má hmota, kterou dnes pozorujeme, svůj původ. Pohnuli jsme se kupředu, ale vyvstává další otázka: Co je zdrojem energie inflatonového pole?

Ten zdroj se skrývá v gravitaci. Uváděli jsme, že inflační rozpínání se podobá rozmnožování viru: inflatonové pole o vysoké hodnotě nutí oblast, kterou vyplňuje, aby rychle rostla, čímž objem prostoru, který je vyplněn inflatonovým polem o stejné vysoké hodnotě, nabývá na velikosti. A poněvadž homogenní inflatonové pole přidává konstantní množství energie do každé jednotky objemu, narůstá celková energie tohoto pole s objemem, jež vyplňuje. Hnací silou rozpínání je gravitace – ve svém odpudivém přestrojení. Tak je gravitace i zdrojem stále vyšší energie, kterou oblast obsahuje.

Inflační kosmologii bychom tak mohli přirovnat k čerpadlu, které neustále přečerpává energii z gravitačního pole do pole inflatonového. Na první pohled jsme jen vytloukli klín klínem – Kde získává gravitace *svou* energii? –, ale ve skutečnosti jsme situaci o hodně vylepšili. Gravitační se od ostatních sil liší, protože kde je gravitace, tam je i prakticky nevyčerpatelná zásobárna energie. Tato dobře známá myšlenka je jen vyjádřena v neobvyklém jazyce. Když skočíte z útesu, začne vaše kinetická energie – energie vašeho pohybu – narůstat. Zdrojem této energie je gravitační síla, která váš pohyb pohání. V reálné situaci nakonec narazíte na zem, ale v principu byste mohli spadnout jakkoli daleko a proletět stále se prodlužující norou, zatímco vaše kinetická energie by stále rostla. Jak je možné, že gravitace dokáže tělesa zásobovat takto neomezeným množstvím energie? Důvod tkví v tom, že se stejně jako americké ministerstvo financí nijak neobává dluhů. Když padáte a vaše energie je kladná a stále vyšší, gravitace to kompenzuje, protože její energie se stává stále více zápornou. Intuitivně víte, že gravitační energie je záporná, protože na to, abyste z nory vylezli, musíte spotřebovat kladnou energii – musíte tlačit nohama na horninu pod sebou a přitahovat se rukama nahoru; tak splatíte energetický dluh, za který gravitace vašim jménem převzala odpovědnost.²

Podstatný závěr zní: když se oblast vyplněná inflatonem rapidně rozpíná, inflaton čerpá energii z nevyčerpatelných gravitačních zdrojů, a proto i ener-

gie oblasti velmi rychle roste. A protože inflatonové pole poskytuje energii, která se proměňuje v obyčejnou hmotu, inflační kosmologie – na rozdíl od modelu velkého třesku – nepotřebuje na zformování planet, hvězd a galaxií žádný surový materiál. Jde-li o hmotu, je gravitace štědrý mecenáš.

Jediný další materiální dar, který inflační kosmologie vyžaduje, je počáteční inflační semínko, tedy malé kulové zrnko prostoru vyplněné inflatonovým polem o vysoké hodnotě, které úplně na začátku inflační rozpínání uvede do pohybu. Když dosadíte čísla, rovnice vám řeknou, že to semínko může být pouhých 10^{-28} metru velké a musí být vyplněno inflačním polem o energii, která v přepočtu na hmotnost představuje méně než 10 gramů.³ Než byste řekli švec, prošlo by takové drobné semínko úctyhodným rozpínáním a narostlo by do velikosti daleko větší, než je pozorovatelný vesmír, zatímco by se stalo útočištěm stále většího množství energie. Úhrnná energie inflatonu by bleskurychle narostla nad úroveň nezbytnou ke zrodu všech hvězd ve všech galaxiích, jež pozorujeme. A tak můžeme úkol dříve neřešitelný – shromáždit 10^{52} kilogramů hmoty a stlačit ji do nekonečně malého smítka prostoru – radikálně zjednodušit, posadíme-li inflaci na místo kosmologického řidiče. Stačilo by 10 gramů inflatonového pole stlačit do žmolku o průměru 10^{-28} metru. Takovou hrudku byste mohli s klidem strčit do peněženky.

I tento postup má ne jeden háček. Prvním je fakt, že inflaton zůstává i nadále čistě hypotetickým polem. Kosmologové bez výčitek svědomí inflatonové pole zahrnují do svých rovnic, třebaže – na rozdíl od elektronového nebo kvarkového pole – nemají pro jeho existenci zatím žádné důkazy. Druhý háček spočívá v tom, že i kdyby inflaton existoval a i kdybychom se s ním naučili manipulovat jako dnes s elektromagnetickým polem, *hustota* potřebného inflatonového semínka by stále byla ohromná: asi 10^{67} krát větší než hustota atomového jádra. Ačkoli by tedy celkově semínko vážilo méně než hrst pražené kukuřice, tlaková síla potřebná ke kompresi by byla bilion bilionkrát větší, než jsme dnes schopni vyvinout.

A to je právě onen druh technologických překážek, jež – jak optimisticky předpokládáme – libovolně vyspělá budoucí civilizace jednoho dne překoná. Takže když naši vzdálení praprotomci jednoho dne inflatonové pole zkontrolují a zkonstruují kompresory schopné vyrobit takto hutná zrnka, získají postavení stvořitelů vesmíru? A když už takto plánujeme cestu lidstva na Olymp, neměli bychom se obávat toho, že tento nový vesmír, jehož inflační rozpínání nastartujeme, pohltí nakonec i naše končiny prostoru? Takové otázky si pokládal Alan Guth se skupinou spolupracovníků. Ze série jejich článků vzešly dvě zprávy. Dobrá a špatná. Začneme s tou dobrou, souvisí s naší poslední otázkou.

Guth spolu se Stevenem Blauem a Eduardem Guendelmanem ukázal, že není třeba se obávat, že by nová, uměle vytvořená fáze inflačního rozpínání zničila naše životní prostředí. Důvod souvisí s tlakem. Kdyby bylo inflační

semínko vytvořeno v laboratoři, uvnitř by respektovalo charakteristickou kladnou energii a záporný tlak inflatonového pole, ale bylo by stále obklopeno obyčejným prostorem, v němž se (alespoň přibližně) hodnota inflatonu i tlaku rovná nule.

Nule většinou příliš velkou sílu nepřisuzujeme, ale v tomto případě rozhoduje o všem. Nulový tlak je totiž větší než tlak záporný, a proto by tlak vně semínka převýšil tlak zevnitř. Semínko by se tak ocitlo pod vlivem vnější síly, která by je stlačovala podobně, jako hydrostatický tlak stlačuje vaše ušní bubínky při potápění. Tento rozdíl tlaků stačí zabránit semínku v prorůstání do okolního prostoru.

Na druhé straně tento tlak nebere inflatonu chuť pohánět rozpínání prostoru. Když nafukujete balonek a zároveň rukama svíráte jeho povrch, balonek si najde mezi vašimi rukama mezery a v nich se začnou tvořit bubliny. Inflatonové semínko se může chovat podobně. Produkuje novou rozpínající se oblast prostoru, která vyrůstá z původního okolního prostoru, jak znázorňuje malá rostoucí kulová plocha na straně 263. Z výpočtů vyplývá, že jakmile nová rozpínající se oblast dosáhne kritické velikosti, přetrhne se pupeční šňůra, která ji spojovala s mateřským prostorem (jako na poslední ilustraci na zmíněném obrázku) –, a zrodí se nezávislý vesmír v inflační fázi svého vývoje.

Tento proces zní neobyčejně lákavě – *umělá výroba nového vesmíru* –, ale při pohledu z laboratoře se nás zmocní pocit, že jsme koupili zajíce v pytli. Ulevili jsme si, když jsme zjistili, že inflační bublina nespolkne okolní prostředí, jenže tato dobrá zpráva má i svůj rub, neboť by neexistoval skoro žádný důkaz, že ke stvoření nového světa došlo. Vesmír, který se rozpíná tím, že vytváří nový prostor, jenž se následně odpojí od toho našeho, nelze pozorovat. A opravdu, když se nový vesmír odštípne, tak to jediné, co po něm zůstane, bude hluboká gravitační propast – přiblíží vám ji poslední kresba na uvedeném obrázku na straně 263 –, která by z našeho pohledu vypadala jako černá díra. A protože do černé díry vidět nemůžeme, nemohli bychom mít ani jistotu, že náš experiment skončil úspěchem; bez přístupu do nového vesmíru bychom neměli k dispozici žádný prostředek, s nímž bychom za pomoci pozorování mohli ukázat, že byl nový vesmír vůbec vytvořen.

Fyzikální zákony nás před nebezpečím, které v černé díře číhá, ochraňují, ale cenou za naši bezpečnost je naprosté oddělení od našeho řemeslného výrobku. A to je ta dobrá zpráva.

Špatnou zprávou pro aspiranty na stvořitele nových vesmírů je střízlivější výsledek. Odvodil jej Guth se svým kolegou na Massachusettském technickém institutu (MIT) Edwardem Farhim. Jejich pečlivý matematický rozbor ukázal, že posloupnost kroků na uvedeném obrázku vyžaduje ještě jednu ingredienci. Zjistili totiž, že právě zrozený vesmír (z tohoto obrázku) potřebuje silný kopanec, aby se v něm inflace rozběhla a pokračovala dále. Tento kopanec se trochu podobá první dávce vzduchu, kterou je často obtížné zpo-



V důsledku většího tlaku v okolním prostředí se inflační semínko musí rozpínat do nově vytvořeného prostoru. Jak vesmírná bublina narůstá, odpojuje se od mateřského vesmíru a stává se samostatnou, rozpínající se oblastí prostoru. Pozorovatel v okolním prostředí bude celý děj považovat za zrod černé díry.

čátku, než nafukování začne jít hladce, do mnoha typů balonů dostat. Potřebný kopanec musí být ve skutečnosti tak intenzivní, že ho může zajistit jen jeden objekt: bílá díra. Bílá díra, opak černé díry, je hypotetický objekt, který hmotu chrlí, místo aby ji vtahoval. To vyžaduje podmínky natolik extrémní, že tu známé matematické metody (podobně jako ve středu černé díry) přestávají fungovat; stačí říct, že nikdo neočekává, že by v laboratoři bílé díry někdy vůbec vytvořil. Guth a Farhi našli v projektu na výrobu vesmírů podstatnou konstrukční vadu.

Od té doby se řada výzkumných skupin snažila přijít na to, jak problém obejít. Guth a Farhi, k nimž se připojil Jemal Guven, zjistili, že vytvořením inflačního semínka se s pomocí kvantového tunelového jevu (jevu podobného tomu, o němž jsme mluvili v kontextu krajinného vesmíru) lze singularitě uvnitř bílé díry vyhnout, jenže pravděpodobnost kvantového tunelového jevu s potřebnými vlastnostmi je tak fantasticky nízká, že v podstatě neexistuje žádná naděje, že k němu dojde za libovolně dlouhé období, o němž má smysl podle kohokoli přemítat. Skupina japonských fyziků – Nobujuki Sakaji, Ken-Iči Nakao, Hideki Išihara a Makoto Kobajaši – ukázala, že katalyzátorem inflačního rozpínání může být magnetický monopol, hypotetická částice obsahující samotný severní nebo samotný jižní pól obyčejného tyčového magnetu, čímž se také vyhneme singularitám, ovšem za téměř čtyřicet let intenzivního hledání nebyla žádná taková částice nalezena.*

Dnes lze situaci shrnout tak, že dveře do továrny na nové vesmíry zůstávají pootevřené jen trochu. Protože zatím předložené návrhy zcela spoléhají na hypotetické prvky, budoucí poznatky možná tyto dveře uzavřou nadobro. Ale když se tak nestane – nebo když budoucí výzkum přinese nové dobré

* Je ironií osudu, že vysvětlení toho, proč zatím nebyly nalezeny magnetické monopóly (ač jsou předpověděny mnoha typy jednotných teorií), tkví v tom, že jejich populace byla rozředěna při rychlém rozpínání prostoru v inflační fázi kosmologie. V textu ale mluvím o možnosti, že monopóly samotné hrají roli v odstartování budoucích inflačních epizod.

zprávy pro potenciální konstruktéry vesmírů –, bude vůbec existovat motivace k tomu, aby lidé v takových plánech pokračovali? Proč vytvářet nějaký nový vesmír, když ho nemáme naději uvidět nebo s ním interagovat, a dokonce ani vědět, zda vytvořen *byl*? Andrej Linde, vědec slavný nejen kvůli hlubokým kosmologickým poznatkům, ale i pro své přirozené nadání k divadelním fraškám, poznamenal, že pokusení vyrovnat se Bohu by nakonec bylo neodolatelné.

Nejsem si tím jistý. Připouštím, že by bylo úžasné, kdybychom přírodní zákony pochopili natolik, abychom dokázali zopakovat nejpodstatnější události všeho bytí. Mám ale za to, že v době, kdy budeme moci o stvoření nového vesmíru vážně přemýšlet – pokud tato doba vůbec někdy nastane –, už vědecko-technický pokrok umožní tolik dalších velkolepých aktivit, jejichž výsledky si budeme moci nejen představovat, ale i prožívat, že kvůli své nehmatatelné povaze nebude už výroba nových vesmírů tak atraktivní.

Tato vize by jistě byla přitažlivější, kdybychom se naučili vyrábět vesmíry, které bychom viděli nebo s nimiž bychom mohli navázat kontakt. U „skutečných“ vesmírů, u vesmírů v obvyklém chápání slova „vesmír“, založených na standardních ingrediencích, na času, prostoru, hmotě a energii, dosud neznáme žádnou strategii, jíž bychom toho docílili a která by byla slučitelná s fyzikálními zákony, jak jim dnes rozumíme.

Ale co když necháme skutečné vesmíry na pokoji a zamyslíme se nad těmi virtuálními?

Materiál, z něhož jsou myšlenky

Před několika lety jsem prodělal chřipku s vysokými horečkami a halucinacemi daleko realističtějšími, než jsou obyčejné sny a noční můry. Vybavuji si stále jednu vidinu. Seděl jsem spolu s dalšími lidmi ve velkém hotelovém pokoji a prožíval halucinace vnořené do halucinace. Byl jsem si zcela jistý, že utekly celé dny a týdny – a když jsem se vrátil do primární halucinace, ke svému údivu jsem zjistil, že neuběhl čas skoro žádný. Pokaždé když jsem cítil, že mě do tohoto pokoje něco znovu táhne, jsem tomu vnitřnímu volání usilovně odolával, protože jsem z předchozích úrovní halucinace věděl, že jakmile se tam ocitnu, halucinace mě zcela pohltí a nebudu schopen rozpoznat realitu od iluze – než se zase navrátím do primární halucinace, kde se mnou opět otřeše zjištění, že to, co jsem právě prožil, byla jen iluze. Pravidelně, když horečka ustupovala, jsem se vracel o jednu úroveň nazpět, tedy do obyčejného života, a uvědomoval si, že veškeré to přemísťování se odehrávalo čistě v mé zjištěné myslí.

Většinou mi horečka nic objeveného neřekne. Ale tato zkušenost přidala pocit bezprostřednosti něčemu, co jsem do té doby chápal v podstatě jen na abstraktní úrovni. Náš kontakt s realitou je daleko mlhavější a neurčitěj-

ší, než bychom mohli na základě každodenního života předpokládat. Jen trošku upravte obvyklé funkce mozku, a skalní lože podepírající realitu se třeba najednou pohne; vnější svět si udrží svou stabilitu, zato naše vnímání světa nikoli. Z toho pramení klasická filozofická otázka. Jsou-li naše zážitky filtrovány a analyzovány našimi mozky, nakolik jistí si můžeme být tím, že naše vjemy odrážejí skutečnost? Nebo – jak se ptají filozofové – podle čeho víte, že teď čtete tuto větu a nevznášíte se ve zkumavce na vzdálené planetě, kde mimozemšťané simulují váš mozek a vytvářejí myšlenky a zážitky, které považujete za skutečné?

Jde o problémy klíčové pro gnozeologii čili epistemologii, podobor filozofie, který se ptá, v čem spočívá vědění, jak je získáváme a jak jsme si jistí, že je máme. Masová kultura naservírovala toto bádání učenců širokému publiku ve filmech jako *Matrix*, *Třinácté patro* a *Vanilkové nebe*, které téma ztvárnily zábavným a zároveň inspirujícím způsobem. V lidovějším jazyce se tedy přibližně ptáme na to, jak si můžeme být jistí, že nejsme uvězněni v matrixu.

Odpověď zní, že jistí si být nemůžeme. Účastníky událostí ve světě se cítíme díky svým smyslům, které stimulují náš mozek podněty, jež se naše neuronová síť evolučním vývojem naučila interpretovat. Když někdo stimuluje váš mozek podněty, jimiž vyvolá úplně stejný elektrický vzruch jako ten, který přináší konzumace pizzy, čtení této věty nebo seskok padákem, nebudou se vaše vjemy lišit od těch opravdových. Povaha prožitků je určena mozkovými procesy, nikoli tím, co tyto procesy aktivuje.

Uděláme-li ještě jeden krok vpřed, můžeme své vjemy plně oddělit od kašovitého biologického materiálu uvnitř našich lebek. Nemohly by všechny naše myšlenky a vjemy být pouhou simulací spuštěnou na dostatečně propracovaném systému obvodů a softwaru, který imituje obyčejnou funkci našeho mozku? Nemůžeme být přesvědčeni o realitě masa, krve a fyzikálního světa i přesto, že naše vjemy jsou ve skutečnosti pouhou posloupností elektrických impulzů šířících se nadměrně pokročilým superpočítačem?

Uvažujeme-li tímto způsobem, okamžitě čelíme nebezpečí, že se takové scénáře snadno zvrtnou do eskalující spirály skepse vůči všemu; v konečném důsledku přestaneme věřit všemu, dokonce i schopnosti svého vlastního deduktivního úsudku. Když mi někdo položí otázku, zda jsme uvězněni v matrixu, hned mu doporučím, aby si spočítal, kolik počítačové kapacity je třeba k simulaci lidského mozku. Ale jsem-li opravdu součástí takové simulace, proč bych měl věřit čemukoli, co se v knihách dočtu o neurobiologii? I knihy by byly simulacemi, napsanými simulovanými biology, jejichž poznatky by byly určeny programem, který simulaci obhospodařuje, a proto by nemusely hrát žádnou úlohu ve fungování „opravdových“ mozků. Samotný pojem „opravdového“ mozku by mohl být i počítačem generovaný trik. Nemůže-li člověk věřit své vlastní znalostní bázi, realita se rychle rozpustí jako kostka cukru v moři.

K těmto záležitostem se ještě vrátíme, ale samozřejmě že nechci, abychom se rozpustili – alespoň zatím ne. Takže alespoň protentokrát necháme kostku v cukřence. Představte si, že vaše tělo je z masa a proudí jím opravdová krev, stejně jako tím mým, a že všechno, co považujeme za skutečné, v běžném smyslu slova opravdu skutečné je. S takovými předpoklady se podívejme na otázku výkonu počítačů a mozků. Jaká je zhruba rychlost zpracovávání informace v lidském mozku a dá se tento údaj srovnat s výkonem počítačů?

Dokonce i když nezabředneme do močálu skepse vůči všemu, jde stále o obtížnou otázku. Jak mozek funguje, zůstává ještě z velké části neznámé. Avšak abychom si přece jen udělali jakous takous, byť mlhavou představu, má smysl podívat se na několik čísel. Lidská oční sítnice, tenká vrstva se 100 milionů (10^8) neuronů, v průměru menší než 1 centimetr a tlustá jako několik listů papíru, je nejlépe prostudovaným typem seskupení nervových buněk. Hans Moravec, odborník na robotiku, odhadl, že počítačová varianta systému oční sítnice, jež by se lidské sítnici vyrovnala, by musela vykonat asi miliardu operací za sekundu. Abyste se dostali od objemu sítnice k objemu celého mozku, nezbyvá než všechna tato čísla zvětšit asi stotisíckrát; Moravec tvrdí, že efektivní simulace mozku by vyžadovala podobný nárůst výpočetní kapacity, tedy asi na 100 bilionů (10^{14}) operací za sekundu.⁴ Nezávislé odhady postavené na počtu synapsí v mozku a jejich typických frekvencích vzruchů vedou až na několik řádů ke srovnatelným odhadům, přibližně k 10^{17} operacím za sekundu. Uvést přesnější údaje je obtížné, ale můžeme získat alespoň hrubou představu o zmíněných číslech. Počítač, který teď používám, vykoná kolem miliardy (10^9) operací za sekundu; nejrychlejší počítače světa dnes provedou maximálně 10^{15} operací za sekundu (kvůli tomuto údaji tato kniha jistě rychle zastará). Vezmeme-li rychlejší ze dvou odhadů rychlosti mozku, pak se lidskému mozku přibližuje svou rychlostí 100 milionů (10^8) notebooků nebo sto superpočítačů.

Všetchna tato srovnání jsou téměř určitě naivní: záhady mozku mají mnoho dimenzí a rychlost je jen jedním, hrubým ukazatelem jeho funkčnosti. Skoro všichni však souhlasí, že jednoho dne budeme mít hrubou počítačovou kapacitu rovnou té, kterou nám poskytla příroda, a možná mnohem vyšší. Futuristé tvrdí, že takové skoky v technologii povedou ke světu, který natolik přesáhne naši zkušenost, že si jej ani neumíme představit. Tito vizionáři nazývají takový nepředstavitelný svět, v analogii s jevy, které leží za hranicemi i našich nejrafinovanějších fyzikálních teorií, slovem „singularita“. Podle jedné nastíněné prognózy jakmile počítače svým výkonem převyší kapacitu mozku, zcela se hranice mezi člověkem a technikou smaže. Někteří z vizionářů očekávají svět, v němž se přemnoží myslící a citící stroje, kdežto ti z nás, kteří se budou nadále pachtit ve staromódních biologických procesech, si rutinně nahrají obsah svého mozku na disk, čímž bezpečně uskladní znalosti a svou osobnost *in silico*, tedy do křemíku, a takové záložní disky jim zajistí i neomezenou

trvanlivost.* Podobná vize je s velkou pravděpodobností nadsázkou. Zatímco o rostoucím výkonu počítačů není pochyb, tou neznámou v celé rovnici je, zda tento nárůst někdy využijeme k radikální fúzi mysli a strojů. Tato moderní otázka má své kořeny ve starověku; o myšlení už lidé dumali celé tisíce let. Jak je možné, že vnější svět vyvolává naše vnitřní reakce? Vnímáte barvy stejně jako já? A co pocity spojené se zvukem a dotykem? Co je přesně ten hlas, který zní uvnitř našich hlav, ten proud vnitřního švitoření, jemuž říkáme vlastní vědomí? Je odrazem ryze fyzikálních procesů? Nebo vědomí pramení z úrovně reality, která fyzikální svět přesahuje? Pronikaví myslitelé – Platon a Aristoteles, Hobbes a Descartes, Hume a Kant, Kierkegaard a Nietzsche, James a Freud, Wittgenstein a Turing a nesčetní další – se procesy, jež oživují mysl a vytvářejí individuální vnitřní život, který je dostupný prostřednictvím zkoumání vlastního nitra, pokusili objasnit (nebo vyvrátit).

Objevila se dlouhá řada teorií o mysli, které se liší v podstatných věcech i v detailech. Do jemnějších aspektů se pouštět nebudeme, zmíním jen několik základních druhů teorií, k nimž hloubání dospělo. *Dualismus*, směr o mnoha odrůdách, tvrdí, že existuje podstatná nefyzikální složka, která je pro existenci duševna životně důležitá. *Fyzikalismus*, který má také řadu odnoží, to popírá a zdůrazňuje, že každý jednotlivý subjektivní vjem je spojen s konkrétním a jedinečným stavem mozku. *Funkcionalismus* jde v tomto směru ještě dále a hlásá, že při vzniku mysli skutečně záleží jen na procesech a funkcích – obvodech a spojeních a souvislostech mezi nimi –, a ne na detailních znalostech fyzikálního média, v němž tyto procesy probíhají.

Fyzikalisté jsou obecně zajedno v tom, že kdybyste pečlivě okopírovali můj mozek, a to libovolným způsobem – molekulu po molekule, atom po atomu –, výsledný produkt by skutečně přemýšlel a cítil stejně jako já. Funkcionalisté by většinou soudili, že kdybyste se soustředili na struktury na vyšší úrovni – a replikovali všechna spojení v mém mozku, zatímco byste zachovali všechny mozkové procesy a změnili pouze fyzikální substrát, v němž se odehrávají –, pořád by platil stejný závěr. Většina dualistů by odmítla obě tvrzení.

Názor, že pocity a vědomí lze zkonstruovat uměle, očividně vyžaduje funkcionalistické vysvětlení původu duševna. Takový pohled na duševno vychází z klíčového předpokladu, že sebe si uvědomující myšlenky nejsou pouhou ozdobou mozku, ale že pocity *jsou* nerozlučně spojené s konkrétním druhem zpracovávání informace. A není podstatné, zda k tomuto zpracovávání informace dochází v jednodílném tělese tvořeném biologickým materiálem nebo v obvodech počítače. Takový předpoklad by mohl být chybný. Aby množina spojů získala vědomí, vyžaduje možná i substrát ve formě zvrátně

* Latinského výrazu se užívá od roku 1989 v analogii s biologickými termíny *in vivo* a *in vitro* (pozn. překl.).

navlhle hmoty. Aby vědomí vdechlo život do jinak neživé hmoty, jsou možná nutná i opravdové fyzikální molekuly, z nichž se mozek skládá, a nikoli jen spojení a procesy těmito molekulami umožněné. A možná se druh zpracovávání informace, jehož budou v budoucnosti počítače schopny, bude vždycky v něčem zásadním lišit od fungování mozku, a proto nebudou mít počítače nikdy vědomí. Možná je vědomí svou podstatou nefyzikální povahy, jak tvrdí různá náboženství a jiné tradice, a tudíž leží trvale mimo dosah technologických inovací.

S tím, jak vynalézáme stále důmyslnější technologie, nabývají tyto otázky na konkrétnosti a cesta k odpovědím se před námi rýsuje stále zřetelněji. První kroky k simulaci biologického mozku na počítači učinilo několik výzkumných skupin. Například Blue Brain Project, společný podnik IBM a Švýcarské vysoké technické školy z Lausanne, je věnován modelování funkce mozku na nejnovějším superpočítači firmy IBM. Jejich superpočítač Blue Gene je výkonnější verzí Deep Blue, počítače, který v roce 1997 triumfoval nad šachovým velmistrem Garrym Kasparovem. Postup v projektu Blue Brain se vlastně příliš neliší od toho, co jsem popisoval. Pečlivým anatomickým rozбором skutečných mozků shromažďují badatelé stále přesnější údaje o buněčných, genetických a molekulárních strukturách nervových buněk (neuronů) a jejich spojení. Snaží se přeložit tuto strukturu, zatím hlavně na buněčné úrovni, do digitálních modelů simulovaných na počítači Blue Gene. Do dnešního dne čerpali výzkumníci z výsledků desetitisíců experimentů zaměřených na oblast krysího mozku o velikosti špendlíkové hlavičky, takzvaného kortikálního sloupce mozkové kůry, aby vyvinuli třírozměrnou počítačovou simulaci asi 10 000 nervových buněk komunikujících prostřednictvím přibližně 10 milionů spojení. Srovnání reakcí kortikálních sloupců mozkové kůry v opravdové kryse a počítačové simulace stejných podnětů naznačují, že výstižnost umělého modelu je povzbuzující. Má však ještě daleko do chování necelé stovky miliard neuronů, které si předávají vzruchy v typickém dospělém lidském mozku. Vedoucí projektu, neurobiolog Henry Markram, však očekává, že se do roku 2020 Blue Brain Project dočká očekávaného zrychlení mikroprocesorů na milionkrát vyšší kapacity, než mají ty dnešní, což bude stačit k úplné modelové simulaci lidského mozku. Cílem uvedeného projektu není vytvořit umělé vědomí, ale spíše poskytnout lékařům nového „zkušebního králíka“, na němž by si ověřovali nové metody, jak léčit mentální choroby, byť se Markram nebál veřejně spekulovat o tom, že až projekt skončí, může mít Blue Brain schopnost mluvit a cítit.

Ať už projekt skončí úspěšně či ne, je takové prakticky založené zkoumání klíčové pro naše teorie duševna; mám za to, že čistě hypotetickými spekulacemi nelze rozhodnout, která ze soupeřících hypotéz, pokud vůbec nějaká, je správná. Praktické překážky jsou ale také nabíledni. Předpokládejme, že se nám počítač jednoho dne svěří, že má vědomí a pocity. Jak ověřit, že tomu

tak skutečně je? Těžko můžu prověřit takové prohlášení u manželky. Ani ona nemůže ověřit moje myšlenky. To je důsledek privátní povahy vědomí. Ale protože naše mezilidské interakce přinášejí velké množství nepřímých důkazů o tom, že i ostatní lidé mají vědomí a pocity, zastávat pozice solipsismu se zdá absurdní. Počítačové interakce mohou jednoho dne dospět do stejného bodu. Až budeme někdy v budoucnosti s počítači konverzovat, utěšovat je a získávat si je lichotkami, nejspíše tomu, že nejjednodušším vysvětlením jejich zdánlivého sebeuvědomění a vědomí je to, že jsou si své existence skutečně vědomi, uvěříme.

Předpokládejme, že zastánci funkcionalistického názoru mají pravdu, a podívejme se, kam nás to dovede.

Simulované vesmíry

Pokud někdy na počítačovém základě sestrojíme umělé vědomí, někteří výzkumníci celkem určitě implantují tyto myslící stroje do umělých lidských těl a stvoří mechanické druhy – roboty, které (nebo kteří) se postupně začlení do běžné reality. Teď se však chci zaměřit na ty z nás, které fascinuje čistota elektrických impulzů a nejráději by naprogramovali simulovaná prostředí uvnitř hardwaru počítače obývaná simulovanými bytostmi; místo zlatého robota C-3PO ze *Star Wars (Hvězdných válek)* nebo nadporučíka Data ze *Star Treku* byste měli uvažovat o počítačových hrách *Simíci* nebo *Second Life*, jejichž protagonisté jsou ovšem vybaveni vědomím a vnímavými dušemi. Historie technologické inovace naznačuje, že po mnoha vylepšeních by simulace získaly věrohodnost a fyzikální a empirické vlastnosti umělých světů by nabyly přesvědčivé jemnosti a úrovně realismu. Ten, kdo by danou simulaci spustil, by rozhodl, zda mají simulované bytosti vědět, že existují jen uvnitř počítače; simulované lidské bytosti, které by vytušily, že jejich svět je jen důmyslný počítačový program, by mohly být odstraněny simulovanými údržbáři v bílých pláštích a uvězněny v uzamčených simulovaných celách. Ale pravděpodobně naprostá většina simulovaných bytostí by považovala myšlenku, že žijí v počítačové simulaci, za příliš směšnou na to, aby si zasloužila jejich pozornost.

Vaše reakce v tuto chvíli může být úplně stejná. I když možnost umělého vědomí přijmete, ohromná složitost simulací celé civilizace nebo i menšího společenství vás může přesvědčit o tom, že takový úkol je za hranicemi možností počítačové techniky. V tomto kontextu se vyplatí podívat na několik dalších čísel. Naši vzdálení praprotomci budou pravděpodobně do obřích výpočetních sítí začleňovat stále větší množství hmoty. A tak povolte uzdu fantazii. Myslete ve velkém stylu. Vědci odhadli, že rychlý počítač dnešního typu zvětšený do rozměru zeměkoule by vykonal něco mezi 10^{33} a 10^{42} operací za sekundu. Pro srovnání: předpokládáme-li, že náš předchozí odhad – 10^{17} operací za sekundu

v jednom lidském mozku – byl trefou do černého, potom průměrný mozek za 100 let života vykoná celkem asi 10^{26} operací. Násobte to přibližně 100 miliard lidí, kteří se někdy po planetě procházeli, a vyjde vám, že počet operací vykonaných všemi lidskými mozky od Lucy (mí archeologičtí přátelé mi našeptávají, že bych měl napsat „Ardi“) se pohybuje kolem 10^{37} . I když u počítače o velikosti Země předpokládáme skromnější odhad 10^{33} operací za sekundu, vidíme, že kolektivní výpočetní kapacitu celého lidského druhu zreprodukuje během pár hodin.

A to mluvíme jen o dnešní technologii. Kvantové počítače, které mohou zapřáhnout do práce všechny možnosti zastoupené v kvantové pravděpodobnostní vlně, takže mohou provádět mnoho výpočtů současně, skrývají potenciál, že jednou zvýší rychlost výpočtů na velkolepý mnohonásobek rychlosti dnešní. Ačkoli máme ještě daleko do naprostého zvládnutí této aplikace kvantové mechaniky, výzkumníci odhadli, že kvantový počítač velký jako notebook by byl schopný vykonat množství operací odpovídající celému lidskému myšlení od rozbřesku našeho druhu v nepatrném zlomku sekundy.

Abychom mohli simulovat nejen jednotlivé mozky, ale i jejich vzájemné interakce a interakce s vyvíjejícím se prostředím, musel by výpočetní úvazek narůst o několik řádů. Důmyslná simulace by však mohla eliminovat mnoho nepodstatných věcí, aniž by tím byla dotčena její kvalita. Simulovaným lidským bytostem na simulované Zemi by nevadilo, kdyby počítač simuloval jen věci uvnitř kosmického horizontu. Za tuto hranici nelze vidět, a proto ji počítač může klidně ignorovat. Ještě odvážněji by simulace mohla nahradit hvězdy kromě Slunce pouhými simulovanými nocemi; ty by navíc mohla vypnout, kdyby simulované místní počasí bylo oblačné. Kdykoli se nikdo nedívá, mohl by si počítačový simulátor hvězdné oblohy odpočinout od výpočtů vjemu, který má jinak připravený pro každou bytost, jež by se *mohla* na nebe dívat. Dostatečně dobře strukturovaný program by sledoval mentální stav a záměry svých simulovaných obyvatel, a tak by mohl očekávat něčí blížící se pozorování oblohy a odpovídajícím způsobem na ně reagovat. Totéž lze říct o simulovaných buňkách, molekulách a atomech. Ve většině případů by byly třeba jen pro simulované specialisty v jedné nebo druhé vědecké disciplíně, a to jen v době, kdy tito specialisté tyto exotické otázky studují. Postačila by výpočetně levnější replika dobře známé reality, která přizpůsobuje úroveň detailů v simulaci podle potřeb.

Takové simulované světy by byly působivou realizací Wheelerovy vize o nadřazenosti informace. Vyrobite obvody obsahující tu správnou informaci, a stvoříte paralelní realitu, realitu pro své protagonisty stejně reálnou, jako je ta naše pro nás. Tyto simulace představují osmou odrůdu multivesmíru, které budu říkat *simulovaný multivesmír*.

Žijete v simulaci?

Myšlenka, že vesmíry lze simulovat na počítačích, má dlouhou historii. Přišel s ní už v šedesátých letech počítačový průkopník Konrad Zuse a digitální guru Edward Fredkin. Pět let jsem během letních měsíců – buď jako vysokoškolák, nebo postgraduální student – pracoval v IBM. Můj vedoucí, nebožtík John Cocke, ctěný počítačový specialista, mluvil často o Fredkinově názoru, že vesmír není ničím jiným než obrovským počítačem, který pracuje naplno a vykonává instrukce podobající se kosmickému Fortranu. Takový názor mně připadal jako extrapolace digitálního paradigmatu do směšných extrémů. Dlouhá léta jsem si na tuto myšlenku skoro ani nevzpomněl – až jsem se nedávno setkal s jednoduchým, ale zvláštním závěrem oxfordského filozofa Nicka Bostroma.

Abyste mohli Bostromův postřeh (k němuž nesměle směřoval i Moravec) ocenit, začněte přímočarým srovnáním obtížnosti vzniku reálného vesmíru a obtížnosti vytvoření vesmíru simulovaného. K stvoření opravdového vesmíru je, jak jsme viděli, třeba zdolat nesmírné překážky. A i kdybychom uspěli, nebyli bychom schopni výsledný vesmír pozorovat. Odtud plynou pochybnosti, zda bychom vůbec měli motivaci k takové činnosti.

Výroba simulovaného vesmíru je podnik zcela odlišný. Neustálé zvyšování výkonu počítačů, na nichž běží stále důmyslnější programy, pokračuje neúprosným tempem. A lidé jsou vytvářením simulovaných prostředí doslova fascinováni i dnes, kdy je technologie teprve na začátku; jakmile její schopnosti vzrostou, zájem o simulace skoro určitě ještě zesílí. Otázka tedy nezní, zda naši potomci budou vytvářet simulované počítačové světy. To děláme už dnes. Neznámou je jen to, jak realistické tyto světy budou. Jestliže vytvoření umělého vědomí brání nepřekonatelná překážka, realismus nepomůže. Bostrom, předpokládaje, že realistické simulace možné budou, si ale všiml něčeho prostého a zajímavého.

Naši potomci jistě vytvoří ohromné množství simulovaných vesmírů, obyčasných ohromným počtem vědomých a vnímavých bytostí. Jestliže se někdo může večer po návratu domů odreagovat tím, že spustí software na výrobu vesmíru, přirozeně můžeme očekávat, že tak nejen učiní, ale bude to dělat i často. Zamyslete se, co z takového scénáře vyplývá. Když jednoho krásného dne v budoucnosti proběhne kosmické sčítání lidu, které započte všechny vnímavé bytosti, zjistí, že počet lidí z masa a kostí bledne ve srovnání s počtem bytostí vytvořených z čipů a bajtů nebo jejich budoucích náhražek. A kdyby byl rozdíl v počtu simulovaných a opravdových lidí kolosálně velký, tak by podle Bostroma přibližná statistická úvaha naznačovala, že ani *my* nežijeme v opravdovém vesmíru. Pravděpodobnostní počet by výrazně preferoval závěr, že vy a já a všichni ostatní žijeme v simulaci, možná v jedné z těch vytvořených budoucími historiky fascinovanými tím, jak vypadal život na Zemi v 21. století.

Můžete namítnout, že jsme najeli plnou parou na mělčiny skepse, jimž jsme se chtěli od začátku vyhnout. Jestliže usoudíme, že pravděpodobnost, že žijeme v počítačové simulaci, je vysoká, neměli bychom přestat věřit všemu, i těm argumentům, které nás k tomuto závěru dovedly? Naše důvěra v mnoho věcí by opravdu mohla poklesnout. Vyjde zítra Slunce? Možná, pokud ten, kdo si se simulací hraje, nevytáhne kabel ze zásuvky. Můžeme věřit své paměti? Vypadá to tak, ale ten, kdo sedí u klávesnice a hraje si s námi, může mít zálibu občas obsah naší paměti změnit.

Bostrom ale poznamenává, že ani závěr, že žijeme v simulaci, náš kontakt s opravdovou realitou v pozadí všech jevů nepodkopává, alespoň ne zcela. Třebaže věříme tomu, že žijeme v simulaci, můžeme si pořád všimnout jedné vlastnosti, kterou opravdová realita určitě má: umožňuje realistické počítačové simulace. Koneckonců věříme tomu, že v jedné z nich žijeme. Bezuzdná skepse poháněná podezřením, že jsme simulováni, je v souladu s naším závěrem, nemůže ho tedy podkopávat. Na začátku jsme se rozhodli nechat cukr v cukřence a prohlásit za skutečné všechno, co jako skutečné vypadá. To bylo sice užitečné, ale ne nutné rozhodnutí. Čistou logikou nelze zajistit ani dokázat, že v počítačové simulaci nežijeme.

Jediným způsobem, jak se vyhnout závěru, že pravděpodobně žijeme v simulaci, je zdůraznit slabiny celé úvahy. Možná vědomí jednoduše nelze simulovat. Tečka. A možná, jak Bostrom soudí, civilizace na prahu technologické vyspělosti nezbytné k vytvoření vnímavých simulací jsou předurčeny k tomu, aby techniku obrátily proti sobě a zničily se. A možná že naši vzdálení prapotomci sice schopnost tvořit simulované vesmíry získají, ale nerozhodnou se pro takový krok, snad z mravních důvodů nebo proto, že pro ně bude další, v dnešní době nemyslitelná činnost mnohem zajímavější, jak jsme uvedli už v případě stvoření vesmírů, a proto simulace vesmírů odsunou na vedlejší kolej.

Zadní vrátka si můžeme nechat otevřená několika způsoby, ale zda jsou dostatečná k tomu, aby jimi projel příslovečný nákladák, nevíme.* Jestliže tomu tak není, potom vám doporučuji, abyste si život zpestřili a dali o sobě vědět. Ať už simulaci spustil kdokoli, jistě ho nakonec omrzí tuctové kvítky rostoucí na periférii. Stát se středem zájmu může být dost dobrá strategie, jak docílit dlouhověkosti.⁵

* Další skulinka, skrze kterou lze před závěrem utéct, souvisí s problémem míry ze 7. kapitoly. Je-li počet skutečných (nevirtuálních) vesmírů nekonečný (jsme-li například částí sešivaného multivesmíru), potom bude existovat nekonečná množina světů podobných tomu našemu, v nichž budou prapotomci spouštět simulace a vytvářet nekonečný počet simulovaných světů. Třebaže by se stále zdálo, že počet simulovaných světů by výrazně převyšoval počet těch skutečných, v 7. kapitole jsme viděli, že srovnávání nekonečen je záludná aktivita.

Jak vidět za hranice simulace

Mohli byste zjistit, že žijete v simulaci? Odpověď do značné míry závisí na tom, kdo simulaci spustil – nazývejme ji Simulátorka –, a na způsobu, jak vaši simulaci naprogramoval. Simulátorka se například může rozhodnout, že se vám s tím tajemstvím svěří. Jednoho dne, když se budete sprchovat, uslyšíte možná jemné cinknutí, a jakmile si spláchnete šampon z očí, spatříte vznášející se okno, v němž se objeví usmívající se Simulátorka a představí se vám. A možná se to tajemství, že žijete v simulaci, odhalí na globální úrovni. Obří okna a dunivý hlas zaplaví planetu a ohlásí celému světu, že fakticky v nebesích existuje Všemohoucí programátorka. Ale i kdyby byla vaše Simulátorka stydlivá a podobnému exhibicionismu se vyhýbala, možná objevíte i méně nápadná znamení.

Simulace umožňující existenci vnímavých bytostí by jistě dosáhly prahu minimální věrohodnosti, ale stejně jako v případě značkového oblečení a vyřazených exemplářů by patrně jejich kvalita i ucelenost kolísala. Například jeden přístup k programování simulací – řikejme mu „emergentní strategie“ – by čerpal z nahromaděné zásobárny lidského vědění a uvážlivě by si vybíral vhodnou perspektivu podle kontextu. Srážky protonů v částicových urychlovačích by byly simulovány za pomoci kvantové teorie pole, trajektorie odpáleného baseballového míčku zase na základě Newtonových zákonů. Reakci matky na první kroky jejího dítěte by program napodoboval za pomoci kombinace biochemie, fyziologie a psychologie. Počiny vládních představitelů by byly zakotveny v politologii, historii a ekonomice. Protože by tato strategie využívala směsici různých přístupů k simulaci různých aspektů umělé reality, musela by nějak zaručit soulad mezi jednotlivými částmi, protože procesy původně spojované s jednou disciplínou by mohly „přetéct“ do disciplíny jiné. Psychiatr nemusí zrovna ovládat buněčné, chemické, molekulární, atomové či subatomární procesy projevující se jako mozková činnost – to je dobrá zpráva pro psychiatrii. Když by se však simulovala osoba, bylo by pro emergentní strategii obtížné, aby bez jakýchkoli rozporů skloubila hrubou úroveň informace s jemnějšími a aby zaručila, že například citové a kognitivní funkce se rozumně shodují a překrývají s fyziiochemickými údaji. Tento překryv mezi disciplínami se objevuje ve všech jevech a odjakživa byl důvodem, proč vědci hledali hlubší a univerzálnější vysvětlení.

Simulátory založené na emergentních strategiích by musely eliminovat neshody mezi výsledky různých metod a musely by zaručit, že na sebe jednotlivé disciplíny hladce navážou. To by se neobešlo bez triků a modifikací, které by se z pohledu obyvatel projevíly jako náhlé a nepochopitelné změny prostředí, bez zjevné příčiny nebo vysvětlení. A interpolace mezi disciplínami by nejspíše nebyla zcela efektivní: výsledné rozpory by se časem hromadily a po určité době by mohly být tak vážné, že by do sebe části světa přestaly zapadat a simulace by se zhroutila.

Zabránit takovým potížím by mohl jiný přístup – řikejme mu „ultraredukcionistická strategie“. Podle něho by se simulace řídila jedinou sadou fundamentálních rovnic – jak to podle názoru fyziků dělá i vesmír kolem nás. Do takových simulací by se jako vstupní údaj vložila matematická teorie hmoty a fundamentálních sil i „počáteční podmínky“ (jak svět vypadal na začátku simulace); počítač by pak všechno rozvíjel v čase, čímž by se vyhnul problémům se spojitým navázáním výsledků jednotlivých částí programu, které tak trápily emergentní strategii. Simulace tohoto druhu by se však potýkaly s vlastními výpočetními problémy, a to nejen se šokujícím výpočetním břemenem v podobě simulace „všeho“, tedy i chování jednotlivých částic. Budou-li se rovnice, které budou mít následující generace k dispozici, podobat těm, s nimiž pracujeme dnes, tedy rovnicím pracujícím s čísly, jež se mohou spojitě měnit, potom by simulace nutně pracovaly s aproximacemi. Abychom *přesně* simulovali vývoj spojitého čísla, museli bychom v každém okamžiku znát jeho hodnotu na nekonečný počet platných číslic (když se například taková veličina mění od 0,9 k 1,0, musí projít čísly 0,9, 0,95, 0,958, 0,9583, 0,95831, 0,958317 a tak dále, přičemž je k naprosté přesnosti třeba nekonečný počet číslic). A na to počítač s konečnými zdroji nemá: nebude mu stačit čas ani paměť. Pravděpodobně i kdyby byly použity ty *vůbec* nejhlubší rovnice, byly by výpočty probíhající na počítači nutně jen přibližné, což by vyústilo v postupné hromadění numerických chyb.*

„Chybami“ samozřejmě míním rozdíly mezi tím, co se objevuje v simulaci, a přesným popisem podle nejrafinovanějších fyzikálních teorií, které má simulační program k dispozici. Ale pro obyvatele, jako jste vy, kteří by žili uvnitř simulace, by matematické algoritmy použité v počítačovém programu *byly* platnými přírodními zákony. Otázka pak nezní, jak přesně matematické zákony, s nimiž pracuje počítač, odpovídají vnějšímu světu; představujeme si, že z vnitřku simulace vnější svět nelze pozorovat. Problémem simulovaného vesmíru je jen to, že když jsou jinak přesné matematické rovnice zpracovány nutně přibližnými manipulacemi na počítači, výpočty začnou být nestabilní. Chyby při zaokrouhlování, pokud se nashromáždí z ohromného množství dílčích výsledků, vyústí v rozporuplné závěry. Vy a další simulovaní vědci byste mohli zpozorovat abnormální experimentální výsledky; zákony známé z učebnic by najednou mohly plodit nepřesné předpovědi; měření, která po léta směřovala k jediné a mnohokrát potvrzené hodnotě, by mohla začít přinášet odlišné výsledky. Dlouhou dobu byste se vy i vaši simulovaní kolegové domnívali, že jste, podobně jako vaši předkové v minulých staletích a tisícile-

* Teorie, která umožňuje pouze konečný počet rozdílných stavů v konečném objemu prostoru (v souladu například s nerovnostmi pro entropii, zmiňovanými v předchozí kapitole), může stále obsahovat spojitě veličiny jako součást svého matematického formalismu. Tak je tomu například i v kvantové mechanice: hodnota pravděpodobnostní vlny se může spojitě měnit, přestože počet možných výsledků je pouze konečný.

tích, získali důkazy, že vaše finální teorie nebyla nakonec tak úplně konečná. Když byste kolektivně teorii prověřovali, možná byste našli nové myšlenky, rovnice a principy, které lépe popisují pozorované údaje. Ale předpokládáme-li, že tyto nepřesnosti by nezpůsobily zhroucení programu, nakonec byste při svém úsilí zabředli do slepé uličky.

Po vyčerpávajícím hledání možných vysvětlení, z nichž žádnému se zcela nepodařilo vysvětlit, co se děje, by nějaký kacířský myslitel – a byla by to žena – navrhl radikálně odlišný krok. Kdyby se zákony založené na spojitých číslech, které fyzici našli několik tisíc let, přepsaly do digitálního počítače a užily k vytvoření simulovaného vesmíru, numerické chyby z nezbytných aproximací by se nakonec nahromadily a dospěly by k anomáliím přesně toho typu, který všichni pozorovali. „Chcete tím naznačit, že žijeme v počítačové simulaci?“ zeptali byste se. „Ano,“ odpověděla by kolegyně. „To je nesmysl,“ odušili byste. „Opravdu? Pořádně se podívejte.“ A ukázala by vám na monitoru simulovaný svět, který naprogramovala na základě těchž hlubokých zákonů fyziky. Jakmile byste se vzpamatovali ze šoku, že jste se vůbec setkali s nějakým simulovaným světem, viděli byste, že simulovaní vědci na monitoru si skutečně lámali hlavu se stejným druhem podivných údajů, jaký trápil i vás.⁶

Simulátorka, která by se snažila po sobě pořádně zamést stopy, by samozřejmě mohla použít agresivnější taktiky. Jakmile by se začaly hromadit nesrovnalosti, mohla by program resetovat a z paměti obyvatel vymazat vzpomínky na anomálie. Nelze tedy s jistotou tvrdit, že simulovaná realita by odhalila svou povahu drobnými kazy a nelogičnostmi. A já bych osobně asi nadále tvrdil, že logické nesrovnalosti, anomálie, nezodpovězené otázky a zastavený pokrok neodrážejí nic více než naše vlastní vědecké neúspěchy. Taková matoucí pozorování by šlo rozumně interpretovat tak, že my vědci musíme usilovněji pracovat a být při hledání vysvětlení nápaditější. Z našeho podivinského vyprávění o Simulátorce ovšem vyplývá jeden vážný závěr. Jestliže někdy vytvoříme simulované světy se zjevně vnímavými obyvateli, vynoří se podstatná otázka: Lze opodstatněně věřit tomu, že žijeme ve vzácné epoše dějin vědecko-technického rozvoje – tedy že jsme se stali prvními tvůrci simulací s vnímavými bytostmi? *Možná* lze – ale věříme-li pravděpodobnostnímu počtu, musíme zvážit i vysvětlení alternativní, podle nichž zase tak výjimeční být nemusíme. A jedno takové vysvětlení, které tuto podmínku splňuje, je už v dosahu. Jakmile nás naše vlastní práce přesvědčí, že vnímající simulace jsou možné, pak podle principu „průměrnosti“, který jsme rozebírali v 7. kapitole, nejde jen o jednu simulaci, ale hned o celý oceán simulací – simulovaný multivesmír. Třebaže námi vytvořená simulace může být průlomovým úspěchem v omezené oblasti, do níž máme přístup, nejde o nic zvláštního na úrovni celého simulovaného multivesmíru, kde k podobné simulaci došlo – užijeme-li fiktivního čísla oblíbeného mezi Američany – nejméně gadzilionkrát. Když

tuto myšlenku přijmeme, dospějeme k názoru, že i my bychom mohli být součástí simulace, protože totéž platí i pro naprostou většinu vnímajících bytostí v simulovaném multivesmíru.

Důkaz existence umělého vědomí a simulovaných světů by se tedy stal podnětem k přehodnocení povahy naší vlastní reality.

Babylonská knihovna

V prvním semestru na vysoké škole jsem si zapsal úvod do filozofie, který přednášel nebožtík Robert Nozick. Hned od první přednášky to pro mě byla divoká jízda. Nozick právě dokončoval rozsáhlé dílo *Filozofická vysvětlení*; celý kurz mu sloužil jako generální zkouška k ověřování řady jeho klíčových argumentů. Téměř každá jeho přednáška otřásla mým chápáním světa, někdy i zásadně. To pro mě bylo něco neočekávaného. Myslel jsem si, že na převracení reality vzhůru nohama budou mít monopol fyzikální přednášky. Přesto byl mezi oběma obory podstatný rozdíl. Fyzikální přednášky rozvracely pohodlné názory tak, že odhalovaly podivné jevy nastávající ve zcela neznámých situacích, v nichž se objekty pohybují velmi rychle, jsou nesmírně těžké nebo fantasticky titěrné. Přednášky z filozofie zase tím, že zpochybňovaly základy *každodenní* zkušenosti a podkopávaly pohodlné názory. Jak víme, že existuje reálný svět? Máme věřit svým vjemům? Jakou nití a jak jsou svázány naše molekuly a atomy, aby zachovaly naši osobní identitu i po určité době?

Když jsem jednou po přednášce zůstal v posluchárně, Nozick se mě zeptal, o co se zajímám, a já mu bezostyšně odpověděl, že chci pracovat na kvantové gravitaci a jednotných teoriích. Taková odpověď obvykle hrála v konverzaci roli ruční brzdy, pro Nozicka však byla příležitostí vzdělat mladou duši tím, že jí nabídne novou perspektivu. „Od jakého cíle se odvíjí tvůj zájem?“ zeptal se. Řekl jsem mu, že chci nalézt věčné pravdy a pomoci lidstvu pochopit, proč jsou věci takové, jaké jsou. Byla to nepochybně naivní a chvástavá odpověď. Nozick mně však pozorně naslouchal a potom posunul náš rozhovor o další krok vpřed. „Předpokládejme, že jednotnou teorii naleznáš,“ řekl. „Nabídla by ti skutečně odpovědi, které hledáš? Netrápila by tě i potom otázka, proč byla tou správnou teorií vesmíru právě tato teorie, a ne jiná?“ Měl samozřejmě pravdu, ale já tehdy odpověděl, že při hledání vysvětlení podstaty vesmíru můžeme dospět do bodu, v němž jisté předpoklady přijmeme jako fakta. A přesně k tomuto výroku mě Nozick chtěl dotlačit; když psal *Filozofická vysvětlení*, rozvinul k tomuto pohledu alternativu. Stojí na něčem, co nazval principem plodnosti, a je to pokus, jak nalézt kontext pro vysvětlení, aniž bychom „přijali jisté věci jako fakta“: Nozickovými slovy – aniž bychom cokoli přijali jako pravdu z pozice hrubé síly.

Jeho filozofický manévř byl přímočarý: stačí vzít otázce smysl popřením jejích předpokladů. Když nechcete vysvětlovat, proč jednu konkrétní teorii

povyšujete nad ostatní, jednoduše ji nepovyšujte. Nozick navrhuje, abychom si představili, že jsme součástí multivesmíru, který obsahuje *všechny možné vesmíry*.⁷ Takový multivesmír by obsahoval nejen alternativní výsledky experimentů podle kvantové mechaniky, nespočetné vesmírné bubliny předpověděné inflačním multivesmírem a možné strunové světy bránových a krajinných multivesmírů. Tyto multivesmíry by samy o sobě k realizaci Nozickova návrhu nestačily, protože i v jejich případě byste se mohli ptát: Proč kvantová mechanika? Nebo proč inflace? Proč strunová teorie? Místo toho můžete předložit *jakýkoli* možný vesmír – vesmír složený z obvyklých atomů a elementárních částic, ale třeba i vesmír, jehož podstatou je rozteklý sýr značky Mozzarella. I takový vesmír má v Nozickově schématu světa své místo.

Tímto posledním multivesmírem v této knize zakončím své vyprávění o multivesmírech, protože je to ten ze všech nejrozsáhlejší; žádný větší už existovat nemůže. Jakýkoli multivesmír, který už někdy byl nebo ještě bude navržen, je sám složen z možných vesmírů, a bude proto částí tohoto megakonglomerátu, jemuž budu říkat *definitivní multivesmír*. Když se teď zeptáte, proč je náš vesmír ovládnán zákony, které vyplývají z vědeckého výzkumu, odpověď se opět nese v duchu antropického uvažování: existují i další vesmíry, vlastně všechny vesmíry, a my obýváme tento právě proto, že patří mezi vesmíry, které umožňují takový život, jaký známe. V dalších vesmírech, kde bychom mohli žít – a takových jsou mraky, protože například nenápadné změny různých fundamentálních fyzikálních parametrů jistě život zcela nevyhladí –, žijí lidé, kteří se nám podobají a kteří si pokládají stejnou otázku. A stejná odpověď platí i pro ně. Pointa je v tom, že samotná existence nemůže žádnému vesmíru zaručit výjimečné postavení, protože v definitivním multivesmíru existují *všechny* vesmíry. Otázka, proč jedna sada zákonů popisuje reálný vesmír – ten náš –, zatímco ostatní sady jsou sterilní abstrakce, proto ztratí smysl. Žádné sterilní zákony neexistují. Všechny sady zákonů popisují skutečné vesmíry.

Zajímavý je i Nozickův postřeh, že v jeho multivesmíru se nalézá i vesmír, který neobsahuje nic. Absolutně nic. Nemíním tím prázdný prostor, ale totéž nic, na něž narážel Gottfried von Leibniz ve své slavné otázce: „Proč jest spíše něco nežli nic?“ Ve mně tento postřeh mimořádně rezonoval, byť Nozick patrně o mých pocitech nevěděl. Když mi bylo deset nebo jedenáct let, narazil jsem na Leibnizovu otázku a hluboce mě znepokojila. Chodil jsem po pokoji a pokoušel se pochopit, jaké by to bylo, kdyby nic nebylo, často s jednou rukou v týle, a myslel jsem si, že úsilí o nemožné – vidět svou ruku – by mi pomohlo pochopit smysl totální neexistence čehokoli. Ještě dnes, když se snažím soustředit na naprostou a opravdovou nicotu, mívám u srdce podivný pocit. Totální nicota z našeho hlediska něco představuje tu největší možnou ztrátu. Poněvadž je však nic o tolik jednodušší než něco – nejsou zapotřebí žádné zákony, neexistuje žádná hmota, žádný prostor, který lze obydlet, a žádný čas, který by se mohl rozvíjet –, Leibnizova otázka mi při-

padá neobvykle naléhavá. *Proč neexistuje nicota?* Byla by nesmírně elegantní.

V definitivním multivesmíru *existuje* vesmír, který neobsahuje vůbec nic. Pokud víme, nicota je dokonale bezproblémová logická možnost, a proto musí být do multivesmíru, který sdružuje všechny vesmíry, začleněna. Nozick tedy Leibnizovi odpovídá, že v definitivním multivesmíru žádná nerovnováha mezi něčím a ničím, která by vyžadovala vysvětlení, neexistuje. Součástí tohoto multivesmíru jsou vesmíry obou typů. Vesmír, v němž nic není, nenabízí nic, nad čím bychom si dále měli lámat hlavu. Vesmír s ničím se nám lidem zdá nepředstavitelný jen proto, že my sami jsme něco, ne nic.

Teoretik vycvičený v jazyce matematiky chápe Nozickův všeobjímající multivesmír jako ten, v němž jsou všechny možné matematické rovnice fyzikálně realizovány. Je analogický příběhu Jorgeho Luise Borgese *Babylonská knihovna* (*La Biblioteca de Babel*), v němž jsou v dotyčné knihovně knihy sepsány v řeči matematiky, a proto obsahují všechny možné rozumné, vzájemně si neprotiřečící řetězce matematických symbolů.* V některých knihách bychom našli dobře známé vzorečky, třeba rovnice obecné teorie relativity nebo kvantové mechaniky, aplikované na známé částice v přírodě. Takové rozpoznatelné řetězce matematických znaků by však byly extrémně vzácné. Většina knih by obsahovala rovnice, které nikdo předtím nenapsal, rovnice jinak považované za čisté abstrakce. Smyslem definitivního multivesmíru je toto intuitivní rozdělení zrušit. Už v něm neplatí, že většina rovnic leží ladem, zatímco pouze několika z nich vdechla tajemná fyzikální konkretizace život. Místo toho představuje *každá* kniha v knihovně matematického Babylonu skutečný vesmír.

Nozickův nápad přeložený do této matematické mluvy nabízí konkrétní odpověď na jednu dlouho diskutovanou otázku. Celá staletí si matematici a filozofové lámali hlavu nad tím, zda se matematika vynalézá, nebo objevuje. Existují „někde“ matematické pojmy a pravdy, které čekají, až na ně narazí nějaký chrabrý badatel? Anebo tyto matematické pojmy a pravdy vymyslel v průběhu hledání řádu a pravidelností nějaký učenec, který nejspíše sedí u stolu a tužkou čmárá ezoterické symboly na papír?

Na první pohled poskytuje tajuplný fakt, že dlouhá řada matematických aplikací nalézá uplatnění v přírodních jevech, přesvědčivý argument pro názor, že matematika je něco skutečného. Příkladů je celá řada. Od obecné relativity ke kvantové mechanice fyzici zjišťovali, že různé matematické objevy byly jakoby předurčeny k aplikacím ve fyzice. Předpověď pozitronu (antičástice elektronu), dílo Paula Diraca, je toho prostým, ale působivým a názorným příkladem. Když v roce 1931 Dirac řešil kvantové rovnice pro pohyb elektronu, zjistil, že z matematiky plynulo i jedno „nepatřičné“ řešení – zřejmě popi-

* Borges zahrnul všechny knihy o 410 stranách s libovolnými řetězci znaků, bez ohledu na jejich význam.

sující pohyb částice podobné elektronu –, ovšem nesoucí kladný elektrický náboj (zatímco elektron nese náboj záporný). O rok později, v roce 1932, přesně tuto částici objevil Carl Anderson, který podrobně studoval kosmické paprsky bombardující z okolního prostoru Zemi. Co začalo v Diracových notýscích jako hra s matematickými symboly, skončilo v laboratoři experimentálním objevem první částice antihmoty.

Skeptik může oponovat, že zdrojem matematiky zůstáváme nakonec stále my sami. Evoluce nás vycvičila k tomu, abychom ve svém prostředí nacházeli pravidelnosti; čím lepší jsme v tom byli, tím lépe jsme mohli předvídat, kde najdeme další potravu. Matematika, jazyk pravidelností, se zrodila díky naší biologické životaschopnosti. A s pomocí tohoto jazyka jsme byli schopni systematizovat hledání nových pravidelností, i těch pro samotné přežití nedůležitých. Ale matematika, stejně jako další nástroje, které jsme vyvinuli a používali celá tisíciletí, je lidským vynálezem.

Můj vlastní pohled na matematiku prochází periodicky proměnami. Kdykoli se ponořím do slibného matematického výzkumu, mívám pocit, že jsem na cestě k objevu, a ne k vynálezu. Neznám žádný vzrušivější zážitek než sledovat, jak různorodé díly matematické skládačky do sebe najednou zapadnou a splynou v jediném obrázku, který dává smysl. Když se tak stane, zmocní se mě pocit, že ten obrázek existoval vždycky, stejně jako velkolepý výhled na krajinu, který se předtím skrýval v ranní mlze. Když ale na matematiku pohlížím objektivnějším způsobem, jsem o tom přesvědčen méně. Co víme o matematice, jsme se dozvěděli od lidí, kteří se s neobvykle přesným matematickým jazykem obeznámili a svoje postřehy nějak zapsali. Matematická literatura je, stejně jako v případě literatury psané v jednom ze světových přirozených jazyků, produktem lidské vynalézavosti a tvořivosti. Tím netvrdím, že jiné inteligentní formy života by nemohly dospět ke stejným matematickým výsledkům jako my; patrně by k nim dospět mohly. Ale to by mohlo také být pouhým odrazem podobností našich prožitků (třeba potřeby věci počítat, obchodovat, mapovat a tak dále), a proto by to poskytlo jen velmi slabý argument pro existenci matematiky na našich vjemech nezávislé.

Před několika lety jsem v jedné veřejné debatě na toto téma prohlásil, že si dokážu představit setkání s mimozemšťany, při němž mimozemšťané poté, co uslyší o našich vědeckých teoriích, podotknou: „Jémine, matematika. Jo, s tou jsme to také chvíli zkoušeli. Zpočátku to vypadalo slibně, ale nakonec jsme se dostali do slepé uličky. Teď vám ukážeme, jak to funguje ve skutečnosti.“ Abych ještě jednou dokázal, že pokud jde o existenci matematiky na našich vjemech nezávislé, zůstávám i nadále nerozhodnutý; musím připustit, že nevím, jak by tento monolog mimozemšťana pokračoval. A jestliže definuji matematiku dostatečně obecným způsobem (například jako logické dedukce vyplývající ze sady předpokladů), ani vlastně nevím, jaký druh odpovědi by se *nedal* považovat za matematiku.

V představě definitivního multivesmíru se řeší tato otázka jednoznačně. Veškerá matematika je skutečná v tom smyslu, že popisuje nějaký skutečný vesmír. Všechny oblasti matematiky naleznou někde v multivesmíru uplatnění. Vesmír ovládaný Newtonovými rovnicemi a obývaný pouze pevnými kulečnickovými koulemi (bez jakékoli další vnitřní struktury) je skutečný vesmír, ale stejně tak je skutečný i prázdný vesmír se 666 prostorovými rozměry, v němž vládou vícerozměrné verze Einsteinových rovnic. Kdyby měli zmínění mimozemšťané pravdu, potom by existovaly i vesmíry, jejichž popis by se vymykal zákonům matematiky. Ale takovou možnost ignorujeme. Multivesmír, v němž se realizují všechny matematické rovnice, tedy definitivní multivesmír, k tomu, abychom měli o čem přemýšlet, zcela postačí.

Zdůvodnění multivesmíru

K definitivnímu multivesmíru nás zavedly jiné úvahy než v případě paralelních vesmírů, s nimiž jsme se setkali dříve. Multivesmírné teorie z předchozích kapitol nebyly vymyšleny proto, aby vyřešily konkrétní problém nebo odpověděly na konkrétní otázku. Některé z nich to sice dokážou – nebo to alespoň tvrdí –, ale to nebyl důvod, proč vznikly. Viděli jsme, že někteří teoretici věří, že kvantový multivesmír vyjasňuje problém kvantového měření, jiní věří, že cyklický multivesmír řeší problémy se začátkem času, další jsou přesvědčeni, že bránový multivesmír vysvětluje, proč je gravitace o tolik slabší než ostatní síly, a ještě další teoretici hlásají, že krajinný multivesmír nám něco říká o pozorované hodnotě skryté energie, a někteří věří, že holografický multivesmír popisuje to, co se děje při srážkách těžkých atomových jader. Tato úloha paralelních vesmírů je však druhořadá. K popisu mikrosvěta byla rozvinuta kvantová mechanika, inflační kosmologie byla rozpracována, aby dala smysl pozorovaným vlastnostem vesmíru, teorie strun zase usmířuje kvantovou mechaniku s obecnou relativitou. Jestliže tyto teorie vytvářejí různé druhy multivesmírů, jsou tyto multivesmíry pouhým vedlejším produktem těchto teorií.

Definitivní multivesmír naopak nenabízí žádnou schopnost vysvětlovat nějaké skutečnosti, až na vlastní předpoklad o existenci multivesmíru. Tato hypotéza plní pouze jeden úkol: vyškrtnout jednu položku z našeho seznamu pracovních úkolů. Konkrétně jde o úkol nalézt vysvětlení, proč vesmír lpí na jisté konkrétní sadě zákonů, a ne na nějaké jiné. Tento jediný úkol řeší právě tím, že zavádí nový multivesmír. Protože představu definitivního multivesmíru myslitelé předložili specificky kvůli této odpovědi, nemá žádné nezávislé zdůvodnění, jaké jsme nacházeli v případě multivesmírů v předchozích kapitolách.

Takový je i můj názor, s nímž ovšem někteří nesouhlasí. Například zastánci filozofického pohledu (nazývaného *strukturální realismus*) soudí, že fyziky

zmátlo falešné rozdělení matematiky a fyziky. Fyzici běžně mluví o matematice jako o kvantitativním jazyce užitečném pro popis fyzikální reality; sám jsem něco takového vyslovil téměř na každé stránce této knihy. Ale možná je matematika něco více než jen popis reality. Možná je to *realita sama*.

Je to podivná myšlenka. Nejsme zvyklí považovat hmotnou realitu za dílo vymodelované z nehmatatelné matematiky. Simulované vesmíry z předchozí podkapitoly nám však nabízejí konkrétní a poučný způsob, jak na to nazírat. Vzpomeňte si na nejslavnější z bezprostředních reakcí básníka Samuela Johnsona. Ten na poznámku biskupa Berkeleyho, že hmota je jen výplodem kouzlení mysli, zareagoval tak, že kopl do velkého balvanu. Představte si ale, že by se to kopnutí, aniž by to dr. Johnson věděl, odehrálo uvnitř hypotetické a velmi realistické počítačové simulace. V tomto simulovaném světě by zkušenost dr. Johnsona po nakopnutí balvanu byla právě tak přesvědčivá, jako byla v historické verzi příběhu. Ale počítačová simulace přece není ničím jiným než posloupností matematických manipulací, které podle určitých pravidel přeměňují stav počítače – komplikované uspořádání bitů – v jednom okamžiku na uspořádání bitů v následujících okamžicích.

A to znamená, že kdybyste chtěli záměrně studovat matematické transformace, které počítač provedl v průběhu extempore dr. Johnsona, uviděli byste přímo v řeči matematiky jak kopanec, tak i odrazení jeho nohy, stejně jako práci Johnsonovy mysli a z ní pramenící slavný výrok: „A tímto jest tvrzení vyvráceno.“ Připojte k tomu počítači monitor (nebo jiné budoucí rozhraní), a uvidíte matematicky roztančené bity, jež v sobě obsahují dr. Johnsona a jeho kopanec. Ale nepřipusťte, aby pozlátka počítačové simulace – počítačový hardware, důmyslné rozhraní a tak dále – zatemnila podstatný fakt: že se pod kapotou nehýbe nic jiného než matematika. Změní-li se matematická pravidla, tancující bity budou vyfukávat odlišnou realitu.

K simulaci jevů však žádný konkrétní hardware ani nepotřebujeme. Toho dr. Johnsona jsem umístil do simulace jen proto, že nám tento příklad posloužil jako názorný most mezi matematikou a realitou dr. Johnsona. Hlubším poučením z tohoto způsobu uvažování je, že počítačová simulace je jen nepodstatný mezičlánek, pouhý kámen uprostřed potoka, který nám umožňuje snáze překročit z břehu hmotného světa na abstraktní břeh matematických rovnic. Matematika samotná – prostřednictvím vztahů a souvislostí, které vytváří a dokazuje, a transformací, které ztělesňuje – obsahuje dr. Johnsona včetně jeho myšlenek a činů. Počítače není zapotřebí. Nepotřebujete ani tancující bity. *Dr. Johnsona lze v matematice najít.*⁸

A jakmile se vypořádáte s myšlenkou, že matematika samotná může díky své vlastní struktuře ztělesnit jakýkoli aspekt reality – vnímaté duše, těžké balvany, pořádné kopance a rozdrcené palce nohou –, potom dospíváte k představě, že *naše* realita není ničím jiným než matematikou. V tom způsobu

uvažování je všechno, čeho jste si vědomi – pocity vyvolané dotykem s touto knihou, myšlenky, které vám teď probíhají hlavou, plány na dnešní večeři –, prožitkem matematiky. Realita je způsob, jímž lze matematiku pocítit.

Připouštím, že tento pohled vyžaduje koncepční skok, který někteří nebudou chtít učinit; sám jsem se k němu zatím neodhodlal. Ale ti, kdo už ho mají za sebou, přijali světonázor, podle něhož matematika nejenže „někde existuje“, ona je dokonce jedinou věcí, která „někde existuje“. Kus matematiky, ať jsou to zákony Newtonovy, Einsteinovy nebo jiné, se nestane skutečným tak, že se objeví fyzikální entity, které se stanou jeho nositeli nebo znázorněním. Matematika – a to veškerá – už skutečná je; není třeba ji znázorňovat. Různé soustavy matematických rovnic jsou různé vesmíry. Definitivní multivesmír je proto vedlejším produktem tohoto pohledu na matematiku.

Max Tegmark z Massachusettského technického institutu (MIT) je horlivým zastáncem myšlenky definitivního multivesmíru (o němž mluví jako o hypotéze matematického vesmíru) a zdůvodňuje svůj pohled podobným argumentem. Nejhlubší popis vesmíru by neměl vyžadovat pojmy, jejichž význam závisí na lidské zkušenosti nebo interpretaci. Realita přesahuje naši existenci, a proto by v žádném fundamentálním smyslu neměla záviset na myšlenkách, které jsou naším dílem. Podle Tegmarka je matematika – chápaná jako sbírka operací (například sčítání) působících na abstraktní množiny objektů (kupříkladu na množinu celých čísel), která dokazuje různé vztahy mezi nimi (například $1 + 2 = 3$) – přesně ten jazyk, jímž lze vyjádřit výroky očištěné od stop člověka. Ale jak potom odlišit matematiku jako celek od vesmíru, jež zobrazuje? Podle Tegmarka nijak. Kdyby existovala nějaká vlastnost, která odlišuje matematiku od vesmíru, byla by nematematického rázu; jinak by mohla být přidána do matematického popisu, čímž by údajný rozdíl zmizel. Ale podle této šňůry úvah by taková nematematická vlastnost musela obsahovat otisk člověka, a proto by nemohla být fundamentální. A proto to, co standardně nazýváme matematickým popisem reality, nelze odlišit od jeho fyzikálního ztělesnění. Jsou jedno a totéž. Neexistuje páčka, která by mohla matematiku „zapnout“. Matematická existence je synonymem fyzikální existence. A jelikož by tento závěr platil pro jakoukoli matematiku, poskytl by nám i novou cestu k definitivnímu multivesmíru.

Hloubat nad podobnými argumenty může být sice inspirující, ale já vůči nim zůstávám skeptický. Když vyhodnocuji určitou hypotézu o multivesmíru, je pro mě důležité, aby existoval proces, jakkoli provizorní – fluktuující inflatonové pole, srážky mezi bránovými světy, kvantové tunelování mezi body v krajině strunové teorie, vlna vyvíjející se podle Schrödingerovy rovnice –, který si lze představit coby generátor multivesmíru. Dávám přednost tomu, jsou-li mé myšlenky zakotveny v posloupnosti událostí, které alespoň v principu mohou vyústit v evoluci daného multivesmíru. V případě defini-

tivního multivesmíru je obtížné si představit, co by takovým procesem mohlo být; takový proces by musel zajistit platnost různých matematických zákonů v různých oblastech. Viděli jsme, že se v inflačním a krajinném multivesmíru mohou fyzikální zákony projevat způsobem, který se mění od vesmíru k vesmíru, ale to lze vysvětlit odlišnostmi v prostředí, například v hodnotě jistých Higgsových polí nebo ve tvaru dodatečných rozměrů. Matematické rovnice operující v pozadí všech vesmírů jsou totožné. Takže jaký proces fungující v dané sadě matematických zákonů by mohl tyto zákony změnit? Zdá se to zkrátka nemožné, právě jako číslo pět zoufale se snažící stát číslem šest.

Než se rozhodnete pro tento závěr, že totiž nějaké konkrétní a neměnné fyzikální zákony v libovolně velkém multivesmíru musejí platit, uvažte, zda nemohou existovat oblasti, které *jako by* byly ovládané odlišnými matematickými pravidly. Vzpomeňte si znovu na simulované světy. V příběhu o dr. Johnsonovi jsem zmínil počítačovou simulaci jako metodický nástroj, s nímž jsem vysvětlil, jak se podstata existence může vtělit do matematiky. Když však uvažujeme o simulacích jako takových, což jsme dělali v kontextu simulovaného multivesmíru, vidíme, že nám nabízejí přesně ten proces, který jsme hledali: ačkoli je počítačový hardware, na němž simulace běží, podřízen obvyklým fyzikálním zákonům, byl by simulovaný svět samotný založen na matematických rovnicích, které si náhodou vybral uživatel. Matematické zákony se mohou měnit – obecně se budou měnit – od jedné simulace k druhé.

Jak hned uvidíme, poskytuje nám to mechanismus vytváření konkrétní privilegované části definitivního multivesmíru.

Jak simulovat Babylon

Už jsem uvedl, že počítačové simulace mohou zpracovávat pouze přibližné verze matematických rovnic nejčastěji studovaných ve fyzice. Tak je tomu v případě, že se digitální počítač musí vypořádat s reálnými čísly. Například v klasické fyzice (kde předpokládáme, že je časoprostor spojitý) proletí odpálený baseballový míček nekonečným počtem různých bodů, než se od domácí mety dostane do levého pole.⁹ Nikdy nebude možné sledovat pohyb míčku nekonečně mnoha body a s nekonečně mnoha různými rychlostmi v těchto bodech. V nejlepším případě mohou počítače vykonat sice vysoce rafinované, ale stále přibližné výpočty, sledující polohu míčku například každou miliontinu nebo miliardtinu sekundy. To v řadě případů stačí, třebaže jde stále jen o aproximaci. Kvantová mechanika a kvantová teorie pole zavádějí různé formy nespojitosti a celočíselnosti, které situaci v některých ohledech vylepšují. Ovšem obě stále systematicky využívají spojitě se měnících čísel (velikosti pravděpodobnostních vln, hodnoty polí a tak dále). Totéž uvažování platí

pro všechny ostatní standardní rovnice fyziky. Počítač může aproximovat matematiku, ale nemůže rovnice simulovat úplně exaktně.*

Známe ovšem i takové typy matematických funkcí, pro které může být počítačová simulace zcela přesná. Existují prvky množiny známé jako *vyčíslitelné funkce*; jde o funkce, které lze spočítat na počítači v konečném počtu diskretních instrukcí. Počítač obecně musí sice posloupností kroků proběhnout mnohokrát, ale dříve nebo později vyplivne přesnou odpověď. Žádná originalita ani novota není v žádném kroku zapotřebí; jde jen o to, dostat se mechanickou prací k výsledku. Když tedy počítače simulují pohyb odraženého míčku v praxi, jsou naprogramované řešit *vyčíslitelné aproximace* k fyzikálním zákonům, které znáte ze střední školy. (Spojitý čas a prostor jsou obvykle na počítačích přibližně znázorňovány dostatečně jemnou mřížkou.)

Naopak počítač snažící se o výpočet nevyčíslitelné funkce bude hučet nekonečně dlouho, ale správnou odpověď nenajde, ať pracuje seberychněji a ať je kapacita jeho paměti jakkoli vysoká. Tak by tomu bylo i v případě počítače snažícího se o výpočet přesné spojité trajektorie onoho odpáleného míčku. Chcete-li názornější příklad, představte si simulovaný vesmír, v němž je počítač naprogramován tak, aby poskytl báječně pohotového simulovaného šéfkuchaře, který vaří jídlo pro všechny simulované obyvatele, kteří si sami nevaří – a jen pro ně. Když šéfkuchař zuřivě peče, smaží a griluje, samotnému se mu začnou sbíhat sliny. Otázka pak zní: Komu přidělí počítač úkol nakrmit šéfkuchaře?¹⁰ Zamyslete-li se nad tím, rozbolí vás hlava. Šéfkuchař nemůže vařit sám pro sebe, protože vaří *jen* pro ty, kteří sami sobě nevaří, ale kdyby sám sobě nevařil, potom by byl mezi těmi, pro něž by vařit měl. Buďte si jistí, že počítačová hlava by sotva dopadla lépe než ta vaše. A podobně je tomu s nevyčíslitelnými funkcemi: znemožňují počítači výpočet dokončit, a tak by počítač provádějící takovou simulaci zamrzl. Úspěšné vesmíry, které mají tvořit simulovaný multivesmír, by tedy měly být založeny na vyčíslitelných funkcích.

Náš výklad naznačuje, že se simulovaný a definitivní multivesmír překrývají. Představte si zmenšenou verzi definitivního multivesmíru, která obsahuje pouze vesmíry vycházející z vyčíslitelných funkcí. Takový multivesmír už není třeba postulovat jako řešení jedné konkrétní otázky, totiž: „Proč je tento vesmír reálný a ostatní možné vesmíry ne?“ Může se zrodit z určitého procesu. Armáda budoucích počítačových nadšenců, kteří se možná temperamentem nebudou příliš lišit od dnešních nadšených hráčů hry *Second Life*,

* Když jsme (v 2. kapitole) mluvili o sešivaném multivesmíru, zdůraznil jsem, že kvantová fyzika nás ujišťuje, že v libovolné konečné oblasti prostoru existuje pouze konečně mnoho různých způsobů, jimiž se hmota může uspořádat. Nicméně matematický formalismus kvantové mechaniky pracuje s vlastnostmi, které jsou spojité, a proto mohou mít nekonečně mnoho hodnot. Tyto vlastnosti nemůžeme přímo pozorovat (například výšku pravděpodobnostní vlny v daném bodě); konečným počtem možností tedy miníme počet různých výsledků, k nimž mohou dospět skutečná měření.

by mohla vytvořit svůj multivesmír díky své nenasytné posedlosti simulacemi, založenými na stále nových rovnicích. Tito uživatelé by nevygenerovali všechny vesmíry obsažené v Knihovně matematického Babylonu, protože ty, které jsou budovány na nevyčíslitelných funkcích, by se nikdy nenastartovaly, zato by se tito uživatelé postupně propracovali skrze celé vyčíslitelné křídlo knihovny.

Informatik Jürgen Schmidhuber, který uvedené Zuseho myšlenky rozpracoval, došel k podobnému závěru z odlišného úhlu. UVědomil si, že je ve skutečnosti jednodušší naprogramovat počítač, aby vygeneroval všechny možné vyčíslitelné vesmíry, než naprogramovat individuální počítače, aby vesmíry tvořily po jednom. Proč? Představte si, že programujete počítač, aby simuloval baseballová utkání. V každém utkání potřebujete zadat nesmírné množství informací: každou podrobnost o fyzickém i mentálním stavu všech hráčů, o stadionu, rozhodčích, počasí a tak dále. A každé nové utkání, které simulujete, vyžaduje zadání celé hory nových údajů. Když se ale rozhodnete simulovat ne jedno nebo několik utkání, ale *všechna* představitelná utkání, úkol se tím pro vás coby programátora zásadně zjednoduší. Stačí napsat jeden univerzální program, který systematicky vyzkouší všechny hodnoty každé proměnné – těch, které ovlivňují hráče, prostředí a všechny další podstatné aspekty simulace –, a program spustit. Nalezení jednoho konkrétního utkání ve výsledném objemném výstupu bude oříšek, ale můžete si být jistí, že dříve nebo později se každé utkání objeví.

Pointa je v tom, že zatímco ke specifikaci jednoho prvku ve velké množině je často zapotřebí velké množství informací, specifikace celé množiny je většinou daleko jednodušší. Schmidhuber zjistil, že tento závěr platí obzvláště pro simulované vesmíry. Programátor najatý k tomu, aby simuloval množinu vesmírů založených na specifických soustavách matematických rovnic, by mohl zakázku zrealizovat jednoduchým trikem: stejně jako baseballový nadšenec by se rozhodl napsat jediný, poměrně krátký program, který by vygeneroval *všechny* vyčíslitelné vesmíry, a potom by ponechal počítači volnost. Někde v obrovité sbírce simulovaných vesmírů by programátor našel i ty, k jejichž simulaci si ho najali. Nerad bych byl sponzorem provozu těchto počítačů, protože k vygenerování všech těchto simulací by potřebovaly podobně astronomicky dlouhou dobu. S radostí bych ovšem zaplatil standardní hodinový plat programátorovi, protože soubor instrukcí generující všechny vyčíslitelné vesmíry by byl mnohem méně rozsáhlý než kód potřebný k simulaci jednoho konkrétního vesmíru.¹¹

Každý z těchto scénářů – velká skupina uživatelů simulujících mnoho vesmírů i jeden univerzální program, který je simuluje všechny – je příkladem mechanismu, který by mohl simulovaný multivesmír vytvořit. A poněvadž by výsledné vesmíry byly založeny na rozmanité paletě různých matematických zákonů, můžeme stejně dobře tyto procesy považovat za stroje vytvářející část

definitivního multivesmíru, a to tu část, která obsahuje vesmíry založené na vyčíslitelných matematických funkcích.*

Nevýhoda toho, že tvoříme jen část definitivního multivesmíru, tkví v menší efektivitě, s níž okleštěná verze řeší problém, který byl inspirací pro Nozickův princip plodnosti na samém začátku. Když neexistují všechny možné vesmíry, potom není vytvořen celý definitivní multivesmír a opět se vynořuje otázka, proč některé rovnice spatřily světlo světa a jiné nikoli. Konkrétně se budeme nadále trápit otázkou, proč získaly vesmíry založené na vyčíslitelných rovnicích takovou výhodu.

Rozdíl mezi vyčíslitelnými a nevyčíslitelnými funkcemi nám možná říká něco, co souvisí se stále divočejšími spekulacemi v této kapitole. Vyčíslitelné matematické rovnice obcházejí nepříjemnosti, na něž v polovině 20. století upozornili takoví významní myslitelé, jako byl Kurt Gödel, Alan Turing nebo Alonzo Church. Gödelův slavný *teorém o neúplnosti* ukazuje, že jisté matematické systémy axiomů nutně dovolují zkonstruovat pravdivé výroky, které ovšem nelze dokázat prostředky matematického systému samotného. Fyzici o možných důsledcích Gödelových poznatků pro svou vlastní práci dlouho přemýšleli. Nemohla by být i fyzika neúplná v tom smyslu, že některé rysy přírody by navždy unikaly našemu úsilí popsat je matematicky? V případě okleštěného definitivního multivesmíru je odpověď záporná. Vyčíslitelné matematické funkce náležejí podle samotné definice do množiny, kde lze všechno spočítat. Jsou to právě ty funkce, které počítači umožňují podle nějaké procedury úspěšně dokončit výpočet. A kdyby proto byly všechny vesmíry v nějakém multivesmíru založeny na vyčíslitelných funkcích, vesele by také obešly Gödelův teorém; toto křídlo Knihovny matematického Babylonu neboli tato verze definitivního multivesmíru by byla osvobozena od Gödelova ducha. Možná že tato vlastnost staví vyčíslitelné funkce nad ty ostatní.

Našel by *náš* vesmír v takovém multivesmíru své místo? Jinak řečeno, když (a jestliže) budeme mít k dispozici finální verzi fyzikálních zákonů, budou tyto zákony popisovat kosmos na základě matematických funkcí, které jsou vyčíslitelné? Nemám na mysli jen přibližně vyčíslitelné funkce, jak je tomu v případě fyzikálních zákonů, s nimiž pracujeme dnes, ale funkce přesně vyčíslitelné. To nikdo neví. Pokud ano, tak by nás objevy ve fyzice měly nasměrovat k teoriím, v nichž kontinuum nehraje žádnou úlohu. Diskrétnost či nespojitost přírody, základní předpoklad digitálního paradigmatu, by nako-

* Max Tegmark si všiml i toho, že celá simulace, spuštěná od začátku do konce, je sama o sobě souborem matematických vztahů. Když tedy věříme, že celá matematika je něco reálného, potom to platí i pro tento soubor. Z toho vyplývá, že podle této filozofie není třeba žádnou počítačovou simulaci ani spouštět, protože matematické vztahy, které by jakákoli simulace vytvořila, už skutečně jsou. Pověšimněte si i toho, že když se soustředíme na evoluci simulace dopředu v čase, možná tím ulehčíme práci své představivosti, ale omezíme tím i obecnost svých závěrů. Vyčíslitelnost vesmíru by měla být posuzována podle vyčíslitelnosti matematických vztahů platných pro celou historii, ať už tyto vztahy popisují evoluci simulace v čase nebo ne.

nec měla zvítězit. Prostor je zdá se spojitý, ale zatím jsme ho zkoumali jen na vzdálenostech delších než miliardtina miliardtiny metru. Je možné, že s jemnějšími sondami jednoho dne prokážeme, že je prostor ve své podstatě diskrétní; zatím je tato otázka otevřená. Podobně omezenou znalost máme i o čase. Objevy shrnuté v 9. kapitole, z nichž vyplývá informační kapacita jednoho bitu na jednu Planckovu plochu povrchu libovolné oblasti prostoru, znamenají velké nakročení k diskrétnosti. Ovšem otázka, jak daleko se s digitálním paradigmatem lze dostat, není ani zdaleka zodpověděna.¹² Osobně tipuji, že nehledě na to, zda se někdy objeví vnímavé bytosti v simulacích, jednou opravdu zjistíme, že svět je ve svém základě digitální.

Kořeny reality

V simulovaném vesmíru neexistuje žádná nejistota ohledně toho, který vesmír je „reálný“ – tedy který vesmír tkví v kořenu větvičího se stromu simulovaných světů. Je to ten, jenž obsahuje všechny počítače, které v případě zhroucení srovnají se zemí celý multivesmír. Simulovaný obyvatel může simulovat svou sbírku vesmírů na simulovaných počítačích a totéž mohou dělat i obyvatelé jeho simulací, ale stále jsou tu opravdové počítače, na nichž se celá tato hierarchie simulací projevuje jako lavina elektrických impulzů. Není pochyb o tom, které pravidelnosti, fakta a zákony jsou v tradičním smyslu slova skutečné. Jsou to ty, které operují v kořenovém vesmíru.

Typičtí simulovaní vědci v celém simulovaném multivesmíru to však mohou vidět jinak. Žijí-li v simulaci, kde lze na solidní úrovni studovat astronomii – pokud tito simulátoři téměř nikdy nemodifikují paměť obyvatel a ani jinak nenarušují přirozený tok událostí –, potom, soudíme-li podle vlastní zkušenosti, lze očekávat, že v odhalování matematického kódu, který pohání jejich svět, značně pokročí. A tento kód budou považovat za své přírodní zákony. Nicméně jejich zákony nebudou nutně totožné se zákony ovládajícími vesmír skutečný. Jejich zákony pouze musejí být dostatečně dobré, což znamená, že jsou-li nasimulovány na počítači, vynoří se z nich vesmír s vnímajícími obyvateli. Jestliže existuje mnoho sad matematických zákonů, které lze v tomto smyslu považovat za dostatečně dobré, mohla by existovat i neustále rostoucí populace simulovaných vědců přesvědčených, že nalezené matematické zákony nejsou fundamentální, ale byly jednoduše vybrány bytostí, která simulaci naprogramovala. Jsme-li řadovými obyvateli takového multivesmíru, pak nám tyto argumenty naznačují, že to, co normálně považujeme za přírodní vědu, tedy lidskou aktivitu usilující o odкрытие fundamentálních pravd o realitě – o kořenové realitě operující v samotném základu stromu –, by bylo podkopáno.

Je to zneklidňující myšlenka, ale ze spánku mě nebudí. Dokud mi nevyrazí dech simulace s vnímavými bytostmi, nebudu vážně uvažovat o výroku, že

bych v jedné z takových simulací mohl být i já. A i když se na problém podívám z dlouhodobé perspektivy a připustím, že simulace s vědomím by se jednoho dne mohly objevit – a to samo o sobě je velké „kdyby“ –, snadno si představím i to, že tyto simulace, až je technické vymoženosti civilizace poprvé umožní, budou přitažlivé. Ale měla by tahle posedlost dlouhého trvání? Mám podezření, že prvotní nadšení z vytvoření umělých světů, jejichž obyvatelé nejsou o svém původu informováni, by brzy opadlo; vždyť je tolik televizních reality show, na které se můžeme dívat.

Když popustím uzdu fantazii a dovolím jí, aby se po tomto spekulativním terénu proběhla, získám pocit, že trvalý zájem by byl o aplikace, v nichž hrají roli interakce mezi světem simulovaným a tím skutečným. Simulovaní obyvatelé by třeba získali možnost přestěhovat se do světa skutečného nebo by se naopak k nim mohli připojit jejich biologické protějšky. Za určitou dobu by se dělení bytostí na skutečné a simulované mohlo stát anachronismem. Takové hladké sjednocení mi připadá jako nejpravděpodobnější výsledek. V tomto smyslu by simulovaný multivesmír pomohl zvětšit realitu – naši skutečnou realitu – tím nejhmataelnějším způsobem. Stal by se neoddělitelnou součástí toho, čemu říkáme „realita“.

Kapitola jedenáctá

Hranice bádání

Multivesmíry a budoucnost

Isaac Newton otevřel okna vědy dokořán. Objevil, že několik matematických rovnic má schopnost vysvětlit, jak se objekty pohybují na Zemi i ve vesmíru. Vzhledem k dalekosáhlosti a jednoduchosti jeho výsledků by nebylo těžké Newtonovy rovnice považovat za odraz věčných pravd vrytých do základního kamene kosmu. Sám Newton je tak nevnímal. Věřil, že vesmír je daleko bohatší a tajemnější, než jeho zákony naznačovaly; ke konci života zrekapituloval své dílo slavným výrokem: „Sám si připadám jako chlapec, který se na mořském pobřeží raduje z toho, že tu a tam najde hladší kamínek nebo hezčí mušli než obvykle, zatímco obrovský oceán pravdy leží neobjevený přede mnou.“ Následující staletí dala těmto Newtonovým slovům náležitě za pravdu.

A já jsem tomu rád. Kdyby bývaly Newtonovy zákony platily bez omezení a přesně by popisovaly jevy v libovolném kontextu, objekty velké i malé, těžké i lehké a procesy rychlé i pomalé, potom by následující vědecká odysea získala zcela odlišný charakter. Newtonovy rovnice nám toho o světě říkají mnoho, ale kdyby měly neomezenou platnost, znamenalo by to, že vesmír by měl za všech okolností stále stejně obyčejnou příchuť. Jakmile pochopíte fyzikální jevy na každodenních měřítkách, jste hotovi. Stejný popis by platil jak k těm největším měřítkům, tak až k těm nejmenším.

Když na Newtonovo bádání vědci navazovali, odvážili se do oblastí, které byly jeho rovnicemi zcela nedosažitelné. Všechno, co jsme se naučili, si vyžádalo zásadní změny v našem chápání povahy reality. Přijetí takových změn není žádná formalita. Jsou pečlivě zkoumány vědeckou obcí a často narážejí na silný odpor; jen tehdy když množství důkazů přesáhne kritickou mez, může být nový pohled obecně přijat. A tak by to mělo i zůstat. Není třeba soudy uspěchat. Realita si počká.

Tou stěžejní skutečností, zvýrazněnou zejména teoretickým a experimentálním pokrokem posledních sta let, je, že zkušenosti, které jsme získali z běžného života, nejsou spolehlivým vodítkem při výpravách za jevy méně obvyklými. Ale samotný fakt, že jsou pro popis extrémních situací nějaké radikálně nové myšlenky – například obecná teorie relativity, kvantová mechanika

Shrnutí různých verzí paralelních vesmírů.

DRUH PARALELNÍHO VESMÍRU	POPIS
Sešívány multivesmír	Podmínky v nekonečném vesmíru se zákonitě v prostoru opakují, čímž vznikají paralelní světy.
Inflační multivesmír	Věčná kosmická inflace vytváří ohromnou síť vesmírných bublin a náš vesmír je jednou z nich.
Bránový multivesmír	Podle bránových scénářů strunové/M-teorie je náš vesmír přilepen na třírozměrné bráně vznášející se ve vícerozměrném prostoru, v němž se mohou vyskytovat i další brány – paralelní vesmíry.
Cyklický multivesmír	Srážky bránových světů mohou připomínat velký třesk a představovat začátky vesmírů paralelních v čase.
Krajinný multivesmír	Kombinace inflační kosmologie a strunové teorie realizuje každý možný tvar dodatečných rozměrů teorie strun v mnoha různých vesmírných bublinách.
Kvantový multivesmír	Kvantová mechanika naznačuje, že každá možnost obsažená v jejích pravděpodobnostních vlnách je realizována v jednom prvku obrovské množiny paralelních světů.
Holografický multivesmír	Podle holografického principu je náš vesmír přesně kopírován ději probíhajícími na vzdáleném povrchu vnitřního objemu – ve fyzikálně ekvivalentním paralelním vesmíru.
Simulovaný multivesmír	Vědecko-technický pokrok jednou nejspíše umožní simulované vesmíry.
Definitivní multivesmír	Podle principu plodnosti je každý možný vesmír skutečný; tím se obchází otázka, proč je jedna možnost – ta naše – výjimečná. Tyto vesmíry znázorňují a ztělesňují všechny možné matematické rovnice.

a teorie strun, bude-li dokázána její správnost – zapotřebí, nijak nepřekvapuje. Základním předpokladem vědy je, že pravidelnosti a zákonitosti vládnu na všech měřítkách, ale jak Newton sám tušil, neexistuje důvod očekávat, že pravidelnosti, s nimiž se přímo setkáváme, budou zopakovány i na měřítkách hůře dosažitelných.

Překvapením by bylo, kdyby nás neprovázela žádná překvapení.

Totěž bezpochyby platí i pro poznatky, k nimž fyzika dospěje v budoucnosti. Určitá generace fyziků nemůže nikdy vědět, zda jejich práce nebude budoucími historiky interpretována jako slepá ulička, chvilková móda, intermezzo, nebo jako cesta k objevům, které obstojí ve zkoušce času. Tato lokální nestabilita je vyvážena jedním z nejmíce potěšujících rysů fyziky – globální stabilitou –, tedy tím, že nové teorie obecně zcela neodstraní své předchůdkyně. Jak jsme uváděli, nové teorie sice mohou vědce přinutit, aby se přizpůsobili novým pohledům na povahu reality, ale téměř nikdy neodsoudí objevy z minulosti coby nepoužitelné. Spíše je do sebe začlení a rozšíří je. Tato vlastnost pomohla fyzice udržet si působivou míru vnitřního souladu.

V této knize jsme probírali kandidáta na další velký zvrat v tomto vývoji: na možnost, že náš vesmír je jen částí multivesmíru. Na této cestě jsme se seznámili s devíti variacemi na téma multivesmíru – jsou shrnuty v tabulce na straně 290. Ačkoli se různé návrhy výrazně liší v podrobnostech, všechny naznačují, že náš portrét reality založený na „selském“ rozumu je pouze částí velkolepějšího celku. A na všech návrzích je patrný nesmazatelný otisk lidského důvtipu a tvořivosti. Abychom však zjistili, zda některá z těchto idejí není jen matematickou meditací lidské mysli, bude zapotřebí více nadhledu, znalostí, výpočtů, experimentů a pozorování než dosud. Konečný verdikt o tom, zda se paralelní vesmíry vepíší do dějin fyziky, můžeme vyřknout jen se znalostmi, na které si ještě musíme počkat.

Platí to nejen pro metaforickou budoucí učebnici o přírodě, ale i pro knihu, kterou právě čtete. Velmi by mě těšilo, kdybych mohl v této poslední kapitole složit dohromady všechny kousky skládačky a odpovědět na nejpodstatnější otázku celé této problematiky: Vesmír, nebo multivesmír? Zatím něco takového říct nemůžu. Taková je povaha výzkumu, který se pohybuje na samé hranici vědění. Alespoň tedy naznačím, kam se výzkum multivesmírů může ubírat – zdůrazním pět klíčových otázek, s nimiž budou fyzici v následujících letech i nadále zápolit.

Má koperníkovský princip fundamentální povahu?

Pravidelnosti a zákonitosti, které jsou očividné v matematice i při pozorování světa, jsou podstatné pro formulování fyzikálních zákonů. Zákonitosti jiného druhu, které se týkají filozofie fyzikálních zákonů akceptovaných každou další generací, také o něčem vypovídají. Tyto zákonitosti odrážejí to, jak vědecké

objevy pozměnily pohled lidstva na své místo v řádu kosmu. V průběhu téměř pěti staletí se koperníkovský vývoj stal dominantním tématem. Řada stop – od východu a západu Slunce přes pohyb souhvězdí po noční obloze až k důležité úloze, kterou každý z nás hraje ve vnitřním životě své vlastní mysli – naznačuje, že jsme středem, okolo něhož se točí vesmír. Objektivní metody vědeckého výzkumu ovšem tento pohled nepřetržitě opravovaly. Téměř na každém kroku jsme zjišťovali, že i kdybychom tu nebyli, řád kosmu by se téměř nezměnil. Museli jsme se vzdát víry, že Země je středem naší soustavy planet, že Slunce je středem Galaxie, že Mléčná dráha se nachází v centru všech galaxií, a dokonce i názoru, že protony, neutrony a elektrony – materiál, z něhož se skládáme –, jsou hlavními ingrediencemi v kosmickém receptu. Bývaly doby, kdy argumenty vzpírající se dlouho přijímané kolektivní megalomanií byly vnímány jako frontální útok na lidské hodnoty. Časem jsme si vypěstovali schopnost vážit si poučení.

Výklad této knihy směřoval k něčemu, co by se mohlo stát vyvrcholením Koperníkovy revoluce. Náš vesmír samotný nemusí zaujímat ústřední postavení v žádném kosmickém řádu. Stejně jako v případě naší planety, naší hvězdy a naší galaxie, může být náš vesmír jen jedním z mnoha. Myšlenka, že realita založená na multivesmíru je dalším a možná i posledním krokem v koperníkovském vývoji, je lákavá. Ale to, co povyšuje pojem multivesmíru na něco více než jen na planou spekulaci, je klíčový fakt, s nímž jsme se opakovaně setkali. Vědci se nepachtili za tím, jak prodloužit koperníkovskou revoluci. V potměných laboratořích neosnovali spiknutí, s nímž bude možné realizaci Koperníkova velkého plánu dovést do konce. Dělali jen to, co dělají vždy: za pomoci údajů a pozorování coby vodítek formulovali matematické teorie fundamentálních stavebních kamenů hmoty a sil, které chování, interakce a vývoj těchto kamenů ovládají. Pozoruhodné je, že když se nechali opatrně vést tam, kam je vědecké poznatky směřovaly, naráželi na jeden multivesmír za druhým. Projděte se podél jedné z nejfrekventovanějších dálnic vědy, budete trochu všímavější, a uvidíte celý sortiment kandidátů na multivesmír. Je těžší se jim vyhnout než je najít.

Možná že budoucí objevy vrhnou na posloupnost koperníkovských oprav odlišné světlo. Nicméně z dnešního pohledu se zdá, že čím více víme, tím vzdálenější ohnisku všeho dění jsme. Kdyby vědecké úvahy, o nichž jsme mluvili v předchozích kapitolách, spěly k vysvětlení založeným na multivesmíru, šlo by o přirozený krok na cestě k dokončení půl tisíciletí trvající koperníkovské revoluce.

Lze vědecké teorie založené na multivesmíru ověřovat?

Ačkoli pojem multivesmíru hezky zapadá do koperníkovské šablony, v jednom zásadním ohledu se od předchozích příkladů „vzdalování se“ středu světa liší. Tím, že se dovolávají domén, které mohou navždy zůstat nedosažitelné – buď je nelze pořádně pozorovat, nebo je nelze pozorovat vůbec –, stavějí multivesmíry zdánlivě podstatnou překážku procesu vědeckého poznávání. Ať si o místě lidstva ve schématu kosmu myslíme cokoli, většina vědců předpokládala, že k tomu, aby naše hledání nejhlubších vysvětlení donekonečna pokračovalo, stačí svědomité experimentování, pozorování a matematické výpočty. Jsme-li ale součástí multivesmíru, bylo by rozumné očekávat, že v nejlepším případě se můžeme dozvědět něco o našem vesmíru, o našem malém zákoutí kosmu. Ještě depresivnější je obava, že odvoláváním se na multivesmír vstoupíme do říše teorií, které testovat nelze – teorií, které se spoléhají na tvrzení typu „tak to prostě je“ a které mohou všechna pozorování odbýt slovy „tohle tu prostě náhodou je“.

Snažil jsem se ale ukázat, že pojem multivesmíru je o něco rafinovanější. Viděli jsme několik způsobů, jimiž teorie založená na multivesmíru může dospět k ověřitelným předpovědím. Že se například konkrétní vesmíry daného multivesmíru mohou značně lišit, a přesto mohou některé vlastnosti sdílet, protože se všechny vynořují ze stejné teorie. Pokud bychom v tomto vesmíru provedli měření a tyto společné vlastnosti nepotvrdili, daný model multivesmíru bychom vyvrátili. Potvrzení těchto vlastností, zvláště když jejich objev ještě voní novotou, by naopak naše přesvědčení, že je hypotéza pravdivá, posílilo.

Třebaže neexistují vlastnosti, které by měly všechny vesmíry společné, korelace mezi fyzikálními vlastnostmi může nabídnout další třídu testovatelných předpovědí. Viděli jsme například, že předpovídají-li všechny vesmíry s elektronem na soupisu všech druhů částic i zatím nedetekovaný druh částice, pak kdybychom takovou novou částici v experimentech v našem vesmíru nezjistili, by to hypotézu o multivesmíru vyvrátilo, kdežto potvrzení existence této částice by naopak naši důvěru ve správnost hypotézy zvýšilo. Komplikovanější souvislosti či korelace mezi různými vlastnostmi vesmíru – například tvrzení, že vesmíry, jejichž seznam částic obsahuje všechny dnes známé částice (elektrony, miony, kvarky up, kvarky down a tak dále), by nutně obsahovaly nový druh částic – by také vytvářely ověřitelné a vyvrátitelné čili falzifikovatelné předpovědi.

Jestliže takto jednoznačné souvislosti neexistují, pak i způsob, jímž se fyzikální vlastnosti mění od vesmíru k vesmíru, může vést k předpovědím. V různých částech multivesmíru může například kosmologická konstanta nabývat mnoha různých hodnot. Ale kdyby naprostá většina vesmírů měla kosmologickou konstantu, jejíž hodnota souhlasí s tou námi naměřenou (jak ilustruje obrázek na straně 165), potom by důvěra v takový multivesmír poprávu vzrostla.

Nakonec i kdyby většina vesmírů v daném multivesmíru měla vlastnosti odlišné od toho našeho, mohli bychom na základě jiné diagnostické metody – antropického uvažování – ignorovat všechny vesmíry, které nenabízejí příznivé podmínky pro takový život, jaký známe. Jestliže valná většina životu nakloněných vesmírů má vlastnosti, které souhlasí s těmi nám známými – je-li náš vesmír obvyklý mezi těmi, v nichž panují podmínky, které by nám umožnily přežít –, důvěra v multivesmír opět zesílí. Lišíme-li se od nejpočetnější skupiny obyvatel multivesmíru, potom teorii nemůžeme vyvrátit, ale to je dobře známé omezení statistického uvažování. Nepravděpodobné výsledky se někdy mohou stát, a také se stávají, skutečností. Přesto platí, že čím více se lišíme od průměru, tím méně přesvědčivá daná hypotéza o multivesmíru bude. Kdyby v daném multivesmíru mezi všemi vesmíry, které dovolují život, vyčníval ten náš jako kůl v plotě, získali bychom pádný argument, že touto domněnkou o multivesmíru se realita neřídí.

Abychom teorii o multivesmíru prozkoumali s matematickou přesností, musíme proto zjistit demografické údaje o vesmírech, které jsou jeho součástí. Nestačí znát možné vesmíry, které teorie o multivesmíru povoluje, musíme určit i detailní vlastnosti skutečných vesmírů, které podle teorie existují. K tomu je zapotřebí chápat kosmologické procesy, jimiž různé vesmíry podle dané teorie multivesmíru povstávají. Ověřitelné předpovědi se mohou vynořit ze způsobu, jímž se fyzikální vlastnosti v multivesmíru mění od jednoho vesmíru k vesmíru sousednímu.

Zda nás tato posloupnost testů přivede k jasným výsledkům, můžeme rozhodnout jen v rámci jednotlivých teorií o multivesmíru. Můžeme však uzavřít, že teorie, které zahrnují další vesmíry – domény, do nichž nelze zasáhnout dnes a patrně ani nikdy v budoucnosti –, mohou stále poskytovat ověřitelné, a proto vyvrátitelné, předpovědi.

Lze testovat ty teorie multivesmíru, s nimiž jsme se setkali?

Fyzikální intuice je pro teoretický výzkum životně důležitá. Teoretici musejí zvažovat ohromující množství možností. Vyzkoušet tuto, nebo jinou rovnici, použít takové, nebo onaké schéma? Nejlepším fyzikům je vlastní ostré a báječně přesné „vnitřní vidění“; doslova bytostně cítí, který směr výzkumu je nadějný a který patrně žádný výsledek nepřinese. V pozadí jejich myšlení však pracuje intuice. Když jsou už pak předloženy vědecké hypotézy, nehodnotí se podle tušení nebo podle tlaku na hrudníku. Podstatné je jen jedno kritérium, a to schopnost navržené teorie vysvětlit nebo předpovědět experimentální data a astronomická pozorování.

V tom spočívá jedinečná krása vědy. Když usilujeme o hlubší pochopení přírody, musíme dopřát své představivosti a tvořivosti hodně prostoru. Musíme být připraveni překročit rámec obvyklých názorů a zavedených schémat

a teorií. Na rozdíl od mnoha dalších lidských činností, v nichž nachází tvořivost své pole působnosti, však věda nabízí i konečný verdikt, vestavěný aparát rozhodující o tom, co je správně a co nikoli.

Vědecký život přelomu 20. a 21. století se zkomplikoval tím, že některé z našich teoretických myšlenek přerostly naší schopnost ověřovat je nebo pozorovat. Po určitou dobu byla symbolem této situace strunová teorie; možnost, že jsme součástí multivesmíru, však představuje ještě grandióznější příklad. Načrtl jsem hrubý recept, jak hypotézu o multivesmíru testovat, ale naše dnešní porozumění nestačí na to, abychom tento recept aplikovali na kteroukoli ze zmíněných multivesmírných teorií. Budoucí výzkum může tuto situaci značně vylepšit.

V plenkách je například naše zkoumání krajinného multivesmíru. Soubor možných vesmírů podle teorie strun – strunová krajina – je schematicky znázorněn na straně 149. My ale potřebujeme nakreslit podrobnější mapy tohoto členitého terénu. Podobně jako starověcí mořeplavci máme zhruba ponětí o tom, co bychom mohli v tomto světě nalézt, ale k zmapování povrchu zemského nás čeká ještě rozsáhlé matematické zkoumání. Jestliže takové poznatky někdy získáme, bude naším dalším krokem zjistit, jak jsou potenciální vesmíry rozloženy v celém příslušném krajinném multivesmíru. Podstatný fyzikální proces, tvorbu vesmírných bublin kvantovým tunelováním (znázorněnou na stranách 152 a 153), v principu už dobře chápeme, ale musíme jej ještě prozkoumat s přesností a úplností strunové teorie. Různé výzkumné skupiny (včetně mé vlastní) provedly počáteční prohlídku terénu, ale jeho velká část ještě čeká na hloubkovou inspekci. Jak jsme v předchozích kapitolách viděli, ostatní typy multivesmírů zatěžuje podobná neurčitost.

Nikdo neví, zda bude trvat roky, desítky let nebo ještě déle, než pokrok v pozorování a teorii umožní z libovolného konkrétního multivesmíru vydolovat podrobné předpovědi. Jestliže současná situace přetrvává, budeme čelit následujícímu dilematu. Chceme vědu – „seriózní vědu“ – definovat jako soustavu myšlenek, oblastí a možností, které mohou testovat a pozorovat dnes žijící lidské bytosti na planetě Zemi? Nebo zaujmeme obecnější postoj a budeme za „vědecké“ považovat ty myšlenky, které bude možné testovat technikou, jež má reálnou naději objevit se do sta let? Nebo do dvou set let? Déle? Nebo by měla naše „věda“ mít ještě širší záběr? Dovolíme vědě, aby následovala každou stopu, na niž narazí, a vyvíjela se ve směrech, které se rychle vzdalují od experimentálně potvrzených pojmů, ale které mohou zavést naše teoretizování do říše pojmů pro člověka nedosažitelných, a to možná trvale?

Žádná jednoznačná odpověď neexistuje. V tomto bodě se do popředí dostává osobní vědecký vkus. Dobře rozumím nutkání mnoha lidí nerozlučně spojit vědecký výzkum s těmi výroky, které lze ověřovat už dnes nebo v blízké budoucnosti; takto jsme nakonec chrám vědy vybudovali. Považuji však za přízemní, chce-li někdo omezovat lidské přemýšlení náhodně zvolenými

hranicemi, určenými tím, kde se nacházíme, kdy žijeme a kdo jsme. Realita tyto hranice přesahuje, a proto bychom si měli uvědomovat, že hledání hlubokých pravd je dříve nebo později překročí také.

Můj osobní vkus dává přednost všeobjímající vědě. Uznávám však i pomyslnou linii, za níž vykazujeme myšlenky bez naděje, že někdy budou konfrontovány s experimenty a pozorováními, způsobuje-li nedostupnost těchto myšlenek nejen lidská křehkost či technické překážky, ale i sama povaha těchto myšlenek. Z multivesmírů, o nichž jsme hloubali, spadá do tohoto suterénu pouze plnohodnotná verze definitivního multivesmíru. Když začleníme absolutně všechny možné vesmíry, potom nehledě na to, co naměříme nebo zpozorujeme, budeme vždy moci nalézt v definitivním multivesmíru vesmír, jehož zákony se s našimi pozorováními shodnou. Zbylých osm multivesmírů shrnutých v tabulce na straně 290 se této léčce vyhýbá. Každý se vynořuje z dobře motivované šňůry logických úvah, jejichž platnost se nějak dá posuzovat. Kdyby pozorování poskytla přesvědčivé argumenty pro konečnost prostoru, sešivaný multivesmír by musel být z úvah vyškrtnut. Kdyby byla důvěra v inflační kosmologii nahlodána, například kvůli přesnějším údajům o reliktním záření, které lze vysvětlit pouze velmi podivně vytvarovanými (a tudíž nepřesvědčivými) křivkami potenciální energie inflatonu, i inflační kosmologie by ztratila na svém lesku.* Kdyby strunovou teorii potkal teoretický nezdar, například objev delikátního matematického kazu, kvůli němuž by byla teorie rozporuplná (jak si její průkopníci zprvu mysleli), naše motivace přijmout jí předpověděné multivesmíry by byla tatom. A naopak. Pozorování známek kolizí vesmírných bublin v reliktním záření by poskytlo přímý argument ve prospěch inflačního multivesmíru. Experimenty prováděné na urychlovačích a hledající supersymetrické částice, kolize s chybějící energií a miniaturní černé díry by mohly teorii strun a bránový multivesmír podepřít, zatímco důkazy kolizí vesmírných bublin by podpořily i krajinný multivesmír. Detekce otisků gravitačních vln z raného vesmíru – nebo jejich absence – by mohla rozhodnout konkurenční boj mezi inflačním paradigmatem a cyklickým multivesmírem.

Kvantová mechanika interpretovaná v řeči mnoha světů postuluje kvantový multivesmír. Kdyby budoucí výzkum ukázal, že rovnice kvantové mechaniky navzdory své dosavadní bezchybnosti vyžadují drobné modifikace, aby souhlasily s rafinovanějšími údaji, mohl by i tento druh multivesmíru padnout. Modifikace kvantové teorie, která narušuje předpoklad o linearitě (na

* Všimněte si, že i zde, stejně jako v 7. kapitole, platí, že ke spolehlivému vyvrácení inflační teorie by v jejím rámci musela existovat jasná procedura srovnávající nekonečné množiny vesmírů – něco, s čím se tato teorie zatím nevyrovnávala. Většina odborníků by se ovšem shodla v tom, že kdyby údaje o reliktním záření s obrázkem na straně 61 nesouhlasily, jejich důvěra v inflační teorii by výrazně poklesla navzdory tomu, že podle této teorie existuje vesmírná bublina, v níž by se takto odlišné údaje staly skutečností.

který jsme intenzivně spoléhali v 8. kapitole), by toho docílila. Všimli jsme si i toho, že v principu existují i testy kvantového multivesmíru, tedy experimenty, jejichž výsledky závisejí na tom, zda je Everettova interpretace v řeči mnoha světů správná. Tyto experimenty přesahují naše dnešní možnosti a pravděpodobně to tak zůstane, ne pro nějakou charakteristickou vlastnost samotného kvantového multivesmíru, kvůli níž jsou neproveditelné, ale prostě proto, že jsou fantasticky obtížné.

Holografický multivesmír, vynořující se z úvah založených na prokázaných teoriích – obecné relativitě a kvantové mechanice –, je nejmohutněji teoreticky podepřen výsledky z teorie strun. Výpočty odvíjející se od holografie už vedly k provizornímu kontaktu s experimentálními výsledky na urychlovači RHIC a všechno nasvědčuje tomu, že takové spojitosti s experimenty v budoucnosti ještě zesílí. Zda považovat holografický multivesmír za pouhý matematický nástroj, nebo za nepřímý důkaz existence holografické reality, je otázka názoru. Abychom vybudovali pevnější základy pro správnou fyzikální interpretaci, musíme vyčkat budoucích prací, teoretických i experimentálních.

Simulovaný multivesmír není založen na jedné konkrétní teoretické struktuře, spíše na vytrvalém nárůstu výkonu počítačů. Vychází z předpokladu, že vědomí a schopnost vnímat nejsou ve své podstatě spojeny s žádným konkrétním substrátem – s mozkem –, ale že jsou vlastností vynořující se při jistém druhu zpracovávání informace. Tento výrok je značně diskutabilní a na obou stranách zaznívají vášnivé argumenty. Možná že budoucí výzkum mozku a povahy vědomí podkope myšlenku, že myslící stroje mohou mít vědomí. A možná také nepodkope. Jedna z možností, jak tuto multivesmírnou hypotézu posuzovat, je ovšem nasnadě. Kdyby naši prapopotmci jednoho dne přesvědčivě simulovaný svět pozorovali, virtuálně jej navštívili, stali se jeho součástí nebo s ním jinak interagovali, otázka by byla prakticky zodpovězena.

Simulovaný multivesmír je přinejmenším teoreticky spojen s okleštěnou verzí definitivního multivesmíru, s tou verzí, která zahrnuje pouze vesmíry založené na vyčíslitelných matematických strukturách. Na rozdíl od plnohodnotné verze definitivního multivesmíru může tato okleštěná verze říct něco netriviálního o historii vzniku vesmíru, nejen obhajovat svou existenci. Původci simulovaného multivesmíru z řad skutečných i simulovaných uživatelů budou podle definice simulovat vyčíslitelné matematické struktury, a proto budou mít schopnost tuto část definitivního multivesmíru počítačově vytvořit.

Experimenty nebo pozorování dostatečné k rozhodnutí o platnosti všech těchto multivesmírných hypotéz jsou jistě během na dlouhou trať. Ale nejsou nemožné. A vzhledem k ohromnému potenciálnímu přínosu těchto objevů bychom patrně měli následovat poznatky teoretického výzkumu, ať nás vedou kamkoli.

Jak multivesmír ovlivňuje povahu vědeckého vysvětlení

Věda se někdy soustřeďuje na podrobnosti. Například nám říká, proč planety obíhají po eliptických oběžných drahách, proč je nebe modré, proč je voda průhledná, proč je můj stůl pevný. Jakkoli důvěrně známá mohou tato fakta být, to, že jsme je dokázali vysvětlit, je obdivuhodné. Občas se věda od přízemních otázek odpoutá. Odhalí, že žijeme v galaxii se stovkami miliard hvězd, prokáže, že naše galaxie, Mléčná dráha, je jen jednou ze stamiliard galaxií, a poskytne důkazy pro existenci skryté (temné) hmoty, zaplavující každý kout a každou skulinku obrovského vesmírného jeviště. Nahlédneme-li pouze nějakých sto let do minulosti, do doby, kdy byl vesmír považován za statický prostor, v němž kromě Mléčné dráhy nic neexistuje, máme důvod oslavovat velkolepý portrét reality, který věda od té doby namalovala.

Někdy věda vede k něčemu jinému. Přinutí nás přezkoumat své pohledy na vědu samotnou. Několik staletí stará vědecká strategie stojí na tom, že k popisu fyzikálního systému potřebuje fyzik specifikovat tři věci. Se všemi jsme se v různých kontextech setkali, ale má smysl je uvést na jednom místě. První jsou matematické rovnice popisující odpovídající fyzikální zákony (například Newtonovy pohybové zákony, Maxwellovy rovnice elektřiny a magnetismu nebo Schrödingerova rovnice kvantové mechaniky). Druhou jsou číselné hodnoty všech přírodních konstant, které v rovnicích vystupují (například konstanty určující charakteristickou sílu gravitační a elektromagnetické síly nebo hmotnosti elementárních částic). A třetí věcí, kterou musí fyzik specifikovat, jsou „počáteční podmínky“ systému (například informace, že míček byl na domácí metě odpálen konkrétní rychlostí do konkrétního směru nebo že elektron začal svou pouť s 50% pravděpodobností na Grantově hrobce a se stejnou pravděpodobností na Strawberry Fields). Rovnice pak diktují, jak bude vše vypadat v libovolném budoucím okamžiku. Klasická i kvantová fyzika do tohoto rámce zapadají; liší se jen v jednom: klasická fyzika hrdě prohlašuje, že umí určit s jistotou, jak bude svět vypadat, zatímco kvantová fyzika počítá pravděpodobnosti, že bude vypadat tak či onak.

Jde-li o takové předpovědi, jako kde odpálený míček přistane nebo kudy se bude elektron pohybovat v počítačovém čipu (nebo v modelu Manhattanu), je síla tohoto třífázového procesu nepopíratelná. Ale jde-li o popis reality jako celku, provokují nás tyto tři kroky k tomu, abychom kladli hlubší otázky: Můžeme vysvětlit počáteční podmínky, tedy co se dělo v hypoteticky prvním okamžiku? Můžeme vysvětlit hodnoty konstant – hmotnosti částic, velikosti sil a tak dále –, na nichž tyto zákony závisejí? Můžeme vysvětlit, proč konkrétní soustava matematických rovnic popisuje určitý aspekt fyzikálního vesmíru?

Různé multivesmírné hypotézy, jimiž jsme se zabývali, mají potenciál zásadně změnit náš pohled na tyto otázky. V sešivaném multivesmíru jsou fyzikální zákony ve všech členských vesmírech stejné, uspořádání částic se však

mění; různé uspořádaní částic odráží různé počáteční podmínky v minulosti. V tomto multivesmíru se proto význam našeho hledání důvodů, proč byly počáteční podmínky takové, jaké byly, posouvá. Počáteční podmínky jednotlivých vesmírů se mohou, a také budou, lišit, takže univerzální vysvětlení žádného jednotlivého uspořádaní nemůže existovat. Ptát se, o jaké uspořádaní má jít, by byla chyba; jde o chybnou aplikaci jednovesmírné mentality na multivesmírný kontext. Spíše bychom se měli ptát, zda někde v multivesmíru vesmír, jehož uspořádaní částic, a tedy i počáteční podmínky, souhlasí s tím, co dnes pozorujeme, existuje. Nebo ještě lépe, můžeme nějak prokázat, že takových vesmírů je hodně? Pokud ano, mohli bychom nad tou hlubokou otázkou počátečních podmínek pokrčít rameny; v takovém multivesmíru by počáteční podmínky našeho vesmíru nepotřebovaly o nic delší vysvětlení než fakt, že v New Yorku lze nalézt obuvnictví, kde mají boty vaší velikosti.

V inflačním multivesmíru se „konstanty“ přírody mohou měnit a obecně mění od jedné vesmírné bubliny k druhé. Vzpomeňte si, že rozdíl v prostředí, jimž jsme se věnovali ve 3. kapitole – různé hodnoty Higgsova pole prostupujícího každou bublinu –, mají za následek různé hmotnosti částic a vlastnosti sil. Totéž platí pro bránový multivesmír, cyklický multivesmír a krajinný multivesmír, v nichž se tvar dodatečných rozměrů strunové teorie spolu s různými rozdíly v polích a tocích podílí na různorodosti vlastností bublin – od různých hmotností elektronu přes otázku, zda tam vůbec elektron existuje, přes sílu a samotnou existenci elektromagnetismu až k hodnotě kosmologické konstanty a tak dále. V kontextu těchto multivesmírů by bylo opět chybné ptát se po vysvětlení vlastností sil a částic, které měříme; taková otázka by byla inspirovaná jednovesmírným uvažováním. Místo toho bychom se měli ptát, zda se v některém z těchto multivesmírů nevyskytuje vesmír s takovými hodnotami fyzikálních veličin, které jsme naměřili. Bylo by lepší ukázat, že vesmíry s fyzikálními vlastnostmi podobnými těm našim tvoří velké procento mezi všemi nebo alespoň mezi těmi, které umožňují známé formy života. Stejně jako je nesmyslné ptát se, jakým *konkrétním* slovem Shakespeare napsal *Macbetha*, tak je nesmyslné od rovnic žádat, aby vybraly *jednoznačné* hodnoty fyzikálních parametrů, které zde pozorujeme.

Simulovaný a definitivní multivesmír mají odlišný charakter; nevynořují se z konkrétních fyzikálních teorií. Ale i ony mají potenciál transformovat charakter našich otázek. V těchto multivesmírech jsou matematické zákony ovládající jednotlivé vesmíry proměnlivé. Stejně jako v případě proměnlivých počátečních podmínek a přírodních konstant je tedy zavádějící se ptát, jak lze vysvětlit konkrétní zákony, které platí zde. Různým vesmírům vládnou různé zákony; prožíváme právě ty, které prožíváme, protože patří do kategorie zákonů, které jsou slučitelné s naší existencí.

Celkově lze význam všech multivesmírných hypotéz z tabulky na straně 290 shrnout tak, že tři standardní aspekty vědeckých teorií, které vypadají velmi

tajuplně v kontextu jednoho vesmíru, se proměňují v prozaické skutečnosti. V některých multivesmírech už počáteční podmínky, přírodní konstanty, a dokonce ani matematické zákony nepotřebují vysvětlení.

Měli bychom věřit matematice?

Laureát Nobelovy ceny Steven Weinberg jednou napsal: „Naší chybou není to, že bereme své teorie příliš vážně, ale že je nebereme dostatečně vážně. Je vždycky těžké si uvědomit, že všechna ta čísla a rovnice, s nimiž si hrajeme u stolu, mají něco společného s reálným světem.“⁴¹ Weinberg měl na mysli průkopnické výsledky Ralpa Alpera, Roberta Hermana a George Gamowa ohledně reliktního záření (popsané ve 3. kapitole). Ačkoli je předpověděné záření přímým důsledkem obecné teorie relativity kombinované se základní kosmologickou fyzikou, zaujalo prominentní postavení až poté, co bylo dvakrát (s odstupem deseti let) teoreticky objeveno a poté se štěstím a za neočekávaných okolností pozorováno.

S Weinbergovou poznámkou je ovšem třeba zacházet opatrně. Ačkoli *jeho* stůl pomohl na svět neskutečnému množství matematiky, jejíž důležitost pro reálný svět byla prokázána, zdaleka ne každá rovnice, kterou teoretici „zfušují“, dopadne stejně. V nepřítomnosti přesvědčivých výsledků z experimentů a pozorování je výběr matematiky, kterou bychom měli brát vážně, napůl vědou a napůl uměním.

A opravdu, tento fakt hraje ústřední roli ve všem, o čem jsme v této knize mluvili; odráží se i v názvu knihy. Šíře multivesmírných hypotéz ve zmíněné tabulce na straně 290 by mohla naznačovat, že skrytých realit existuje celé panoptikum. Pro název knihy jsem však zvolil jednotné číslo, abych zdůraznil jediné a neopakovatelně silné téma, které je všechny spojuje: schopnost matematiky objevovat skrývající se pravdy o fungování světa. Staletí objevů to ukázala nadmíru jasně; monumentální revoluce ve fyzice byly pravidelně odstartovávány tím, že vědci rázně vykročili ve stopách matematiky. Učebnicovým příkladem toho je Einsteinův vlastní složitý tanec s matematikou.

Na sklonku 19. století si James Clerk Maxwell uvědomil, že světlo je elektromagnetická vlna, a jeho rovnice ukázaly, že světlo by se mělo pohybovat rychlostí asi 300 000 kilometrů za sekundu, tedy rychlostí blízkou hodnotě, kterou měřili experimentátoři. Zdánlivým nedostatkem jeho práce bylo, že jeho rovnice neodpověděly na otázku: Vzhledem k čemu se rychlost rovná 300 000 kilometrů za sekundu? Vědci hledali provizorní řešení, podle něhož by neviditelná látka prostupující prostor, „éter“, poskytovala neviditelný standard klidu. Na začátku 20. století však Einstein prohlásil, že vědci musejí brát Maxwellovy rovnice vážněji. Maxwellovy rovnice neodkazovaly na žádný standard klidu, protože jej ani nepotřebovaly; rychlost světla, jak Einstein zdůraznil, je 300 000 kilometrů za sekundu vzhledem k *čemukoli*. Ačkoli jsou

takové podrobnosti zajímavé z historického hlediska, o této zápletce mluvím kvůli jejímu obecnějšímu poučení: všichni měli možnost Maxwellovu matematiku studovat, ale plně ji akceptoval až génius Einsteinova formátu. Tímto počinem se Einstein propracoval ke speciální teorii relativity, k teorii, která zvrátila stovky let staré názory na prostor, čas, hmotu a energii.

V následujícím desetiletí, když pracoval na obecné teorii relativity, se důvěrně seznámil s rozsáhlými oblastmi matematiky, o nichž ostatní fyzici té doby věděli málo nebo nevěděli vůbec nic. Když dospíval ke konečným rovnicím obecné relativity, předvedl své mistrovské umění – vymodeloval z matematického polotovaru fyzikální intuicí definitivní odpověď na hluboké otázky o vesmíru. O několik let později, jakmile se k němu donesly zprávy o tom, že pozorování zatmění Slunce v roce 1919 potvrdilo předpověď obecné teorie relativity, že hvězdné světlo by se mělo pohybovat po zakřivených drahách, sebevědomě poznamenal, že kdyby byly bývaly výsledky jiné, „potom by milého Pánaboha litoval, protože ta teorie správná je“. Jsem si jistý, že přesvědčivé údaje přičítají se obecné relativitě by Einsteinův tón změnil, jeho poznámka přesto názorně ilustruje, jak ze soustavy matematických rovnic, z jejich elegantní vnitřní logiky, z jejich přirozené krásy a z jejich potenciální použitelnosti může v mnoha situacích vyzářovat realita.

Nicméně existovala hranice, kterou při honbě za svou vlastní matematikou ani Einstein nebyl ochoten překročit. Nevzal obecnou teorii relativity „dostatečně vážně“, aby uvěřil její předpovědi černých děr a rozpínání vesmíru. Jak jsme viděli, další fyzici – Fridman, Lemaître a Schwarzschild – vzali jeho rovnice vážněji než on sám a jejich výdobytky nasměrovaly výzkum v kosmologii na téměř sto let dopředu. Einstein sám se v posledních dvaceti letech svého života oddal matematickým meditacím a vášnivě bojoval o kýženou trofej ve formě jednotné teorie fyziky. Hodnotíme-li jeho snažení z hlediska dnešních znalostí, nemůžeme se vyhnout závěru, že v těchto letech se nechal *příliš* vést – někteří by řekli zaslepit – houštím rovnic, které ho nepřetržitě obklopovaly. A tak i Einstein v různých etapách svého života dělal chybná rozhodnutí o tom, které rovnice by měl brát vážně a které nikoli.

Třetí revoluce v moderní teoretické fyzice, kvantová mechanika, představuje ještě jeden učebnicový příklad, který má k vyprávění v této knize přímý vztah. V roce 1926 sepsal Schrödinger rovnici popisující vývoj kvantových vln. Celá desetiletí si lidé mysleli, že tato rovnice platí pouze pro mikroskopický svět: pro molekuly, atomy a částice. Až v roce 1957 se Hugh Everett rozhodl vzít k srdci půl století staré Einsteinovo přikázání, které původně zaznělo v kontextu Maxwellových rovnic: *vezmi matematiku vážně*. Everett tvrdil, že Schrödingerova rovnice by měla platit pro všechno, protože všechny hmotné objekty, ať už jakkoli velké, jsou vytvořeny z molekul, atomů a subatomárních částic. A jak jsme viděli, vedlo jej to k interpretaci kvantové mechaniky v řeči mnoha světů a ke kvantovému multivesmíru. O více než padesát let později

stále nevíme, zda je jeho interpretace správná. Ale tím, že vzal matematiku podírající kvantovou teorii vážně – ale opravdu vážně –, možná uskutečnil jeden z nehlubších objevů vědeckého výzkumu.

Další multivesmírné hypotézy se podobně opírají o víru, že matematika je důkladně všita do tkaniny reality. Nejradikálněji interpretuje tento názor definitivní multivesmír; matematika *je* podle této filozofie realita. Ale i ostatní multivesmírné teorie, navzdory jejich méně univerzálnímu sepětí matematiky s realitou, vděčí za svůj vznik číslům a rovnicím, s nimiž si hráli teoretici sedící za svými stoly – a čmárali je do svých zápisníků, popisovali jimi tabule a programovali počítače. Položky v tabulce na straně 290 spatřily světlo světa jen díky předpokladu, že matematické teoretizování, ať už teoretizování o obecné relativitě, kvantové mechanice, strunové teorii nebo obecněji o interpretaci matematiky samotné, nás může přivést k skrytým pravdám. Pouze čas prozradí, zda tento předpoklad bere ony matematické teorie v pozadí příliš vážně, nebo naopak jen povrchně.

Jestliže se některá nebo i veškerá matematika, která nás přiměla k úvahám o paralelních světech, ukáže jako podstatná pro realitu, na Einsteinovu slavnou otázku, zda vesmír má takové vlastnosti, jaké má, protože Bůh neměl na výběr, by padla definitivní odpověď: ne, nemá. Náš vesmír by nebyl jediným možným. Jeho vlastnosti by mohly být i odlišné od těch, které známe. A podle mnohých multivesmírných hypotéz vlastnosti dalších členských vesmírů skutečně odlišné *jsou*. Z toho by vyplývalo, že hledání nezákladnějšího vysvětlení vlastností určitých věcí by bylo marné. Naše porozumění kosmu by místo toho bylo prošpikováno statistikou, pravděpodobnostmi a shodami okolností a vesmír by se stal nesmírně obrovským.

Nevím, zda se vývoj bude ubírat takovou cestou. A neví to nikdo. Jen když se budeme odvážně snažit dostat co nejdále, máme naději poznat skutečné hranice. Jedině když budeme vytrvale prověřovat své teorie, a to i ty, které nás přivádějí do říše podivných a exotických myšlenek, budeme mít šanci odhalit realitu v celé její kráse a velikosti.

Poznámky

Kapitola první: Hranice reality

- 1 Představa, že náš vesmír je deska vznášející se ve vícerozměrném prostoru, má svoje počátky už v článku dvou slavných ruských fyziků – Valerije A. Rubakova a Michaila J. Šapošnikova „Do We Live Inside a Domain Wall?“, *Physics Letters B* 125 (26. května 1983): 136 –, kde se objevila bez odkazů na teorii strun. Já se v 5. kapitole soustřeďuji na verzi, která se zrodila v průběhu exploze poznatků v polovině devadesátých let.

Kapitola druhá: Bezedný sklad dvojníků

- 1 Tento citát se objevil roku 1933 v březnovém čísle *The Literary Digest*. Stojí za to zmínit, že přesnost tohoto výroku byla v nedávné době zpochybněna dánským historikem vědy Helgem Kraghem (viz *Cosmology and Controversy*, Princeton University Press, Princeton 1999). Podle něj mohlo jít o dezinterpretaci zprávy uveřejněné předtím v *Newsweeku* z téhož roku: Einstein se v ní zmiňuje o původu kosmických paprsků. Jisté je ovšem to, že v tomto roce nebo dříve se Einstein vzdal víry ve statický vesmír a přijal dynamickou kosmologii, která se zrodila z analýzy jeho původních rovnic obecné relativity.
- 2 Podle tohoto zákona je přitažlivá gravitační síla F mezi dvěma tělesy o hmotnostech m_1 a m_2 o vzdálenosti r dána matematickým výrazem $F = G m_1 m_2 / r^2$, kde G je Newtonova konstanta – experimentálně měřené číslo, které vyjadřuje charakteristickou velikost gravitační síly.
- 3 Pro matematicky orientovaného čtenáře dodávám, že Einsteinovy rovnice jsou $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, kde $g_{\mu\nu}$ je metrika v časoprostoru, $R_{\mu\nu}$ je Ricciho tenzor křivosti, R je skalární křivost, G je Newtonova konstanta a $T_{\mu\nu}$ je tenzor energie-hybnosti.
- 4 Desetiletí po tomto slavném potvrzení obecné relativity se objevily pochybnosti ohledně spolehlivosti jeho výsledků. Hvězdné světlo, které skoro zavádí o sluneční povrch, lze sledovat jen při zatmění Slunce; naneštěstí špatné počasí v době zatmění roku 1919 ztížilo pořizování ostrých fotografií. Otázkou je, zda Eddington a spolupracovníci mohli být zaujatí tím, že předem znali výsledek, který chtěli získat, a proto při výběru fotografií odstranili kvůli údajné nevěrohodnosti větší procento snímků, které s Einsteinovou teorií už tak dobře nesouhlasily. Nedávná důkladná studie Daniela Keneficka (viz www.arxiv.org, článek arXiv:0709.0685; kromě jiného bere

- do úvahy i moderní přezkoumání fotografických desek z roku 1919) ale přesvědčivě argumentuje, že potvrzení obecné relativity z roku 1919 bylo spolehlivé.
- 5 Matematicky zdatný čtenář se jistě rád dozví, že v tomto kontextu se Einsteinovy rovnice redukují na $\left(\frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2}$. Proměnná $a(t)$ je škálový koeficient vesmíru – číslo, které (jak naznačuje jeho název) určuje vzdálenost mezi objekty (je-li hodnota $a(t)$ na dvou místech odlišná řekněme dvojnásobně, potom vzdálenosti mezi libovolným párem galaxií na těchto místech by se také lišily o koeficient 2), G je Newtonova konstanta, ρ (ró) je hustota hmoty/energie a k je parametr, který je roven +1, 0, či -1 pro prostor, jehož tvar je sférický, eukleidovský („plochý“), nebo hyperbolický. Tvar této rovnice je obvykle přisuzován Alexandru Fridmanovi, a proto rovnice nese i jeho jméno: Fridmanova.
- 6 Matematicky založený čtenář by si měl povšimnout dvou věcí. Zprvč toho, že v obecné teorii relativity obvykle definujeme souřadnice, které samy závisejí na hmotě obsažené v prostoru: používáme galaxie jako „nosiče“ souřadnic (a představujeme si, že na každé galaxii jsou „namalovány“ – jde pak o takzvané komobilní souřadnice, anglicky *co-moving coordinates*). Abychom totiž konkrétní oblast prostoru vůbec identifikovali, většinou se musíme spolehnout na hmotu, kterou obsahuje. Přesnější formulace textu by tedy zněla: Oblast prostoru obsahující konkrétní skupinu N galaxií v čase t_1 bude mít větší objem v pozdějším okamžiku t_2 . Zadruhé bychom si měli všimnout, že intuitivně stravitelný výrok ohledně měnění se hustoty hmoty a energie při rozpínání prostoru skrytě předpokládá určitou stavovou rovnici pro hmotu a energii. V určitých situacích, a s jednou takovou se brzy setkáme, se prostor může rozpínat nebo smršťovat, zatímco hustota konkrétního příspěvku k energii – energetická hustota takzvané kosmologické konstanty – zůstane beze změn. Existují dokonce ještě exotičtější scénáře, v nichž se prostor může rozpínat za *nárůstu* hustoty energie. To je za jistých podmínek možné proto, že zdrojem energie je gravitace. V odstavci v hlavním textu jde zejména o to, že v jejich původním tvaru nejsou rovnice obecné relativity slučitelné se statickým vesmírem.
- 7 Brzy uvidíme, že Einstein zavrhl svůj statický vesmír, jakmile narazil na astronomické údaje, z nichž vyplývalo, že se vesmír rozpíná. Neměli bychom však zapomenout, že pochybnosti jej trápily už před těmito pozorováními. Fyzik Willem de Sitter jej totiž upozornil na to, že jeho statický vesmír je nestabilní: postrčíte-li vesmír k většímu velikostem, začne stále rychleji růst; štouchnete-li do něho, aby byl o něco menší, začne se smršťovat. Fyzici se zdráhají přijmout řešení, jejichž udržitelnost závisí na dokonalých a neporušených podmínkách.
- 8 V modelu velkého třesku lze rozpínání prostoru směrem ven považovat za analogii pohybu míčku vrženého vzhůru: míček je gravitací přitahován k Zemi, takže se jeho pohyb zpomaluje; podobně gravitace přitahuje k sobě i vzdalující se galaxie, a tak zpomaluje jejich pohyb. Ani v jednom z případů není k tomu, aby pohyb pokračoval, třeba odpudivá síla. Přesto se můžete stále ptát: Když byl míček vržen k nebesům mou rukou, co „odstartovalo“ rozpínání vesmíru? K této otázce se vrátíme v 3. kapitole. Uvidíme tam, že moderní teorie postuluje krátkou explozi odpudivé gravitace, která účinkovala v nejranějších chvílích kosmické historie. Také se dozvíte, že podrobnější údaje nám poskytly důkazy, že rozpínání prostoru se fakticky *nezpomaluje* s časem, kvůli čemuž se – jak vyjasní další kapitoly – poněkud překvapivě vzkrísila myšlenka kosmologické konstanty a to má dalekosáhlé důsledky. Objev rozpínání prostoru byl zlomovým okamžikem moderní kosmologie. Tento výdobytek umožnila nejen práce Hubbleova, ale i poznatky dalších, například Vesty Sliphera, Harlowa Shapleyho a Milтона Humasona.

- 9 Dvourozměrný torus se obvykle znázorňuje jako dutý věneček z cukrárny (do dutiny je možné vpravit šlehačku). Ve dvou krocích se lze přesvědčit, že tato reprezentace souhlasí s popisem v textu. Výrok, že po překročení pravého okraje obrazovky se objevíte na levém okraji, je ekvivalentní tomu, že se oba postranní okraje obrazovky ztotožní. Kdyby byla obrazovka ohebná (například z plastu), šlo by toto ztotožnění názorně představit tak, že by se obrazovka svinula do tvaru pláště válce a její postranní okraje by se slepily. Deklarujeme-li, že po překročení horního okraje se dostaneme na okraj spodní, ovlivníme tvar stejně, jako když tyto dva okraje obrazovky ztotožníme. Toho lze docílit tak, že válcovou obrazovku ohneme a slepíme horní a dolní okraj. Vůsledný tvar pak vypadá jako věneček. Tento cukrářský model poněkud kulhá v tom, že jeho povrch vypadá zakřivený; kdybyste ho potáhli alobalem nebo ještě lepším odrazivým materiálem, by byl váš obraz v „zrcadle“ zdeformovaný. To je ale pouhý nežádoucí vedlejší důsledek toho, že jsme torus museli umístit do obvyčejného třírozměrného prostředí. Dvourozměrný torus samotný ve své podstatě žádné zakřivení nemá. Jeho plochost je zřejmá, znázorníme-li ho jako obrazovku videohry. Proto se v textu zaměřuji na matematicky čistší popis toru jako tvaru, v němž jsou hrany spárovány a páry ztotožněny.
- 10 Dobrý matematik si povšimne, že „rozvázným řezáním a frézováním“ míním konstrukci faktorů (či kvocientů) jednoduše souvislých nakrytí různými diskretními grupami izometrií.
- 11 Zmíněná hodnota platí pro nynější epochu. V raném vesmíru byla kritická hustota vyšší.
- 12 Kdyby byl vesmír statický, potom světlo, které letělo 13,7 miliardy let a dorazilo právě do dalekohledu, by bylo vysláno ze vzdálenosti 13,7 miliardy světelných let. V rozpínajícím se vesmíru by se však zdroj tohoto světla vzdaloval celé miliardy následujících let, kdy bylo světlo na cestě. Jakmile k nám světlo dorazí, je objekt proto od nás dál, mnohem dál než 13,7 miliardy světelných let. Přímochárý výpočet v obecné teorii relativity ukazuje, že tento objekt (předpokládáme-li, že stále existuje a že se neustále nechal unášet bobtnajícím prostorem) by dnes byl asi 41 miliard světelných let od nás. To znamená, že když pozorujeme vesmír, můžeme v principu vidět světlo ze zdrojů nacházejících se dnes nějakých 41 miliard světelných let od nás. V tomto smyslu má pozorovatelný vesmír průměr nějakých 82 miliard světelných let. Světlo z objektů dnes ještě vzdálenějších nemělo od doby své mladosti dostatek času, aby k nám dorazilo; proto se tyto objekty nacházejí za naším kosmickým horizontem.
- 13 Spokojíte-li se s podobně nepřesným popisem, můžete si představit, že kvůli kvantové mechanice částice neustále prožívají to, čemu říkám „kvantové chvění“ – odrůdu nevyhnutelných kvantových vibrací, kvůli kterým se samotný pojem jednoznačné polohy a rychlosti (nebo hybnosti) částice stává přibližným. V tomto smyslu jsou změny polohy/rychlosti tak malé, že se ztratí v „šumu“ kvantové mechaniky, a proto z fyzikálního hlediska nemají smysl. V přesnějším jazyce lze říct, že když násobíte nepřesnost v měření polohy nepřesností měření hybnosti, výsledek – neurčitost – je vždycky větší než číslo známé jako *Planckova konstanta*, veličina pojmenovaná podle Maxe Plancka, jednoho z průkopníků kvantové fyziky. Z toho konkrétně vyplývá i to, že větší jemnost (menší nepřesnost) měření polohy částice nezbytně vyvolá větší nepřesnost v měření hybnosti (a s ní související energie). Protože je energie vždycky omezená, musí být omezená i jemnost v měření polohy. Všimněte si i toho, že o těchto pojmech budeme mluvit zásadně jen v případě konečné oblasti prostoru – jejíž velikost bude obvykle rovná velikosti dnešního

kosmického horizontu (jako v následující podkapitole). Konečná, byť obrovská, velikost oblasti vždycky znamená, že maximální neurčitost v měření polohy je limitována: nemůže být větší než oblast samotná. Z takového omezení na neurčitost polohy plyne, že existuje minimální neurčitost v měření hybnosti – to znamená, že přesnost měření hybnosti je nutně omezená. V kombinaci s omezeným rozlišením při měření polohy tedy zjišťujeme, že jak poloha, tak rychlost částice mají jen konečný počet možných hodnot.

Mohli byste se stále ptát, zda nám něco může zabránit v konstrukci zařízení měřícího polohu s jakkoli velkou přesností. I zde je tím podstatným energie. Když jako v textu chcete měřit polohu částice se stále vyšší přesností, potřebujete k tomu stále rafinovanější sondu. Ke zjištění, zda je v ložnici moucha, vám vystačí obyčejná lampička. Ke zjištění, zda je v dutině elektron, potřebujete ostrý laserový paprsek. A ke zjištění polohy elektronu s ještě větší přesností musíte intenzitu laserového světla ještě více zvýšit. Když do elektronu vráží stále silnější laserové světlo, narušuje stále podstatněji rychlost elektronu. Závěr tedy zní, že přesnost v určování poloh částic lze získat jen za cenu obrovských změn v rychlostech částic – a proto i v jejich energiích. Existuje-li omezení toho, kolik energie může částice mít, a takové omezení bude existovat vždy, existuje i omezení toho, s jakým rozlišením lze určit polohy částic.

Shora omezená energie v konečné prostorové oblasti má za důsledek konečné rozlišení v měření jak poloh, tak i rychlostí.

- 14 Nejpřímochařejší způsob, jak tento výpočet provést, je využít výsledku, který bez rovníc vysvětlím v 9. kapitole: entropii černé díry – logaritmus počtu různých kvantových stavů –, která je úměrná povrchu měřenému v jednotkách Planckovy plochy. Černá díra, která by se právě vešla do našeho kosmického horizontu, by měla poloměr asi 10^{26} metrů neboli asi 10^{61} Planckových délek. Její povrch a entropie by proto byly asi 10^{122} Planckových jednotek. Počet různých stavů je tudíž 10 umocněno na 10^{122} neboli $10^{10^{122}}$.
- 15 Možná se divíte, proč jsem nezahrnul i pole. Jak uvidíte, částice a pole jsou dva doplňující se jazyky o témž – pole lze popsat v řeči částic, z nichž se skládá, stejně jako mořskou vlnu můžeme popsat v řeči molekul vody v ní obsažených. To, zda fyzik dává přednost řeči částic, nebo polí, závisí převážně na tom, která z možností je v dané situaci pro něj vhodnější.
- 16 Vzdálenost, kterou světlo může uletět za daný časový interval, citlivě závisí na tempu, jímž se rozpíná prostor. V pozdějších kapitolách se setkáme s důkazy toho, že se tempo rozpínání prostoru zrychluje. Je-li tomu tak, existuje limit, kam až v prostoru může světlo doletět, a to i za libovolně dlouhou dobu. Vzdálené oblasti prostoru by se od nás vzdalovaly tak rychle, že námi vyslané světlo by k nim nikdy nedoletělo; podobně světlo vyslané z nich by nikdy nedospělo k nám. To by znamenalo, že kosmické horizonty – části prostoru, s nimiž si můžeme vyměňovat světelné signály – by nenarůstaly donekonečna. (Pro matematicky vzdělaného čtenáře jsem vzorce shromáždil v poznámce 7 k 6. kapitole.)
- 17 George Ellis a Geoff Brundrit studovali okopírované oblasti v nekonečném klasickém vesmíru; Jaume Garriga a Alexandr Vilenkin v kontextu kvantovém.

Kapitola třetí: Věčnost a nekonečno

- 1 Jedna z prací se ze směru určeného předchozím výzkumem odchytila. Dicke se soustředil na možnost, že oscilující vesmír opakovaně prochází posloupností cyk-

lů – velkým třeskem, rozpínáním, smršťováním, velkým křachem a znovu velkým třeskem. V každém cyklu by prostor zaplavilo zbytkové záření.

2 Stojí za to zmínit, že bytí nemají žádné tryskové motory, i u galaxií zjišťujeme jistý pohyb, jež rozpínáním prostoru vysvětlit nelze – obvykle jej vyvolávají mezigalaktické gravitační síly na nejdleších vzdálenostech jakož i vlastní pohyb zvířeného mraku plynů, z něhož se v galaxii zrodily hvězdy. Takový dodatečný příspěvek k pohybu se nazývá *osobitá* neboli *pekuliární rychlost*. Obecně je natolik malá, že ji lze pro kosmologické účely zanedbat.

3 Problém horizontu je zapeklitý a můj popis jeho řešení na základě inflační kosmologie je navíc poněkud nestandardní, a proto bych měl čtenářům, kteří by mohli projevit zájem, nabídnout pár detailů. Zaprvé si zopakujme, v čem problém spočívá: Uvažujme o dvou oblastech na noční obloze, které jsou od sebe tak vzdálené, že spolu zatím nikdy nemohly komunikovat. Abychom byli konkrétní, řekněme, že každá oblast obsahuje pozorovatele, který ovládá termostat a nastavuje teplotu své oblasti. Pozorovatelé chtějí, aby jejich oblasti měly stejnou teplotu, ale protože zatím spolu nemohli komunikovat, nevědí, kolik stupňů mají na svých termostatech nastavit. Přirozené je očekávat, že vzhledem k mnohem kratším vzdálenostem pozorovatelů před miliardami let měla být taková komunikace snadná, proto se dohodli na společné teplotě. Ale jak jsem zmínil v hlavním textu, tato strategie nefunguje podle standardního velkého třesku. Proč, uvedu hned. Ve standardní teorii velkého třesku se vesmír rozpíná, ale kvůli gravitační přitažlivosti se *tempo* jeho rozpínání s časem zpomaluje. Podobně míček vržený vzhůru letí nejprve nahoru rychle, ale postupně, jak ho přitahuje Země, ve svém letu zpomalí. Zpomalení rozpínání prostoru má důležitý důsledek. Analogie s míčkem mně postačí k vysvětlení podstatné myšlenky. Představte si, že míček stoupá 6 sekund. Protože zpočátku (když opouštěl vaši ruku) letěl rychle, může první polovinu cesty urazit za 2 sekundy, ale na tu druhou polovinu bude kvůli menší rychlosti potřebovat 4 další sekundy. V polovině času, tedy po 3 sekundách, už tedy míček urazil *více než* polovinu své cesty k vrcholu. Podobně po určité době zpomalí rozpínání prostoru: v polovině kosmické historie budou naši dva pozorovatelé odděleni *větší* vzdáleností, než je polovina té dnešní. Zamyslete se, co to znamená. Oba pozorovatelé sice k sobě budou blíže, ale začne pro ně být těžší – a ne lehčí – se spolu dorozumívat. Signály poslané vzájemně mezi nimi by totiž měly jen půl času na uražení vzdálenosti, ale potřebovaly by za tu dobu urazit *více než* půl dnešní vzdálenosti. Zkrátí-li se vzdálenost o méně procent než čas, pak se určitá rychlost, konkrétně podíl času a vzdálenosti, zvětší, a navázat kontakt je proto obtížnější.

Vzdálenost mezi tělesy je tedy jen jednou veličinou, kterou musíme vzít do úvahy, hodnotíme-li schopnost objektů se ovlivnit. Další důležitou veličinou je čas, který uplynul od velkého třesku; podle něho je omezeno i to, jak daleko mohl jakýkoli hypotetický vliv zapůsobit. Ve standardním velkém třesku sice bylo dříve všechno blíže, ale vesmír se i rychleji rozpínal, a měl proto proporcionálně řečeno méně času na to, aby dovolil dvěma objektům se vzájemně ovlivnit.

Tady nabízí řešení inflační kosmologie. A to tak, že do životopisu vesmíru vsune hned po jeho vzniku období, kdy tempo rozpínání neklesalo tak jako míč vržený vzhůru; místo toho rozpínání začalo na malé rychlosti a ta postupně narůstala: rozpínání se zrychlovalo. Podle stejné (ale převrácené) logiky, kterou jsme před chvílí prošli, byly v polovině inflační fáze objekty odděleny *méně než* polovinou jejich vzdálenosti na konci inflace. A protože se vzdálenost při posunu do poloviny inflace zmenšila o více procent než čas, bylo v první polovině inflace jednodušší navázat komunikaci. Obecněji lze uvažovat o ještě ranějších okamžicích a v půlení

pokračovat. Komunikace bude stále jednodušší, vyjádříme-li náročnost komunikace jako rychlost signálů ke kontaktu potřebnou – nikoli obtížnější. Proto dnešní velmi vzdálené oblasti měly úplně na začátku inflace možnost spolu komunikovat, čímž lze vysvětlit jejich dnes pozorovanou shodnou teplotu.

Jelikož zrychlená expanze zvětší velikost prostoru několikanásobně víc než obyčejné rozpínání v teorii velkého třesku, byly by dvě oblasti na samotném začátku inflace *mnohem* blíže než ve srovnatelném okamžiku standardní teorie velkého třesku. Tento nepoměr ve velikostech velmi raného vesmíru nabízí ekvivalentní způsob, jak pochopit, proč inflace umožňuje pohodlnou komunikaci mezi oblastmi, které na sebe podle standardního velkého třesku nemohly dosáhnout. Je-li v daném okamžiku hned po vzniku vesmíru vzdálenost mezi dvěma oblastmi menší, je pro ně snazší signály si vyměnit.

Vezmeme-li rovnice pro rozpínání vážně i v úplně prvních okamžicích existence (a pro konkrétnost si představíme, že má prostor tvar kulové plochy), potom uvidíme i to, že dvě oblasti by se na počátku vzdalovaly mnohem rychleji podle standardního velkého třesku než podle inflačního modelu: jen tak se mohly podle standardního velkého třesku dostat do větší vzdálenosti od sebe než podle inflační teorie. V tomto smyslu zahrnuje inflační model období, během něhož je tempo rozpínání mezi těmito oblastmi nižší než v obvyklé teorii velkého třesku.

Při popisování inflační kosmologie se lidé často soustřeďují na fantastický nárůst rychlosti rozpínání ve srovnání s konvenčním modelem, a ne na pokles rychlosti. Tento zdánlivý rozpor existuje proto, že oba pohledy srovnávají odlišné fyzikální veličiny. Když srovnáváme trajektorie dvou oblastí, jež dělí od sebe určitá vzdálenost ve velmi raném vesmíru, zjišťujeme, že je inflační teorie žene od sebe mnohem rychleji než teorie velkého třesku; jsou také dnes od sebe mnohem dále podle inflační teorie než podle konvenčního velkého třesku. Uvažujeme-li však o dvou oblastech, které jsou od sebe dnes stále stejně daleko (jako třeba dvě oblasti na opačných stranách noční oblohy, na které jsme upřeli své zraky), potom o nich platí to, co jsem uváděl výše. V daném okamžiku ve velmi raném vesmíru byly tyto dvě oblasti mnohem blíže a vzdalovaly se od sebe mnohem pomaleji podle teorie zahrnující inflační rozpínání než podle teorie bez něho. Smyslem a zásluhou inflačního rozpínání je, že nesmělé a pomalé počáteční vzdalování je vystřídáno neustále narůstající rychlostí tak, aby dnes měly oblasti na obloze stejnou vzdálenost, jakou by měly podle standardní teorie velkého třesku.

Úplný popis problému horizontu by musel zohlednit i podrobnější specifikaci podmínek, v nichž inflační rozpínání začalo, stejně jako následující procesy, díky nimž počalo svou pouť vesmírem reliktní záření. Ale náš zjednodušený výklad postačil k tomu, abychom zdůraznili podstatné rozdíly mezi zrychlujícím se a zpomalujícím se rozpínáním.

- 4 Všimněte si, že když sáček stlačíte, napumpujete do něho také energii, a protože gravitační zkroucení je způsobeno jak hmotností, tak energií, část nárůstu tíhy sáčku bude dána nárůstem energie. O to nám ale nejde. Novinkou je, že i nárůst tlaku samotného přispívá k nárůstu tíhy. (Povšimněte si i toho, že kdybychom měli být precizní, celý „experiment“ by se odehrával ve vakuové komoře, abychom se vyhnuli komplikacím s tlakem okolního vzduchu.) V každodenním životě je tento nárůst nepatrný, zato v astrofyzikálním kontextu může být značný. Fakticky je důležitý pro naše pochopení toho, proč v jistých situacích hvězdy kolabují a mění se v černé díry. Hvězdy obecně zůstávají v rovnováze proto, že ven působící tlak odvíjející se od vnitřních jaderných pochodů ve hvězdě se vyrovná přitažlivé gravitační síle vyvolané hmotností hvězdy. Jestliže hvězda jaderné palivo vyčerpá, klad-

ný tlak poklesne – a hvězda se smrští. Tím se všechny stavební kameny dostanou blíže k sobě a gravitační síla ještě naroste. Aby nedošlo k dalšímu smršťování, je třeba dodatečného tlaku směrem ven (říkáme mu kladný tlak, a to i v textu). Ale i tento dodatečný kladný tlak samotný vyvolává přitažlivou gravitaci, a tak ještě zvyšuje další kladný tlak neodkladně potřebný k tomu, aby se hvězda nezhroutila. Za jistých podmínek to vyústí ve spirálově se zhoršující nestabilitu a to, nač se hvězda normálně spoléhá, aby vyvážila gravitační přitažlivost – kladný tlak –, začne k smršťování hvězdy přispívat natolik intenzivně, že se úplný gravitační kolaps stane nevyhnutelným. Hvězda se zhroutí v černou díru.

- 5 V právě představeném výkladu inflace chybí fundamentální vysvětlení toho, proč se počáteční hodnota inflatonového pole blížila maxima křivky potenciální energie, i toho, proč má křivka právě takový tvar. Jde o předpoklady, které teorie vyžaduje. Pozdější verze inflace, zvláště *chaotická inflace* vypracovaná Andrejem Lindem, stojí na pozorování, že i „obyčejnější“ křivky potenciální energie (například parabolický tvar bez jakéhokoli vodorovného úseku, který se vynojuje z nejjednodušších matematických rovnic pro potenciální energii) mohou zajistit inflační rozpínání. Aby nastalo, musí se hodnota inflatonového pole opět pohybovat „nahore“ v blízkosti maxima křivky potenciální energie. To se může zdát nepravděpodobné, ale extrémně vysoké teploty raného vesmíru takovou situaci mohly přirozeně nastolit.
- 6 Pozorný čtenář se zamyslí ještě nad jednou podrobností. Rychlé rozpínání prostoru v inflační kosmologii s sebou přináší značné ochlazování (podobně jako rychlá komprese prostoru nebo skoro čehokoli jiného přináší nárůst teploty). Když se však inflace blíží k závěru, inflatonové pole osciluje okolo minima své křivky potenciální energie a přenáší svou energii na lázeň částic. Tomuto procesu se v angličtině říká *reheating* (*opětovný ohřev*), protože částice v tomto procesu vytvořené budou mít kinetickou energii, a tudíž je lze charakterizovat teplotou. Když pak prostor pokračuje v obyčejnějším (neinflačním) rozpínání podle teorie velkého třesku, teplota částic v lázni nepřetržitě klesá. Důležitým faktem ovšem je, že homogenita zajištěná inflací zaručuje i homogenní podmínky pro tyto procesy, které proto vedou k homogennímu konečnému stavu.
- 7 Alan Guth si byl věčného charakteru inflace vědom, Paul Steinhardt v různých kontextech o jejím matematickém ztělesnění psal a Alexandr Vilenkin ji vynesl na světlo v nejobecnější podobě.
- 8 Hodnota inflatonového pole určuje množství energie a záporného tlaku, jimiž pole vyplňuje prostor. Čím je energie vyšší, tím rychleji se prostor rozpíná. Rapidní expanze prostoru poté zpětně ovlivní inflatonové pole samotné: čím rychlejší rozpínání je, tím energičtější hodnota inflatonového pole osciluje.
- 9 Pokusím se vypořádat s otázkou, která vás možná napadla a k níž se ještě vrátíme v 10. kapitole. Jak prostor prochází etapou inflačního rozpínání, jeho celková energie narůstá; čím větší je objem prostoru naplněný inflatonovým polem, tím vyšší je úhrnná energie (a je-li prostor nekonečně velký, je i energie nekonečná – v tomto případě bychom měli mluvit o energii obsažené v konečné oblasti prostoru, přičemž tato oblast se také zvětšuje). To s sebou přirozeně přináší otázku: Co je zdrojem této energie? V analogické situaci s lahví šampaňského jsou zdrojem energie vaše svaly. Co hraje roli svalů v rozpínajícím se kosmu? Odpověď zní: gravitace. Stejně jako byly vaše svaly nástrojem, který umožnil prostoru uvnitř láhve se zvětšit (tím, že jste povytáhli zátku), je gravitace nástrojem, který umožňuje nárůst objemu vesmíru. Je třeba si uvědomit, že energie gravitačního pole může být libovolně záporná. Uvažujte o dvou částicích, které vlivem gravitační přitažlivosti padají k sobě navzájem. Gravitace je donutí, aby k sobě letěly stále rychleji, přičemž jejich

kinetická energie je stále kladnější. Gravitační pole může obě částice takovou kladnou energií zásobovat proto, že gravitace může odčerpávat energii ze svých rezerv, které při tomto ději klesají ke stále nižším záporným hodnotám: čím blíže se k sobě částice dostanou, tím zápornější se gravitační energie stane (jinak řečeno – tím větší je kladná energie, kterou byste potřebovali přidat, abyste překonali gravitační sílu a částice opět oddělili). Gravitace je tedy něco jako banka s bezedným úvěrovým limitem, a proto může donekonečna půjčovat peníze; gravitační pole může zásobovat zbytek vesmíru nevyčerpatelnou energií proto, že jeho vlastní energie může klesnout jakkoli hluboko pod nulu. A právě z tohoto prazdroje energie si inflační rozpínání stáčí energii.

- 10 Dám přednost termínu „vesmírná bublina“, třebaže i „vesmírná kapsa“ (propagovaná Alanem Guthem), která se může rozevřít uvnitř okolního prostředí zaplněného inflatonem, je výstižná a vyvolává správné představy. Pojmy „bublinový vesmír“ a „kapesní vesmír“ by mohly být dalšími vhodnými synonymy.
- 11 Čtenář zběhlý v matematice dá přednost přesnějšímu popisu vodorovné osy na obrázku na straně 62: uvažujte o dvourozměrné kulové ploše obsahující vzdálené body v časoprostoru, které dnes vidíme a v nichž se reliktní záření začalo volně pohybovat prostorem. Jako u každé jiné sféry lze zavést pohodlnou soustavu souřadnic sestávající ze dvou úhlů. Teplota reliktního záření se potom dá považovat za funkci těchto dvou úhlových souřadnic a každou takovou funkci lze rozložit do Fourierových řad, přesněji řečeno do báze standardních sférických harmonických funkcí $Y_{lm}(\theta, \phi)$. Svislá osa na zmíněném obrázku potom vyjadřuje velikost koeficientů pro každý člen v rozvoji – body blíže pravému okraji vodorovné osy odpovídají menší úhlové vzdálenosti. Technické podrobnosti lze nalézt například ve vynikající knize Scotta Dodelsona *Modern Cosmology* (Academic Press, San Diego, Kalifornie 2003).
- 12 Přesněji řečeno: nejde o intenzitu gravitačního pole samotnou, která určuje zpomalování času, ale o gravitační potenciál. Kdybyste kupříkladu „viseli“ uvnitř velké kulové dutiny velmi těžké hvězdy, žádnou gravitační sílu byste necítili, ale protože byste se ocitli v hloubce gravitačního potenciálové jámy, čas by na vašich hodinkách ubíhal pomaleji než na hodinkách mimo hvězdu.
- 13 K takovému výsledku (a s ním úzce souvisejícími myšlenkami) dospělo mnoho badatelů v mnoha kontextech, ale nejsrozumitelněji jej formuloval Alexandr Vilenkin a Sidney Coleman s Frankem DeLucciou.
- 14 Jak si možná vzpomínáte, v našem povídání o sešíváném vesmíru jsme předpokládali, že uspořádání částic by se náhodně měnilo od záplaty k záplatě. Souvislost mezi sešívaným a inflačním multivesmírem umožňuje tento předpoklad i zdůvodnit. V dané oblasti se vytvoří vesmírná bublina, klesne-li v ní hodnota inflatonového pole; když se tak stane, energie v inflatonu obsažená se přemění na částice. Přesné uspořádání těchto částic v každé chvíli je určeno přesnou hodnotou inflatonového pole během procesu konverze. Ale poněvadž na inflatonové pole působí kvantové chvění, bude pole v průběhu poklesu ovlivněno náhodnými variacemi – týmiž náhodnými variacemi, které vytvořily obrazec s trochu teplejšími a trochu chladnějšími „kaňkami“ na obrázku na straně 61. Jaké to má důsledky pro všechny záplaty ve vesmírné bublině? Chvění zjevně vyvolá náhodné kvantové variace hodnot inflatonového pole. A tato náhodnost se promítne i do náhodnosti výsledného rozdělení částic. Proto očekáváme, že kterékoli uspořádání, například i to zodpovědné za všechno, co dnes vidíme, bude replikováno stejně často jako každé jiné.

Kapitola čtvrtá: Sjednocování přírodních zákonů

- 1 Děkuji Walteru Isaacsonovi za osobní debatu o této historické otázce spjaté s Einsteinem i o dalších.
- 2 Chceme-li jít trochu do hloubky, tak Glashowovy, Salamovy a Weinbergovy poznatky prokázaly, že elektromagnetická a slabá síla byly dvěma aspekty kombinované *elektroslabé* síly, jejíž teoretický popis byl potvrzen experimenty na urychlovačích na sklonku sedmdesátých a začátku osmdesátých let. Glashow a Georgi šli o krok dále, než kam dospěla elektroslabá teorie: usoudili, že elektroslabá a silná síla jsou dvěma aspekty ještě fundamentálnější síly. Stali se tak průkopníci přístupu, jemuž se říká *velké sjednocení*. Nejjednodušší verze velkého sjednocení byla ovšem vyvrácena, jakmile se vědcům nepotvrdila jedna z jeho předpovědí – že by se protony jednou za čas měly rozpadnout. Nicméně některé další verze velkého sjednocení zatím žádným experimentům neodporují, protože například předpovídají natolik pomalý rozpad protonu, že stávající experimenty zatím nemají dostatečnou citlivost, aby o správnosti této předpovědi rozhodly. Ale i když údaje velké sjednocení nepodepřou, nemůže být pochyb o tom, že tři negravitační síly lze popsat společným matematickým jazykem kvantové teorie pole.
- 3 Objev teorie superstrun vyprovokoval další, úzce související přístupy, které si kládou za cíl vybudovat jednotnou teorii přírodních sil. Od poloviny sedmdesátých let byla konkrétně intenzivně studována *supersymetrická kvantová teorie pole* a její gravitační rozšíření, *supergravitace*. Supersymetrická kvantová teorie pole a supergravitace jsou založeny na novém principu *supersymetrie*, principu objeveném na půdě teorie superstrun, ale tyto přístupy začleňují supersymetrii do konvenčních teorií bodových částic. O supersymetrii si toho řekneme víc o něco dál v této kapitole. Pro matematicky založeného čtenáře musím hned uvést, že supersymetrie je poslední dostupná symetrie (vedle rotační, translační, Lorentzovy a obecněji Poincarého symetrie) v libovolné netriviální teorii elementárních částic. Dává do souvislosti částice o různém kvantověmechanickém spinu, čímž uzákoňuje hluboký matematický příbuzenský vztah mezi částicemi, které zprostředkovávají síly, a částicemi, z nichž se skládá hmota. Supergravitace je takovým rozšířením supersymetrie, jež zahrnuje i gravitační sílu. V raných dnech výzkumu teorie strun si vědci uvědomili, že se supersymetrické a supergravitační teorie vynořují z nízkoenergetického rozboru strunové teorie. Při nízkých energiích obecně nelze rozpoznat, že struna má nenulovou délku, a tak se jeví jako bodová částice. Spolu s tím, jak v této kapitole uvedeme, se teorie strun redukuje na kvantovou teorii pole. Vědci zjistili, že supersymetrie i gravitace tuto transformaci přečkají, a proto strunová teorie v sobě při nízkých energiích zahrnuje supersymetrickou kvantovou teorii pole i supergravitaci jako mezní případy. V nedávné době, jak se dočtete v 9. kapitole, se důležitost a hloubka spojení mezi supersymetrickou kvantovou teorií pole a strunovou teorií ještě zvýšila.
- 4 Informovaného čtenáře může iritovat můj výrok, že každé pole je spojeno s určitou částicí. Přesněji bych měl říct, že malé fluktuace pole kolem lokálního minima jeho potenciálu se obecně dají interpretovat jako částicové excitace neboli vzruchy. Nic více pro stávající diskusi nepotřebujeme. Poučený čtenář si navíc všimne i toho, že lokalizace částice v jednom bodě je sama o sobě idealizací, protože by k takovému umístění bylo – kvůli principu neurčitosti – zapotřebí nekonečného množství hybnosti a energie. Tím podstatným i tentokrát je, že kvantová teorie pole neklade v principu žádné omezení na to, jak přesně lokalizovaná může částice být.

- 5 Historicky viděno byla matematická metoda známá jako *renormalizace* vyvinuta proto, aby se vypořádala s prudkým chvěním kvantových polí na krátkých vzdálenostech (při vysoké energii). Když se aplikovala na kvantové teorie pole tří negravitačních sil, vyléčila nekonečnost veličin, která se v různých výpočtech objevila, a umožnila fyzikům fantasticky přesné předpovědi. Když byla ale renormalizace použita na kvantové chvění gravitačního pole, ukázala se jako neefektivní: nedokáže odstranit nekonečna, která se vynořují při kvantových výpočtech zahrnujících gravitaci. Na tato nekonečna lze nazírat i modernějším, dosti odlišným způsobem. Fyzici si totiž postupně uvědomili, že na cestě ke stále hlubšímu chápání přírodních zákonů je rozumné předpokládat, že každá navržená teorie je provizorní a že – je-li vůbec alespoň částečně správná – může pravděpodobně popsat jen fyzikální jevy do jistého měřítká délek (nebo až k určité energetické škále). Za touto mezí existují jevy, o nichž daná teorie nic jasného říct nemůže. Když takový náhled přijmeme, bylo by zřejmě bláznovstvím teorii extrapolovat až k vzdálenostem kratším (nebo k energiím vyšším), než je doména platnosti teorie. A je-li aplikovatelnost teorie od samého počátku takto omezena (nebo oříznuta něčím, čemu se anglicky říká *cutoff*), potom nekonečna při výpočtech vůbec nevzniknou. To znamená, že teorie má schopnost předpovídat jen ty jevy, které nepřekročí její mantinely – že nedovede cokoli říct o jevech na velmi krátkých vzdálenostech (nebo při velmi vysokých energiích). Tím konečným cílem úplné teorie kvantové gravitace je povznést se nad tato omezení a číselně předpovídat jevy o libovolně velké (nebo malé) charakteristické vzdálenosti.
- 6 Představu o tom, odkud se tato konkrétní čísla berou, můžete získat, uvědomíte-li si, že kvantová mechanika (diskutovaná v 8. kapitole) přisuzuje každé částici vlnu, přičemž vlnová délka (vzdálenost mezi dvěma sousedními hřebeny neboli maximy) je kratší u těžších částic. Einsteinova obecná teorie relativity také přidružuje každému objektu vzdálenost – průměr oblasti, do které je třeba těleso natlačit, aby se vytvořila černá díra. Čím těžší je objekt, tím větší je tato velikost. Představte si tedy, že začnete s částicí popsanou kvantovou mechanikou a pomalu zvětšujete její hmotnost. Její kvantová vlnová délka se tím zkracuje, zatímco „velikost odpovídající černé díry“ se zvětšuje. Pro určitou hmotnost si budou tyto dvě vzdálenosti rovny – a tato hmotnost a odpovídající délka určuje standard pro situaci, v níž jsou kvantověmechanické a obecněrelativistické úvahy stejně důležité. Když tento experiment převedeme do jazyka rovnic, vyjde nám hmotnost a velikost odpovídající těm z hlavního textu – Planckova hmotnost a Planckova délka. Předem prozradím, že v 9. kapitole bude řeč o *holografickém principu*. Tento princip na základě obecné teorie relativity a fyziky černých děr zdůvodňuje velmi konkrétní omezení na počet fyzikálních stupňů volnosti, které mohou „obývat“ konkrétní oblast prostoru (jde o zpřesněnou verzi výkladu z 2. kapitoly o počtu různých uspořádání částic v daném objemu prostoru; zmiňuje se o tom i poznámka 14 k 2. kapitole). Je-li tento princip platný, potom konflikt mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou se může vynořit dříve, než začnou být vzdálenosti velmi krátké a křivost velmi vysoká. Velký objem obsahující ba i plyn o nízké hustotě by měl podle kvantové teorie pole mnohem více stupňů volnosti, než dovoluje holografický princip (který závisí na obecné relativitě).
- 7 Kvantověmechanický spin je delikátní pojem. Zvláště v kvantové teorii pole, kde se částice znázorňují jako body, je těžké „selským rozumem“ pochopit, co by „otáčení kolem osy“ vůbec mohlo znamenat. Odpověď zní, že experimenty ukazují, že částice nezbytně disponují vlastností, která se chová přesně jako konstantní porce momentu hybnosti. Kvantová teorie navíc ukazuje, a experimenty to potvrzují, že

částice mohou mít pouze moment hybnosti, který je celočíselným násobkem jisté fundamentální veličiny (reduované Planckovy konstanty vydělené dvěma). Protože i klasické objekty rotující kolem své osy mají vlastní moment hybnosti (jehož velikost se ovšem může – spolu s tím, jak se mění rychlost rotace – měnit), teoretici si vypůjčili anglické slůvko „spin“ pro rotaci kolem osy a aplikovali ho na tuto analogickou kvantovou situaci. Zatímco představa spinu elektronu jako „rotace setrvačnicku kolem osy“ vystačí k přibližné charakteristice spinu, bylo by přesnější říct, že částice nejsou definovány pouze svou hmotností, elektrickým nábojem a jadernými náboji, ale i „vrozeným“ a neměnným množstvím momentu hybnosti, který nesou ve formě spinu. Elektrický náboj přijímáme jako jednu z definujících vlastností každé částice a podle experimentů bychom měli stejně zacházet i se spinem dané částice.

- 8 Vzpomeňte si, že napětí mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou je způsobeno intenzivními kvantovými oscilacemi gravitačního pole, které otrásají prostorem natolik energicky, že si s tím tradiční matematické metody neumějí poradit. Podle kvantové neurčitosti se toto chvění stává tím silnější, čím kratší vzdálenosti jsme schopni rozlišit (proto také toto chvění nejsme schopni postřehnout v běžném životě). Výpočty konkrétně ukazují, že jde o divoké oscilace na vzdálenostech kratších než Planckova délka, kvůli kterým se matematika „porouchá“ (čím kratší vzdálenost, tím vyšší energie oscilací). Protože kvantová teorie pole popisuje částice jako body bez jakékoli prostorové velikosti, vzdálenosti, které tyto částice mohou „pocítit“, lze libovolně zkrátit, takže na ně může působit kvantové chvění o jakkoli vysoké energii. Teorie strun to ale mění. Struny nejsou bodové – mají nenulovou délku. To znamená, že existuje omezení toho, jak krátké vzdálenosti lze zkoumat, a to i v principu, protože struna nemůže rozpoznat strukturu hmoty na vzdálenostech kratších, než je její vlastní velikost. Toto omezení ohledně nejkratší možné dosažitelné vzdálenosti lze také vyjádřit jako omezení nejvyšší možné energie kvantových oscilací. Takový „strop“ stačí ke zkrocení vzpurné matematiky, což strunové teorii umožňuje skloubit obecnou relativitu a kvantovou mechaniku.
- 9 Kdyby byl objekt opravdu jednorozměrný, těžko bychom ho mohli vidět přímo, protože by neměl žádný povrch, od něhož by se mohly odrážet fotony, ani schopnost vytvářet vlastní fotony svými vlastními atomovými přechody. Když tedy v textu používám slovo „vidět“, mám na mysli pozorovat nebo jinak experimentálně zkoumat hypoteticky nenulovou velikost daného předmětu. Tvrdím potom, že libovolná velikost, která je menší než schopnost vaší experimentální procedury rozlišit malé vzdálenosti, proklouzne, aniž by ji váš experiment zaznamenal.
- 10 *What Einstein Never Knew* (Co Einstein nikdy nevěděl), dokumentární film veřejnoprávní televize PBS ze seriálu pořadů NOVA, 1985.
- 11 Přesněji řečeno – stavební kámen vesmíru, který by byl nejdůležitější pro naši existenci, by byl zcela odlišný. Protože známé částice a objekty, které se z částic skládají – hvězdy, planety, lidé apod. –, tvoří ani ne 5 % hmotnosti vesmíru, neovlivnila by taková porucha drtivou většinu vesmíru, alespoň ne drtivou většinu hmotnosti vesmíru. Pokud ale jde o vliv na život, jak ho známe, šlo by o proměnu dalekosáhlou.
- 12 Zákony kvantové teorie pole poněkud omezují možné hodnoty těchto vnitřních parametrů. Aby zabránily určitým nepřijatelným fyzikálním jevům (například narušení klíčových zákonů zachování, porušení jistých transformací spojených se symetriemi atd.), občas rovnice zakážou některé hodnoty nábojů (elektrických i jaderných), které částice v teorii mohou mít. K tomu je ještě třeba zaručit, aby při libovolném procesu byl součet pravděpodobností všech možných koncových stavů

roven jedné, což limituje i možné hmotnosti částic. Přesto i s takovými omezeními zbývá hodně volnosti při určování vlastností částic.

- 13 Někteří fyzici by poznamenali, že ačkoli vlastnosti částic nelze vysvětlit ani kvantovou teorií pole, ani teorií strun ve stávajícím stavu, nabývá tento úkol ve strunové teorii na naléhavosti. Vysvětlit, proč tomu tak je, je úkol trochu náročnější, ale technicky založenému čtenáři nabídnu shrnutí. V kvantové teorii pole jsou vlastnosti částic – řekněme konkrétně jejich hmotnost – určeny čísly, která se musí dosadit do rovnic teorie. To, že kvantová teorie pole dovoluje, aby se taková čísla měnila, je matematickým vyjádřením skutečnosti, že kvantová teorie pole hmotnosti částic neurčuje, považuje je jen za vstupní údaje. Ve strunové teorii má „ohebnost“ hmotností částic podobný matematický původ – rovnice dovolují konkrétním číslům, aby se spojitě měnila –, ale projev této „ohebnosti“ je více vidět. Tato čísla, jež lze měnit – čísla, která se dají nastavit, aniž by se změnila energie –, odpovídají existenci nehmotných částic. (Jazykem křivek potenciální energie zavedeným v 3. kapitole bychom řekli, že energii polí spojených s těmito částicemi zcela vyjadřuje vodorovná křivka. Právě jako procházka po zcela plochém terénu neovlivní vaši potenciální energii, nestála by ani změna hodnot takového pole žádnou energii. Protože hmotnost částice odpovídá zakřivení křivky potenciální energie příslušného kvantového pole v okolí minima této křivky, kvanta těchto polí jsou nehmotná.) Přebytný počet nehmotných částic je obzvláště nepříjemnou vlastností každého navrženého modelu, protože údaje z urychlovačů i kosmologických pozorování kladou přísná omezení na vlastnosti i samotnou existenci těchto částic. Aby byl model strunové teorie životaschopný, je nezbytné, aby tyto částice získaly nenulovou hmotnost. V posledních letech řada článků předvedla, jakým způsobem k tomu opravdu dochází. V mnoha případech jsou zdrojem hmotnosti toky, které mohou být uvězněny v dírách v mnohorozměrných Calabiho-Yauových tvarech. Něco si o těchto poznátcích povíme v 5. kapitole.
- 14 Nelze vyloučit, že experimenty přinesou údaje a argumenty, které teorii strun značně oslabí. Struktura teorie strun zaručuje, že jisté základní principy musejí být dodrženy všemi fyzikálními jevy. Mezi tyto principy patří *unitarita* (součet pravděpodobností všech možných výsledků experimentu musí být roven jedné) a *lokální Lorentzova invariance* (v dostatečně malé oblasti platí zákony speciální relativity), ale i poněkud techničtější vlastnosti, například *analytičnost a křížová symetrie* čili anglicky *crossing symmetry* (vypočtená pravděpodobnost srážek částic musí záviset na hybnostech částic způsobem, který respektuje konkrétní sadu matematických kritérií). Kdyby údaje – například ty z hadronového srážče LHC – ukázaly, že kterýkoli z těchto principů je v přírodě narušen, bylo by velmi obtížné tato data se strunovou teorií skloubit. (Bylo by těžké tato data vysvětlit i ve standardním modelu částicové fyziky, který tyto principy také respektuje; ten však předpokládá, že na dostatečně vysoké energetické škále se v teorii mohou objevit nové jevy, přinejmenším ty, které mají na svědomí kvantovou gravitaci. Data v rozporu s kterýmkoli z principů popsaných výše by byla nepřímým důkazem, že strunová teorie není schopna popsat nové fyzikální jevy.)
- 15 O středu černé díry se často mluví jako o místě v prostoru. Nejde o místo, ale o okamžik v čase. Když překročíme horizont událostí černé díry, čas a prostor (jeho radiální směr) si vymění úlohy. Spadnete-li do černé díry, představuje váš radiální pohyb například evoluci v čase. Do středu černé díry jste tedy přitahováni ve stejném smyslu, v jakém jste normálně tlačeni od jednoho okamžiku času k následujícímu. Střed černé díry je v tomto smyslu poslední okamžik v čase, analogický velkému krachu vesmíru.

- 16 Entropie je z mnoha důvodů ve fyzice klíčovým pojmem. V našem případě slouží entropie coby diagnostický nástroj k zjištění, zda strunová teorie nepřehlídí při svém popisu černých děr nějaké podstatné fyzikální jevy. Kdyby tomu tak bylo, nepořádek černé díry spočtený podle teorie strun by měl nesprávnou velikost. Fakt, že strunová odpověď přesně souhlasí s tím, na co Bekenstein a Hawking přišli zcela odlišnými úvahami, je znamením, že strunová teorie poskytuje správný fundamentální popis této fyzikální situace. Je to velmi povzbuzující výsledek. Více podrobností naleznete v 13. kapitole *Elegantního vesmíru*.
- 17 První náznak tohoto párování Calabiho-Yauových tvarů se objevil v práci Lance Dixona a v nezávislém článku Wolfanga Lerche, Nicholase Warnera a Cumruna Vafy. Já spolu s Ronenem Plesserem jsme našli metodu, jak zkonstruovat první konkrétní příklady takového párování. Párům jsme dali název *zrcadlité páry* a vztahu mezi oběma členy *zrcadlitá symetrie*. Spolu s Plesserem jsme ukázali i to, že obtížné výpočty na jednom členu zrcadlitého páru, závislé na zdánlivě neproniknutelných podrobnostech, jako je počet sfér, které lze „zabalit“ do daného tvaru, lze přeložit do výrazně zvladatelnějších výpočtů na zrcadlitém tvaru. Tohoto výsledku se také chopili Philip Candelas, Xenia de la Ossaová, Paul Green a Linda Parkesová a použili ho v praxi – vyvinuli metody pro explicitní výpočet identity; s tou jsem já a Plesser dali do souvislosti „složitý“ a „jednoduchý“ vzorec. Za pomoci jednoduchých vzorců pak získali informaci o „obtížném“ partnerovi, včetně čísel spojených se „zabalnými“ kulovými plochami, o nichž jsem mluvil v hlavním textu. V následujících letech se zrcadlitá symetrie stala téměř samostatnou disciplínou matematiky, v níž bylo dosaženo mnoho důležitých výsledků. Podrobnou historii líčí kniha Shing-Tung Yau a Steva Nadise, *The Shape of Inner Space* (Basic Books, New York 2010).
- 18 Tvzení zastánců teorie strun, že úspěšně sjednotila kvantovou mechaniku a obecnou relativitu, je podpořeno velkým množstvím fungujících výpočtů, ale možná ještě více výsledky, které si přiblížíme v 9. kapitole.

Kapitola pátá: Vesmíry vznášející se v nedalekých dimenzích

- 1 Klasická mechanika: $\vec{F} = m\vec{a}$. Elektromagnetismus: $d^*F = *j$; $dF = 0$. Kvantová mechanika: $H\psi = i\hbar \frac{d\psi}{dt}$. Obecná relativita: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$.
- 2 Mluvíme o *konstantě jemné struktury*, $\alpha = e^2/\hbar c$, jejíž číselná hodnota je (při dosažitelných energiích elektromagnetických procesů) přibližně 1/137, což je asi 0,0073.
- 3 Witten argumentoval, že nastaví-li se vazbová konstanta strunové teorie typu I na vysokou hodnotu, teorie se promění na heterotickou-O teorii s vazebnou konstantou, která je nastavena na hodnotu nízkou, a naopak. Teorie typu IIB se zase při vysoké vazbové konstantě promění *sama na sebe*, tedy na teorii typu IIB, ovšem s nízkou vazbovou konstantou. Chování heterotické-E teorie a teorie typu IIA překvapuje o trochu víc (viz podrobnosti v *Elegantním vesmíru*, 12. kapitola), ale obecně lze říct, že všech pět teorií spojuje propletenec vzájemných vztahů.
- 4 Matematicky založenému čtenáři prozradím, že specifickou vlastností strun, jedno-rozměrných stavebních kamenů, je to, že fyzikální zákony popisující jejich pohyb respektují nekonečně-rozměrnou grupu symetrií. Když se struna pohybuje, vykresluje dvourozměrný povrch, a proto jsou rovnice pohybu odvozeny z funkcionálu pro akci neboli účinek, který definuje dvourozměrnou teorii pole. Klasicky jsou takové dvourozměrné akce konformně invariantní (nemění se při přeškálování dvourozměrného povrchu, které zachovává úhly) a taková symetrie se dá při uva-

lení jistých omezení (například na počet rozměrů, jimiž se struna pohybuje, tedy na dimenzi časoprostoru) zachovat i kvantověmechanicky. Konformní grupa těchto symetrií či transformací je nekonečněrozměrná, což je podstatné pro zaručení matematické konzistence poruchového rozboru pohybující se struny. Bez této symetrie by například měl nekonečný počet vzruchů pohybující se struny zápornou normu (způsobenou záporným znaménkem časové složky časoprostorové metriky), ale tyto excitace lze „odtransformovat“ pryč s pomocí této nekonečněrozměrné grupy symetrií. Podrobnosti čtenář nalezne v knize Michaela Greena, Johna Schwarzera a Edwarda Wittena, *Superstring Theory*, sv. 1 (Cambridge University Press, Cambridge 1988).

- 5 Jako v případě všech velkých objevů si uznání zaslouží jak ti, z jejichž práce byly vybudovány základy teorie, tak i ti, kteří svými výsledky prokázali důležitost těchto základů. Jednu z těchto úloh sehráli při objevu brán ve strunové teorii Michael Duff, Paul Howe, Takeo Inami, Kellogg Stelle, Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin, Paul Townsend, Chris Hull, Chris Pope, John Schwarz, Ashoke Sen, Andrew Strominger, Curtis Callan, Joe Polchinski, Petr Hořava, Jin Dai, Robert Leigh, Hermann Nicolai a Bernard de Wit.
- 6 Pozorný čtenář by mohl namítnout, že v inflačním multivesmíru hraje úlohu i čas, protože hranice naší bubliny koneckonců označuje začátek času v našem vesmíru; vně této bubliny znamená za hranicemi našeho času. To je sice pravda, ale moje nejnovější tvrzení je míněno obecněji – multivesmíry, o nichž jsme zatím mluvili, se vynořují z analýz, které se zaměřují primárně na procesy odehrávající se v celém prostoru. V tom multivesmíru, který představím teď, je čas klíčový od samotného počátku.
- 7 Alexandr Fridman, *Svět jako prostor a čas*, 1923, publikováno v ruštině a zmíněno v článku Helgeho Kragha, „Continual Fascination: The Oscillating Universe in Modern Cosmology“, *Science in Context* 22, č. 4 (2009): 587–612.
- 8 Zajímavým detailem je, že autoři cyklického modelu v bránovém světě přisuzují skryté energii jednu obzvláště praktickou úlohu (o skryté energii se v úplnosti dozvíte v 6. kapitole). V poslední fázi každého cyklu zaručuje přítomnost skryté energie v bránových světech souhlas s dnešními pozorováními zrychlující se expanze; tato zrychlující se expanze následně zředuje hustotu entropie a tím připravuje půdu pro další kosmologický cyklus.
- 9 Velké hodnoty toku mají též tendenci destabilizovat danou Calabiho-Yauovu varietu z dodatečných rozměrů. Tyto toky konkrétně vedou k nafukování Calabiho-Yauova tvaru, jehož velikost se nakonec ocitne v konfliktu s požadavkem, že by dodatečné rozměry neměly být viditelné.

Kapitola šestá: Nový pohled na jednu starou konstantu

- 1 George Gamow, *My World Line* (Viking Adult, New York 1970); česky *Moje světočára* (Mladá fronta, Praha 2000); J. C. Pecker, dopis editorovi, *Physics Today*, květen 1990, str. 117.
- 2 Albert Einstein, *The Meaning of Relativity* (Princeton University Press, Princeton 2004), str. 127. Všimněte si, že Einstein termín „kosmologický člen“ použil pro to, čemu dnes říkáme „kosmologická konstanta“; v zájmu jasnosti jsem do textu dosadil novější název.
- 3 *The Collected Papers of Albert Einstein*, ed. Robert Schulmann a kol. (Princeton University Press, Princeton 1998), str. 316.

- 4 Samozřejmě že určité věci se *mění*. Jak jsem zdůraznil v poznámkách ke 3. kapitole, galaxie obecně mají i určité rychlosti, jež s rozpínáním prostoru nesouvisí. V průběhu kosmologicky dlouhých dob může takový dodatečný pohyb změnit relativní polohy; takový pohyb může mít za následek i tak zajímavé astrofyzikální události, jako jsou srážky nebo splynutí galaxií. Jde-li o vysvětlování kosmických vzdáleností, můžeme tyto komplikace ovšem bezpečně ignorovat.
- 5 Jedna dodatečná komplikace sice podstatnou myšlenku, kterou jsem vysvětlil, neovlivňuje, ale hraje roli při vědeckém rozboru těchto otázek. Když fotony letí z dané supernovy směrem k nám, jejich počet na jednotku objemu se rozředí tak, jak jsem popsal. Kromě toho ovšem energie klesá i z dalšího důvodu. V další podkapitole popíšu, jak rozpínání prostoru prodlužuje i vlnovou délku fotonů, čímž jejich energie klesá – tento jev je znám jako *rudý (červený) posuv*. Vyložím tam, jak astronomové na základě údajů o rudém posuvu zjišťují velikost vesmíru v době, kdy byly fotony vyslány – a to je důležitý krok k určení toho, jak se rozpínání prostoru měnilo v čase. Ale roztahování fotonů – úbytek jejich energie – má ještě jeden důsledek: přispívá k utlumení či ztemnění vzdáleného zdroje. Aby tedy srovnáním absolutní a zdánlivé jasnosti správně určili vzdálenost supernovy, musejí astronomové vzít do úvahy úbytek fotonů v jednotce objemu (zmiňovaný v textu) i dodatečný úbytek energie vyvolaný rudým posuvem. (Ještě přesněji: ten dodatečný úbytek energie je třeba započítat dvakrát; druhý koeficient rudého posuvu odpovídá frekvenci, s jakou fotony přilétají, samy o sobě roztaženy rozpínáním vesmíru.)
- 6 Při správné interpretaci lze i druhý možný význam měřené vzdálenosti považovat za správný. V příkladu s rozpínajícím se povrchem Země se New York, Austin a Los Angeles od sebe vzdalují, ale každé z měst zaujímá jako předtím stále stejné místo na Zemi. Města se vzdalují proto, že se povrch nafukuje, nikoli proto, že je někdo vykope, naloží na kamion a odveze na nové místo. Podobně se i galaxie vzdalují kvůli rozpínání kosmu, takže zaujímají stále stejná místa. Můžete si představit, že jsou přišité ke tkanině prostoru. Když se tkanina rozpíná, galaxie se vzdalují, ale každá zůstává připoutaná k místu, v němž byla vždycky. Ačkoli se tedy druhá a třetí odpověď zdánlivě liší – ta druhá se zaměřuje na vzdálenost mezi námi a místem, kde byla vzdálená galaxie před velmi dlouhou dobou, když supernova vyslala světlo, jež právě pozorujeme, zatímco ta třetí má na mysli vzdálenost, která nás dělí od dnešní polohy druhé galaxie –, ve skutečnosti se shodují. Druhá galaxie je teď umístěna na stejném místě jako po miliardy předchozích let. Jen tehdy kdyby se posunula *v prostoru* a nevezla se pouze na vlně rozpínajícího se vesmíru, zaujala by jiné místo. V tomto smyslu jsou druhá a třetí odpověď totožné.
- 7 Matematicky zdatný čtenář si rád přečte odvození vzdálenosti – nyníšší, v čase $t_{\text{nyní}}$ –, kterou světlo urazilo od chvíle $t_{\text{vysláno}}$, kdy bylo vysláno. Budeme pracovat v kontextu příkladu, v němž je prostorová část časoprostoru plochá, a proto lze metriku napsat jako $ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dx^2$, kde $a(t)$ je škálový koeficient vesmíru v čase t a c je rychlost světla. Zde používaným souřadnicím se říká *komobilní* (anglicky *co-moving*). V jazyce této kapitoly je lze považovat za identifikaci bodů na statické mapě; škálový koeficient přidává stejnou informaci jako legenda k mapě. Specifickou vlastností trajektorií, po nichž letí světlo, je to, že podél nich platí $ds^2 = 0$ (tato podmínka je ekvivalentní tomu, že světlo vždy letí rychlostí c), což znamená, že $|dx| = \frac{cdt}{a(t)}$ neboli po integraci přes konečný časový úsek od $t_{\text{vysláno}}$ do $t_{\text{nyní}}$, $\int |dx| = \int_{t_{\text{vysláno}}}^{t_{\text{nyní}}} \frac{cdt}{a(t)}$, kde integrační meze lze přidat k integrálu přes t na pravé straně. Levá strana této rovnice ukazuje vzdálenost, kterou světlo musí urazit na statické

mapě mezi okamžikem emise a nynější dobou. Abychom tuto vzdálenost na mapě přepočítali na vzdálenost v reálném prostoru, musíme vzorec násobit dnešním škálovým koeficientem; proto světlo urazilo celkovou vzdálenost $a(t_{\text{nyní}}) \int_{t_{\text{vysláno}}}^{t_{\text{vysláno}}} \frac{cdt}{a(t)}$, kde integrál přes t jde od $t_{\text{vysláno}}$ do $t_{\text{nyní}}$. Kdyby se prostor nerozpínal, vzorec by se podle očekávání zredukoval na jednoduchý integrál se správnými mezemi, $\int_{t_{\text{nyní}}}^{t_{\text{vysláno}}} cdt = c(t_{\text{nyní}} - t_{\text{vysláno}})$. Když tedy počítáme vzdálenost uraženou v nafukujícím se vesmíru, je každý segment trajektorie světla násoben koeficientem $\frac{a(t_{\text{nyní}})}{a(t)}$, tedy koeficientem udávajícím, kolikrát se tento segment roztáhl mezi okamžikem, kdy jím světlo prolétlo, a nynějším okamžikem.

- 8 Přesněji $7,12 \cdot 10^{-27}$ kilogramu na krychlový metr.
- 9 Konverze je $7,12 \cdot 10^{-27}$ kilogramu/krychlový metr = $(7,12 \cdot 10^{-27}$ kilogramu/krychlový metr) $\cdot (4,6 \cdot 10^7$ Planckových hmot/kilogram) $\cdot (1,62 \cdot 10^{-35}$ metru/Planckova délka)³ = $1,38 \cdot 10^{-123}$ Planckovy hmoty/Planckův objem.
- 10 V případě inflace byla uvažovaná odpuzivá síla interzivní a působila krátce. To se dá vysvětlit nesmírnou energií a záporným tlakem inflatonového pole. Ale úpravou křivky potenciální energie lze množství energie a záporného tlaku snížit, čímž se zrychlené rozpínání zmírní. K tomu lze ještě vhodně upravit křivku potenciální energie tak, aby se období zrychleného rozpínání prodloužilo. Mírné a dlouhé období zrychlujícího se rozpínání je zapotřebí k vysvětlení údajů ze supernov. Malá nenulová hodnota kosmologické konstanty zůstává i po deseti letech od zlomového pozorování nejpřesvědčivějším vysvětlením pro takové zrychlující se rozpínání.
- 11 Čtenář, který má rád matematiku, by si měl povšimnout toho, že příspěvek každého takového chvění k energii je nepřímo úměrný vlnové délce; to zaručuje, že sčítáním přes všechny možné vlnové délky dostaneme nekonečnou energii.
- 12 V řeči matematických operací nastává vyrušení proto, že supersymetrie vytváří páry z bosonů (částic s celočíselným spinem) a fermionů (částic se spinem, který je lichým násobkem jedné poloviny). Kvůli tomu jsou bosony popsány komutujícími proměnnými (proměnnými splňujícími $ab = ba$), zatímco fermiony antikomutujícími ($ab = -ba$). V tomto rozdílu lze nalézt původ opačného znaménka v jejich kvantových fluktuacích.
- 13 Ačkoli vědecká komunita povětšinou přijímá tvrzení, že změny fyzikálních vlastností našeho vesmíru by vedly k záhubě života, někteří vědci tvrdí, že interval těchto parametrů slučitelných se životem by mohl být širší, než se dosud předpokládalo. O těchto otázkách se toho napsalo hodně. Viz například: John Barrow a Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford University Press, New York 1986); John Barrow, *The Constants of Nature* (Pantheon Books, New York 2003); český *Konstanty přírody* (Paseka, Praha 2005); Paul Davies, *The Cosmic Jackpot* (Houghton Mifflin Harcourt, New York 2007); český *Kosmický jackpot* (Argo a Dokořán, Praha 2009); Victor Stenger, *Has Science Found God?* (Prometheus Books, Amherst, New York 2003); a literatura tam zmíněná.
- 14 Na základě látky z předchozích kapitol byste mohli unáhleně tvrdit, že odpověď musí být rozhodně kladná. Vezměte kupříkladu sešívání multivesmír, jehož nekonečně velký prostor obsahuje nekonečně mnoho vesmírů. Musíte ovšem být opatrní. Dokonce i při nekonečně mnoha vesmírech nemusí být seznam různých možných kosmologických konstant příliš dlouhý. Když například fundamentální zákony povolují jen několik hodnot kosmologické konstanty, potom se jich může

jen několik realizovat, a to neohledě na množství vesmírů. Takže otázka, kterou si klademe, zní: (a) zda existují nějaké myslitelné zákony fyziky, které předpovídají existenci multivesmíru, (b) zda takto vytvořený multivesmír obsahuje více než 10^{124} různých vesmírů a (c) zda zákony zaručují, že se hodnota kosmologické konstanty mění od vesmíru k vesmíru.

- 15 Tito čtyři autoři dokázali jako první chytrou volbou Calabiho-Yauových variet a toků skrz jejich díry zkonstruovat strunové modely s malou a kladnou kosmologickou konstantou, podobnou té pozorované. Společně s Renatou Kalloshovou, Juanem Maldacenou a Liamem McAllisterem sepsala tato skupina později i velmi vlivný článek o tom, jak sloučit inflační kosmologii se strunovou teorií.
- 16 Přesněji řečeno by tento hornatý terén zabíral přibližně 500rozměrný prostor, jehož nezávislé směry – osy – by odpovídaly různým tokům polí. Obrázek na straně 149 je přibližným znázorněním, ale lze z něho získat cit pro vztahy mezi různými tvary dodatečných rozměrů. Když fyzici navíc mluví o strunové krajině, obecně si představují, že hornatý terén kromě možných hodnot toků zahrnuje i všechny možné tvary a velikosti (různé topologie i geometrie) dodatečných rozměrů. Údolí ve strunové krajině jsou místa (různé tvary dodatečných rozměrů a toky, které obsahují), v nichž se vesmírná bublina přirozeně ustálí podobně jako míček na odpovídajícím místě opravdového horského terénu. Matematicky jsou údolí (lokální) minima potenciální energie spojená s dodatečnými rozměry. Na úrovni klasické fyziky platí, že jakmile bublina získá určitý tvar dodatečných rozměrů, který odpovídá danému údolí, pak se tento tvar nikdy nezmění. Na kvantověmechanické úrovni je ovšem možné kvantové tunelování, které umožňuje změnu tvaru dodatečných rozměrů.
- 17 Kvantové tunelování do vyšší nadmořské výšky je podle kvantových výpočtů možné, ale podstatně méně pravděpodobné.

Kapitola sedmá: Věda a multivesmír

- 1 To, jak dlouho pokračuje expanze bubliny před srážkou, ovlivňuje účinek následující kolize a jejích doprovodných poruch. Takové srážky také zajímavě ovlivňují čas; jejich vliv souvisí s naším starým příběhem o Čestmírovi a Oskarovi ze 3. kapitoly. Když se dvě bubliny srazí, jejich vnější okraje – kde je energie inflatonového pole vysoká – přijdou do kontaktu. Z perspektivy obyvatele jedné z těchto bublin odpovídá vysoká hodnota energie ranému okamžiku chvíli po velkém třesku v bublině. A proto dochází ke srážkám bublin na počátku času v každém vesmíru a proto také mohou kolizí vytvořené vlny ovlivnit i další proces spojený s raným vesmírem, konkrétně vznik reliktního záření.
- 2 Na kvantovou mechaniku se podíváme systematictěji v 8. kapitole. Uvidíme, že výrok o pohybu „mimo jeviště každodenní reality“ lze interpretovat na mnoha úrovních. Úroveň, kterou mám na mysli zde, je ta koncepčně nejjednodušší: rovnice kvantové mechaniky předpokládají, že pravděpodobnostní vlny neobývají obvyklé prostorové rozměry, které známe z běžného života. Místo toho se tyto vlny vyskytují v odlišném prostředí, které bere do úvahy nejen prostorové rozměry, ale i *počet* částic, které popisujeme. Toto prostředí se nazývá *konfigurační prostor*. Poznámka 4 k 8. kapitole je matematickou exkurzí do tohoto prostoru.
- 3 Kdyby zrychlující se rozpínání prostoru, které jsme pozorovali, nebylo trvalé, potom by se toto rozpínání jednoho krásného dne v budoucnosti začalo zpomalovat. Takové zpomalování by umožnilo světlu dorazit k nám i z objektů, které jsou dnes

mimo náš kosmický horizont; náš kosmický horizont by se tím rozšířil. Pak by bylo ještě podivnější tvrdit, že oblasti mimo náš kosmický horizont nejsou reálné, protože v budoucnosti bychom k nim získali přímý přístup. (Připomeňte si konec 2. kapitoly, kde jsem uvedl, že kosmické horizonty znázorněné na straně 33 by rostly s tím, jak by čas ubíhal. To platí pro vesmír, v němž se tempo rozpínání prostoru nezrychluje. Protože se ovšem rozpínání zrychluje, za jistou vzdálenost už vidět nemůžeme, ať na to čekáme jakkoli dlouho. Ve zrychlujícím se vesmíru nemohou kosmické horizonty narůst do větší velikosti, než je hodnota matematicky určená tempem zrychlování.)

- 4 Tady je konkrétní příklad vlastnosti, která by mohla být společná všem vesmírům v konkrétním multivesmíru. V 2. kapitole jsme uvedli, že nejnovější údaje přesvědčivě naznačují, že zakřivení prostoru je nulové. Z matematických až technických důvodů však výpočty ukazují, že všem vesmírným bublinám v inflačním multivesmíru je vlastní záporné zakřivení. Zhruba řečeno, prostorové tvary obsahující body s konstantní hodnotou inflatonu – tvary určené spojením stejných čísel na obrázku na straně 70 – se podobají spíše bramborovým lupínkům než ploché desce stolu. Přesto inflační multivesmír zůstává slučitelný s pozorováními; když se totiž libovolný tvar rozpíná, jeho zakřivení klesá; zakřivení kuličky na hraní je zřejmé, zatímco zakřivení zemského povrchu unikalo lidským zrakům celé tisíce let. Prošla-li naše vesmírná bublina dostatečným rozpínáním, její zakřivení by mohlo být záporné, ale tak neuvěřitelně malé, že by je dnešní měření nemohla rozlišit od nuly. V budoucnosti zjistíme, že je zakřivení prostoru velmi malé, ale *kladné*, bude to argument proti názoru, že jsme součástí inflačního multivesmíru, jak vysvětlil Ben Freivogel, Matthew Kleban, Maria Rodríguezová Martínezová a Leonard Susskind (viz „Observational Consequences of a Landscape“, *Journal of High Energy Physics* 0603, 039 [2006]). Měření kladného zakřivení o velikosti deset miliontin by výrazně nahlodalo myšlenku životaschopnosti přechodů postavených na tunelovém jevu, které podle představ fyziků vdechly do krajiny život.
- 5 Velká množina kosmologů a strunových teoretiků, kteří se této problematice věnovali, zahrnuje Alana Gutha, Andreje Lindeho, Alexandra Vilenkina, Jaumeho Garrigu, Dona Page, Sergeje Winitzkého, Richarda Easthera, Eugena Lima, Matthewa Martina, Michaela Douglase, Frederika Denefa, Raphaela Boussa, Bena Freivogela, I-Sheng Yanga, Deliu Schwartzovou-Perlovovou a mnohé další.
- 6 Důležité je, že zatímco dopad nenápadných změn několika konstant lze spolehlivě odvodit, dramatictější změny většího počtu konstant tento úkol výrazně ztěžují. Můžeme si alespoň představit, že se důsledky takových podstatných změn mnoha přírodních konstant navzájem kompenzují, případně že začnou tahat za jeden provaz novými způsoby, a mohly by tedy být slučitelné se životem, jaký známe.
- 7 Poněkud upřesňuji: je-li kosmologická konstanta záporná, ale dostatečně malinká, čas před kolapsem by mohl stačit na zrod galaxií. Tento detail budu vědomě ignorovat.
- 8 Dalším postřehem, který stojí za povšimnutí, je, že výpočty, které jsem popsal, byly provedeny, aniž by byl vybrán multivesmír konkrétního typu. Místo toho Weinberg a jeho spolupracovníci pracovali s multivesmírem, v němž se vlastnosti mohou měnit, a spočítali koncentraci galaxií v každém jednotlivém vesmíru. Čím více galaxií vesmír měl, tím větší váhu jeho vlastnostem Weinberg a kol. při výpočtu průměrných vlastností, které by naměřil tuctový pozorovatel, přikládali. Ale protože nepracovali s konkrétní teorií multivesmíru, jejich výpočty nutně pomi-

nuly pravděpodobnost, že vesmír s těmi nebo oněmi vlastnostmi bychom fakticky mohli v multivesmíru nalézt (tyto pravděpodobnosti jsme zmiňovali v předchozí podkapitole). Vesmíry s kosmologickými konstantami a prvotními fluktuacemi v jistých intervalech mohou dát formování galaxií zelenou, ale pokud se takové vesmíry v daném multivesmíru rodí jen vzácně, bylo by velmi nepravděpodobné, že bychom se v jednom z nich ocitli.

Kvůli zjednodušení výpočtů předpokládali Weinberg a kol., že jelikož byl interval hodnot kosmologické konstanty, o němž uvažovali, tak úzký (mezi 0 a asi 10^{-120}), pravděpodobnosti, že takové vesmíry by v daném multivesmíru existovaly, se s hodnotou kosmologické konstanty prakticky nemění, podobně jako se příliš neliší pravděpodobnosti, že potkáte psa vážícího 26,99997 nebo 26,99999 kilogramu. Předpokládali tedy, že každá hodnota kosmologické konstanty v intervalu slučitelném s formováním galaxií je a priori stejně pravděpodobná jako kterákoli jiná. Při našem skromném chápání vzniku multivesmíru to vypadá jako rozumný první pokus. Novější výzkumy však platnost tohoto předpokladu zpochybnily a zdůraznily, že úplný výpočet musí podobné aproximace překonat: musí pracovat s konkrétním modelem multivesmíru a určit konkrétní rozdělení vesmírů s různými vlastnostmi. Soběstačný antropický výpočet, který se opírá pouze o holé minimum předpokladů, je jediným způsobem, jak rozhodnout, zda tento přístup nakonec přinese žádané ovoce – že vysvětlí vesmír.

9 Samotný význam slova „typický“ nebo „tuctový“ je problematický, protože závisí na tom, jak je definován a měřen. Když budeme za kritérium považovat počet dětí a aut, dospějeme k jednomu druhu „typické“ české rodiny. Použijeme-li však jiná měřítko, například zájem o fyziku, lásku k opeře nebo posedlost politikou, dojdeme k jiné „typické“ rodině. A co platí pro typickou českou rodinu, bude nejspíše platit i pro „typické“ pozorovatele v multivesmíru: úvahy o detailnějších vlastnostech, než je jen velikost populace, by vyústily v odlišný pohled na to, co to znamená „typický“. Proto by také ovlivnily předpovědi o tom, jak je pravděpodobné, že zpozorujeme jednu nebo druhou vlastnost vesmíru. Aby byl antropický výpočet opravdu přesvědčivý, musel by na tento problém vrhnout nové světlo. Jinou naději jsem zmínil v textu: můžeme doufat v to, že rozdělení budou natolik koncentrovaná a zašpicatělá, že vesmíry příznivé pro život se od sebe takřka neliší.

10 Teorie množin je bohatý a dobře rozpracovaný matematický obor zabývající se množinami s nekonečně mnoha prvky. Matematicky vzdělanému čtenáři bude známý fakt, že výzkum započatý už v 19. století ukázal, že existují různé „velikosti“ nebo častěji „úrovně“ nekonečna. Jinými slovy, jedna nekonečná veličina může být větší než jiná. Úroveň nekonečna, které odpovídá počtu celých čísel, se nazývá podle prvního písmena hebrejské abecedy alef a nese index nula (\aleph_0). Georg Cantor ukázal, že toto nekonečno je menší než počet reálných čísel. Proč? Když se zkrátka snažíte spárovat celá čísla s reálnými čísly, nutně vám ta celá dojdou dříve. A když uvažujete o množině všech podmnožin množiny reálných čísel, dostanete nekonečno ještě vyšší úrovně.

Ve všech případech, o nichž jsme hovořili v hlavním textu, bylo \aleph_0 tím správným nekonečnem, poněvadž jsme pracovali s nekonečnými kolekcemi diskrétních čili „spočetných“ objektů – tedy s různými množinami celých čísel. V matematickém smyslu mají všechny tyto množiny stejnou velikost; úhrnný počet jejich prvků je popsán stejnou úrovní nekonečna. Ovšem – jak hned uvidíte – pro fyziku by závěr tohoto typu nebyl příliš užitečný. Ve fyzice jde spíš o nalezení takového fyzikálně zdůvodnitelného schématu, podle něhož lze porovnávat nekonečné množiny vesmírů, které by nabídlo jemnější hierarchii, z níž lze vyčíst relativní

zastoupení vesmírů s takovými nebo onakými vlastnostmi v multivesmíru. Většina snah o fyzikální vyřešení tohoto úkolu začíná srovnáním konečných podmnožin určitých vhodných nekonečných množin (protože v konečném případě se všechny záhadné otázky vypaří); teprve potom dovolí množinám, aby obsahovaly stále více prvků, až se nakonec stanou nekonečnými. Překážka tkví v nalezení fyzikálně odůvodněné metody, s níž lze vybrat vhodné konečné podmnožiny, a také v důka-
zu, že srovnání dávají smysl i tehdy, když podmnožiny začnou růst.

- 11 Inflační teorie se může pochlubit i dalšími úspěchy, například řešením *problému magnetických monopolů*. Když se badatelé pokoušeli spojit tři negravitační síly do jednotné teoretické struktury (známé jako *velké sjednocení*), zjistili, že z výsledné matematiky vyplývá, že hned po velkém třesku se mělo zrodit mnoho magnetických monopolů. Tyto částice by byly severním pólem tyčového magnetu, jemuž chybí obvyklý partnerský jižní pól (nebo naopak). Žádné takové částice nebyly zatím bohužel nalezeny. Inflační kosmologie vysvětluje neexistenci monopolů tím, že ohromující rozpínání zředilo jejich koncentraci ve vesmíru téměř na nulu.
- 12 Na otázku, jak těžký úkol to představuje, dnes existují různé odpovědi. Někteří považují problém míry za zašmodrchaný technický problém, který bude jednou vyřešen a poskytne inflační kosmologii důležitý dodatečný detail. Další (například Paul Steinhardt) věří, že vyřešení problému míry bude vyžadovat vystoupení zcela mimo matematické mantinely inflační kosmologie, a proto budeme muset výsledné teoretické schéma považovat za zcela novou kosmologickou teorii. Já zastávám názor, a se mnou jej sdílí malá, ale rostoucí množina badatelů, že problém míry ztělesňuje hlubokou koncepční záhadu v samotném srdci fyziky, k jejímuž vyjasnění asi bude třeba revoluční změny v samotných základech naší disciplíny.

Kapitola osmá: Mnoho světů kvantového měření

- 1 Jak původní Everettovu práci z roku 1956, tak i její zkrácenou verzi z roku 1957 naleznete ve sborníku *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (ed. Bryce S. DeWitt a Neill Graham, Princeton University Press, Princeton 1973).
- 2 Dne 27. ledna 1998 jsem spolu s Johnem Wheelerem probíral aspekty kvantové mechaniky a obecné relativity, o nichž jsem právě psal v *Elegantním vesmíru*. Než jsme se dostali k samotné vědě, Wheeler podotkl, že zvláště pro mladé teoretiky je velmi důležité nalézt správný jazyk, v němž by mohli své výsledky vyjádřit. Tehdy jsem to považoval za pouhou radu od mudrce, snad inspirovanou tím, že mluvil se mnou, „mladým teoretikem“, který se netajil svým zájmem popisovat matematické poznatky obyčejným jazykem. Když jsem ale v *The Many Worlds of Hugh Everett III* od Petera Byrnea (Oxford University Press, New York 2010) četl o historii vědy, leccos se mi vyjasnilo a byl jsem ohromen tím, že Wheeler zdůrazňoval stejný motiv při svých diskusích s Everettem před čtyřiceti lety, kdy bylo ve hře daleko více. Na první rukopis Everettovy práce Wheeler zareagoval slovy: „Everett by měl odstranit nedostatky ve vyjadřování, nikoliv ve formalismu,“ a varoval svého studenta před „obtížnostmi ve vyjádření matematického schématu maximálně odtážitého od běžných jevů v každodenním slovníku; před rozpory a nedorozuměními, které vzniknou, a před velmi, ale opravdu velmi těžkým břemenem zodpovědnosti za formulování všeho takovým způsobem, aby k těmto nedorozuměním nedošlo“. Byrne přesvědčivě líčí, že Wheeler nejspíše lavíroval mezi svým obdivem k Everettově práci a respektem ke kvantověmechanickému rámci vybudovanému Bohrem a dalšími proslulými fyziky. Na jedné straně nechtěl, aby byly Everettovy poznatky

zavrženy „starou partou“ proto, že jsou prezentovány příliš sebevědomě, nebo kvůli kontroverzním slůvkům (jako „rozdělující se“ vesmíry), které by mohly snižovat vážnost práce. Na druhé straně si Wheeler nepřál, aby hlavní proud v obci fyziků usoudil, že on sám zavrhl prokazatelně úspěšný kvantový formalismus a stal se generálem při neodůvodněném útoku na tradiční kvantovou teorii. Kompromis, do něhož Wheeler Everetta vmanipuloval, spočíval v tom, že ve své dizertaci ponechá matematiku, kterou rozvinul, ale zabalí ji do mírnějších a měkčích slov o jejím významu a užitečnosti. Zároveň silně na Everetta naléhal, aby navštívil Bohra a snažil se ho u tabule přesvědčit osobně. V roce 1959 Everett přesně tohle udělal, ale to, co mělo podle Everetta být dvoutýdenním odkrýváním karet, se zúžilo na několik neproduktivních konverzací. Žádné názory ani přístupy se nezměnily.

- 3 Musím upřesnit jednu věc. Schrödingerova rovnice ukazuje, že hodnoty kvantové vlny (nebo – v jazyce expertů – vlnové funkce) mohou být kladné, nebo záporné; obecněji tyto hodnoty mohou být komplexními čísly. Takové hodnoty nelze interpretovat přímo jako pravděpodobnosti. Co by záporná nebo komplexní pravděpodobnost znamenala? Místo toho jsou pravděpodobnosti spojeny s *druhou mocninou* absolutní hodnoty kvantové vlny na daném místě. Matematicky to znamená, že k určení pravděpodobnosti, že částice bude nalezena na daném místě, musíme spočítat *součin hodnoty vlny v tomto bodě a hodnoty komplexně sdružené*. Tímto upřesněním lze zároveň vyřešit další důležitý problém. Vyušení mezi překrývajícími se vlnami jsou klíčem pro vznik interferenčního obrazce. Kdyby však byly samotné vlny popsány jako pravděpodobnostní vlny, k takovému vyušení by dojít nemohlo, protože pravděpodobnosti nemohou být záporné. Jak jsme teď ale viděli, kvantové vlny nemusejí být kladné; proto jsou kompenzace mezi kladnými a zápornými a obecněji mezi komplexními čísly možné. Protože budeme potřebovat pouze kvalitativní vlastnosti takových vln, nebudu v zájmu zjednodušení v hlavním textu rozlišovat mezi kvantovou vlnou a s ní spojenou pravděpodobnostní vlnou (odvozenou z druhé mocniny kvantové vlny).
- 4 Matematicky založenému čtenáři mohu potvrdit, že kvantová vlna (*vlnová funkce*) pro jedinou dostatečně těžkou částici by odpovídala popisu, který jsem nastínil v textu. Velmi hmotná tělesa se však zpravidla skládají z mnoha částic, ne z částice jediné. V takové situaci je kvantověmechanický popis složitější. Konkrétně byste si mohli myslet, že každá částice bude mít kvantovou vlnu definovanou na stejné souřadnicové mřížce, již jsme užili pro jednu částici – s použitím stejných tří os. Tak tomu ale není. Do pravděpodobnostní vlny je třeba zadat jako vstup *všechny možné polohy každé částice* a výsledkem je pravděpodobnost, že částice se na těchto místech nacházejí. V důsledku toho pravděpodobnostní vlna žije v prostoru se třemi osami pro každou částici – to znamená, že celkový počet os je trojnásobkem počtu částic (nebo – pokud přijmete dodatečné rozměry teorie strun nebo M-teorie – až desetinásobkem). To znamená, že vlnová funkce složeného systému skládajícího se z n fundamentálních částic je komplexní funkce, jejímž definičním oborem není obyčejný třírozměrný prostor, ale prostor $3n$ -rozměrný; kdyby prostorové rozměry nebyly 3, ale m , potom bychom museli číslo 3 nahradit proměnnou m . Takovému prostoru se říká *konfigurační prostor*. To znamená, že v tomto obecném případě je vlnová funkce byla zobrazením $\psi: \mathbb{R}^{mn} \rightarrow \mathbb{C}$. Když říkáme, že taková vlnová funkce je koncentrovaná nebo špičatá, tím míníme, že toto zobrazení by mělo nosit v malé mn -rozměrné kouli v okolí určité oblasti. Zvláště nezapomeňte, že vlnové funkce obecně nejsou funkcemi prostorových rozměrů každodenního života. Pouze v idealizovaném případě vlnové funkce pro jedinou a zcela izolovanou částici souhlasí konfigurační prostor s dobře známým prostorovým prostředím. Také si

povšimněte, že když řeknu, že kvantové zákony ukazují, že ostře koncentrovaná vlnová funkce pro hmotné těleso se pohybuje po stejné dráze, jaká by plynula z Newtonových rovnic pro tento objekt samotný, můžete si představit, že mluvím o vlnové funkci popisující pohyb těžiště tohoto tělesa.

- 5 Takový popis vás mohl přivést k závěru, že existuje nekonečně mnoho poloh, v nichž by se elektron mohl ocitnout: abychom hladce vyplnili plynule se měnící kvantovou vlnu, potřebovali bychom nekonečný počet jehlu připomínajících tvarů, z nichž každý je spojen s jednou možnou polohou elektronu. Jak si tohle dát dohromady s 2. kapitolou, v níž jsem tvrdil, že částice lze uspořádat jen konečným počtem způsobů? Abych se vyhnul neustálým upozorněním, která by neměla téměř žádné důsledky pro hlavní myšlenku, kterou chci osvětlit v této kapitole, nezdůrazňoval jsem fakt, s nímž jsme se setkali v 2. kapitole, totiž že k stále přesnějšímu určení polohy elektronu byste potřebovali stále mocnější energii. Protože ve fyzikálně realistických situacích je možné spotřebovávat pouze konečnou energii, rozlišení nemůže být dokonalé. Pro špičaté kvantové vlny to znamená, že v každém kontextu s konečnou energií musejí mít hroty nenulovou tloušťku. Z toho plyne, že v každé ohraničené oblasti (například uvnitř kosmického horizontu) se nachází pouze konečné množství měřitelně odlišných poloh elektronu. A čím užší tyto hroty jsou (čím jemněji rozlišujeme polohu částice), tím širší jsou kvantové vlny popisující energii částice, což ilustruje princip neurčitosti, podle něhož lze získat přesnost jen „něco za něco“.
- 6 Filozoficky založený čtenář by možná rád věděl, že o takových dvoupatrových vědeckých vysvětleních, jaká jsem načrtl, už dlouhou dobu diskutují a debatují filozofové. Související myšlenky a úvahy naleznete v knihách Fredericka Suppea, *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism* (University of Illinois Press, Chicago 1989) a Jamese Ladymana, Dona Rosse, Davida Spurreta a Johna Colliera, *Every Thing Must Go* (Oxford University Press, Oxford 2007).
- 7 Fyzici často obětují preciznost svého vyjadřování, když říkají, že v interpretaci kvantové mechaniky v řeči mnoha světů existuje nekonečně mnoho vesmírů. Určitě existuje nekonečně mnoho možných tvarů pravděpodobnostních vln. Dokonce i na jednom konkrétním místě v prostoru můžete spojitě měnit velikost pravděpodobnostní vlny, a proto určitě existuje nekonečně mnoho hodnot, které může mít. Ale pravděpodobnostní vlny nejsou pozorovatelnou fyzikální vlastností systému, ke které bychom měli přímý přístup. Obsahují informaci o různých možných výsledcích v dané situaci a těch nekonečný počet být nemusí. V matematickém žargonu náleží kvantová vlna (vlnová funkce) do Hilbertova prostoru. Kdyby tento Hilbertův prostor byl konečněrozměrný, potom by mohlo dojít jen ke konečně mnoha výsledkům měření systému touto vlnovou funkcí popsaného (jinak řečeno, v takovém prostoru má každý hermitovský operátor jen konečně mnoho vlastních hodnot). Proto by po konečném počtu měření vzniklo jen konečně mnoho světů. Fyzici věří, že Hilbertův prostor spojený s fyzikálními jevy probíhajícími v konečném objemu prostoru, v němž je navíc shora omezena energie, je zákonitě konečněrozměrný (tomuto tvrzení se budeme do hloubky věnovat v 9. kapitole), což naznačuje, že počet „mnoha světů“ by byl také konečný.
- 8 Viz Peter Byrne, *The Many Worlds of Hugh Everett III* (Oxford University Press, New York 2010), str. 177.
- 9 V průběhu let došla nezávisle řada badatelů, včetně Neilla Grahama, Bryce DeWitta, Jamese Hartlea, Edwarda Farhiho, Jeffreyho Goldstonea, Sama Gutmanna, Davida Deutsche, Sidneyho Colemana, Davida Alberta a dalších, i má maličkost, k pozoruhodnému matematickému poznatku, který se zdá klíčový pro pochopení povahy

pravděpodobnosti v kvantové mechanice. Čtenáři, který se nebojí matematiky, se s tímto poznáním svěřím: Necht $|\psi\rangle$ je vlnová funkce pro kvantověmechanický systém, tedy vektor z Hilbertova prostoru H . Vlnová funkce pro n identických kopií je proto $|\psi\rangle^{\otimes n}$. Necht A je jakýkoli hermitovský operátor s vlastními hodnotami α_k a vlastními vektory $|\lambda_k\rangle$. Definujme $F_k(A)$ jako operátor relativní „frekvence“, který počítá, kolikrát se $|\lambda_k\rangle$ objeví v $H^{\otimes n}$. Matematicky lze odvodit, že $\lim_{n \rightarrow \infty} [F_k(A) |\psi\rangle^{\otimes n}] = |\langle \psi | \lambda_k \rangle|^2 |\psi\rangle^{\otimes n}$. To znamená, že když počet kopií systému neomezeně roste, vlnová funkce složeného systému konverguje k vlastní funkci operátoru frekvence s vlastní hodnotou $|\langle \psi | \lambda_k \rangle|^2$. To je pozoruhodný výsledek. To, že je stav vlastním vektorem operátoru frekvence, znamená, že v této limitě se relativní počet případů, v nichž veličina A bude naměřena s hodnotou α_k , rovná $|\langle \psi | \lambda_k \rangle|^2$ – což vypadá jako nejpřímochařejší odvození Bornova pravidla pro kvantověmechanickou pravděpodobnost. Z hlediska mnoha světů se zdá, že ty světy, v nichž podíl případů, ve kterých je naměřeno α_k , nesouhlasí s Bornovým pravidlem, mají nulovou normu v limitě libovolně vysokého n . V tomto smyslu jako by kvantověmechanická pravděpodobnost mohla být přímo interpretována v řeči mnoha světů. Všichni pozorovatelé v mnoha světech, až na množinu pozorovatelů, jejichž norma Hilbertova prostoru je libovolně malá v limitě n jdoucím do nekonečna, uvidí výsledky s takovými frekvencemi, které se shodují s těmi ze standardní kvantové mechaniky. Jakkoli slibně to vypadá, pochyby se objeví hned v další úvaze. V jakém smyslu lze říct, že pozorovatel s nízkou normou Hilbertova prostoru nebo s normou, která jde k nule s n jdoucím do nekonečna, je nepodstatný nebo že neexistuje? Chceme říct, že takoví pozorovatelé jsou abnormální nebo „nepravděpodobní“, ale jak můžeme propojit normu vektoru v Hilbertově prostoru s těmito přívlastky pro pozorovatele? Vyjasní to následující příklad. V dvourozměrném Hilbertově prostoru, řekněme se stavy „spin nahoru“ $|\uparrow\rangle$ a „spin dolů“ $|\downarrow\rangle$, uvažujme o stavu $|\psi\rangle = 0,99 |\uparrow\rangle + 0,14 |\downarrow\rangle$. Tento stav předpovídá pravděpodobnost pro měření spinu nahoru 0,98 a pro spin dolů 0,02. Vytvoříme-li n kopií takového systému, tedy $|\psi\rangle^{\otimes n}$, a pošleme-li n do nekonečna, velká většina členů v rozvoji tohoto vektoru bude mít přibližně stejný počet stavů se spinem nahoru a stavů se spinem dolů. Takže rozhodující většina pozorovatelů (kopií experimentátora) uvidí spin nahoru a spin dolů v poměru, který nesouhlasí s kvantověmechanickými předpověďmi. Pouze velmi nepatrný zlomek členů v rozvoji $|\psi\rangle^{\otimes n}$ bude obsahovat 98 % spinů nahoru a 2 % spinů dolů, což je třeba ke shodě s kvantovou mechanikou; výsledek výše nám říká, že toto jsou jediné stavy, jejichž norma v Hilbertově prostoru zůstane nenulová v limitě n jdoucím do nekonečna. V jistém smyslu se tedy velká většina členů v rozvoji $|\psi\rangle^{\otimes n}$ (tedy velká většina kopií experimentátora) musí považovat za „neexistující“. Potíž je v nalezení interpretace, co tohle – pokud vůbec něco – znamená.

I já jsem nezávisle našel matematický výsledek popsany výše, když jsem si připravoval přednášky o kvantové mechanice. Zažil jsem vzrušení, když pravděpodobnostní interpretace kvantové mechaniky zdánlivě vypadla přímo z matematického formalismu – myslím si, že fyzici uvedení na začátku této poznámky, kteří dospěli ke stejnému výsledku přede mnou, prožili něco podobného. Překvapuje mě, jak málo je tento výsledek znám mezi fyziky hlavního proudu. Kupříkladu neznám žádnou standardní učebnici kvantové fyziky, v níž by se o něm psalo. Já sám si myslím, že je třeba ho považovat za: (1) silné matematické odůvodnění Bornovy pravděpodobnostní interpretace vlnové funkce – kdyby Born tuto interpretaci „neuhodl“, matematika by ho k ní nakonec dovedla; (2) za ověření konzistence pravděpodobnostní interpretace – kdyby tento matematický výsledek *neplatil*, potom by vznikly pochyby o vnitřní smysluplnosti pravděpodobnostní interpretace vlnové funkce.

- 10 Frází „uvažování podobné tomu zaxtarskému“ jsem chtěl popsat myšlenkové schéma, v němž se pravděpodobnost vynořuje kvůli tomu, že žádný z obyvatel mnoha světů neví, který konkrétní svět obývá. Lev Vaidman navrhl, abychom ze zaxtarského scénáře vzali vážně více detailů. Tvrdí, že pravděpodobnost vstupuje do interpretace v řeči mnoha světů během krátkého období poté, co experimentátor dokončí měření, ale ještě předtím, než si přečte výsledek. Skeptici ovšem oponují, že v tu chvíli je už pozdě: posláním kvantové mechaniky a vědy obecně je předpovídat, co se *stane* v experimentu, a nikoli to, co se *stalo*. Navíc je zdá se ošidné požadovat, aby základy kvantové pravděpodobnosti spočívaly na zpoždění, kterému se zdánlivě lze vyhnout: když vědec získá okamžitý přístup k výsledku svého experimentu, kvantová pravděpodobnost může být ze situace vytěsněna. (Detailní výklad naleznete v textu Davida Alberta „Probability in the Everett Picture“ v *Many Worlds: Everett, Quantum Theory, and Reality* (ed. Simon Saunders, Jonathan Barrett, Adrian Kent a David Wallace, Oxford University Press, Oxford 2010) a v článku „Uncertainty and Probability for Branching Selves“ od Petera Lewise, [philsci-archive.pitt.edu/2636/.](http://philsci-archive.pitt.edu/2636/)) Poslední důležitý postřeh vztahující se k Vaidmanovu návrhu a také k tomuto typu pravděpodobnosti vyvěrající z neznalosti je tento: když hodím mincí, která není „cinknutá“, v obvyklém prostředí jediného vesmíru, pak důvodem, proč říkáme, že je 50% pravděpodobnost, že padne panna, je to, že ačkoli nakonec uvidím pouze jeden výsledek, dva výsledky by *bývaly mohly* nastat. Ale zkusme přimhouřit oči a představit si, že jsem právě měřil polohu skrývajících se elektronu. Víím, že displej na mém detektoru zobrazí buď nápis Strawberry Fields, nebo Grantova hrobka, ale nevím přesně, který z nich to bude. Potom mě chytne za límec: „Briane,“ zvýšíte hlas, „jaká je pravděpodobnost, že se na tvém displeji objeví Grantova hrobka?“ Abych odpověděl, vzpomenu si na házení mincí, ale než se rozhodnu uvažovat stejným způsobem, zaváhám. „Hmmm,“ přemýšlím. „Existují opravdu dva výsledky, které bych byl *já* mohl zaregistrovat? *Jediný* detail, kterým se odlišuji od ostatních Brianů, je nápis na mém displeji. Když si představím, že můj displej ukázal jiný nápis, potom si vlastně představuji, že *já* nejsem *já*. Představuji si, že jsem nějaký jiný Brian.“ Takže ačkoli nevím, co můj displej ukáže, tak *já – ten chlápek, který právě klábosí sám se sebou* – jsem nemohl zažít žádný jiný výsledek; to naznačuje, že moje neznalost sama o sobě nevede k pravděpodobnostnímu uvažování.
- 11 Vědci by měli být ve svých soudech objektivní. Sám však žádné výčitky necítím, když připouštím, že vzhledem k matematické ekonomičnosti a dalekosáhlým důsledkům pro realitu si přeji, aby interpretace v řeči mnoha světů byla správně. Zároveň s tím si zachovávám zdravý odstup, který je podpořen i obtížemi se začleňováním pravděpodobnosti do tohoto schématu, a tak jsem stále zcela otevřený i jiným možnostem, jak se s problémem poprat. Dvě z nich se hodí do této části knihy. Jedna usiluje o povýšení neúplné kodaňské interpretace na kompletní teorii; druhou lze považovat za interpretaci v řeči mnoha světů, ale bez mnoha světů. První strategie, zastávaná Giancarlem Ghirardim, Albertem Riminim a Tulliem Weberem, se snaží nalézt smysl v kodaňském výkladu tak, že pozmění Schrödingerovu matematiku, aby *umožnila* pravděpodobnostním vlnám kolabovat. To se snadněji řekne, než udělá. Modifikovaná matematika by neměla téměř vůbec ovlivnit pravděpodobnostní vlny pro takové malé věci, jako jsou individuální částice nebo atomy, protože nechceme ohrozit úspěšný teoretický popis těchto situací. Modifikace by se měly projevovat, až když jde o velký objekt, třeba o laboratorní přístroj; měly by způsobit kolaps jeho složitě pravděpodobnostní vlny. Ghirardi, Rimini a Weber rozpracovali matematiku, která takto odlišně zacházet s malými a velkými

objekty dokáže. Potom podle modifikovaných rovnic vede měření ke skutečnému kolapsu; vývoj systému po něm se chová podle obrázku na straně 190.

Druhý přístup byl původně navržen na sklonku dvacátých let princem Louismem de Broglieem a poté přesněji rozpracován Davidem Bohmem. Začíná matematickým předpokladem, který rezonuje s Everettovým uvažováním. Schrödingerova rovnice by měla za všech okolností určovat chování kvantových vln. Podle de Broglieovy-Bohmovy teorie se tedy pravděpodobnostní vlny vyvíjejí přesně tak jako v interpretaci v řeči mnoha světů. K tomu ale de Broglieova-Bohmova teorie přidá přesně tu myšlenku, kterou jsem dříve označil za zvrácenou: podle de Broglieova-Bohmova přístupu jsou všechny světy obsažené v pravděpodobnostní vlně (kromě jednoho) pouhými *možnými světy*; pouze jeden svět se může chlubit tím, že je opravdový.

Aby toho bylo dosaženo, upouští tento přístup od tradičního kvantového sloganu „vlna, *nebo* částice“ (elektron je vlna do doby, než je měřen; pak se opět stane částicí) a místo toho si osvojuje popis, v němž existuje „vlna *i* částice“. V rozporu se standardním pohledem jsou v de Broglieově a Bohmově pojetí částice malinkými lokalizovanými entitami, které se pohybují po konkrétních trajektoriích; z nich tedy vzniká obyčejná, jednoznačná realita – přesně jako v klasické fyzice. Jediný „reálný“ svět je ten, v němž si částice vybraly své správné, jednoznačné polohy. Kvantové vlny poté hrají velmi odlišnou úlohu. Místo aby vyjadřovaly mnohočetnost reálných světů, *usměrňují pohyb částic*. Kvantová vlna tlačí částici k oblastem s vlnou velkou, čímž zvyšuje pravděpodobnost, že částici na těchto místech naleznete, a vytahuje ji ven z oblastí, kde je vlna malá, a proto v těchto místech bude nalezena s malou pravděpodobností. Aby toto tlačení popsali, de Broglie a Bohm potřebovali dodatečnou rovnici, která popisuje účinek kvantové vlny na částici, a tak podle jejich receptu není Schrödingerova rovnice překonána, ale musí se podělit o místo pod Sluncem s dalším matematickým „hráčem“. (Matematicky orientovaný čtenář nalezne rovnice níže.) Už řadu let se mezi fyziky šušká, že de Broglieova-Bohmova teorie nestojí ani za zamyšlení, protože je zatížena neužitečným balastem – nejen druhou rovnicí, ale kvůli jejímu začlenění částic i vln také dvakrát delším seznamem základních ingrediencí. Nedávno ovšem začal sílit názor, že tuto kritiku je třeba vnímat ve správném kontextu. Jak popis Ghirardiho, Riminiho a Webera názorně ukazuje, dokonce i smysluplná verze kodaňské interpretace vyžaduje druhou rovnici. Kromě toho včlenění částic i vln má jednu nesmírnou výhodu: křísí myšlenku, že se objekty pohybují odsud tam po konkrétních trajektoriích, a navrácí fyzice tuto základní a dobře známou vlastnost reálnosti, kterou vědci pod tlakem kodaňských hochů možná příliš ukvapeně zavrhli. Poněkud odborněji zní námitka, že tento přístup je *nelokální* (kvůli nové rovnici mohou události na jednom místě okamžitě ovlivnit události na místech vzdálených) a že tuto vlastnost patrně nelze skloubit se speciální relativitou. Síla této námitky zeslábne, uvědomíme-li si, že i kodaňský přístup v sobě skrývá známky nelokálního chování; to navíc potvrdily i experimenty. Zmínka o teorii relativity je ovšem důležitá a tento problém na úplné vyřešení stále čeká. Odpor ke de Broglieově-Bohmově teorii částečně pramení z toho, že její matematický formalismus nebyl vždycky prezentován nejpřímochařejším způsobem. Matematicky zdatnému čtenáři zde nabízím nejpřímější odvození této teorie.

Začněte se Schrödingerovou rovnicí pro vlnovou funkci částice: $H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$, kde je hustota pravděpodobnosti, že se částice nachází v bodě x , dána standardním:

$\rho(x) = |\psi(x)|^2$. Dále si představte, že částici přiřadíte konkrétní trajektorii, takovou, že v bodě x má částice rychlost $v(x)$. Jakou fyzikální podmínku by taková rychlost měla splňovat? Určitě by měla zajišťovat zachování pravděpodobnosti: pohybuje-li se čas-

tice rychlostí $v(x)$ z jedné oblasti do jiné, potom by se hustota pravděpodobnosti měla odpovídajícím způsobem upravit: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0$. Je teď jen otázkou práce $v(x)$ spočítat. Výsledek je $v(x, t) = \frac{-1}{\rho(x, t)} \int \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\hbar}{m} \operatorname{Im} \left(\frac{\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial x}}{\psi^* \psi} \right)$, kde m je hmotnost částice.

Spolu se Schrödingerovou rovnicí definuje tato rovnice de Broglieovu-Bohmovu teorii. Všimněte si, že poslední uvedená rovnice je nelineární, ale to nijak nesouvisí se Schrödingerovou rovnicí, která si dokonalou linearitu zachovává. Správná interpretace pak říká, že přidáním nové rovnice nelineárně závislé na vlnové funkci tento přístup zaplňuje mezery, které zanechala kodaňská škola. Veškerá síla a krása hlavní vlnové rovnice, té Schrödingerovy, zůstala zcela zachována.

Ještě bych rád dodal, že teorii lze snadno zobecnit pro případ mnoha částic: na pravou stranu rovnice dosadíme vlnovou funkci mnohočásticového systému, tedy $\psi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$, a při výpočtu rychlosti k -té částice musíme počítat derivaci podle k -té souřadnice (pro přehlednost pracujeme v jednorozměrném prostoru; ve vyšším počtu rozměrů vhodným způsobem přidáme souřadnice). Tato zobecněná rovnice vykazuje očividnou nelokalitu; rychlost k -té částice je okamžitě ovlivněna polohami všech ostatních částic (na jejichž souřadnicích zároveň závisí vlnová funkce).

- 12 V principu lze navrhnout experiment schopný rozlišit kodaňskou a Everettovu interpretaci: Elektron má – stejně jako všechny elementární částice – vlastnost známou jako *spin*. Trochu jako káča se může točit kolem své osy, ale s jedním důležitým rozdílem. Rychlost tohoto otáčení je – nehledě na směr osy – vždycky stejná. Je to veličina elektronu vlastní, podobně jako jeho hmotnost nebo elektrický náboj. Jedinou neznámou je, zda se kolem dané osy elektron otáčí po směru, nebo proti směru hodinových ručiček. Otáčí-li se proti směru, říkáme, že spin elektronu směřuje *nahoru*; otáčí-li se po směru, spin vůči dané ose míří *dolů*. Kvůli kvantověmechanické neurčitosti platí, že je-li spin elektronu vůči jedné ose jednoznačný – řekněme na 100 % je nahoru vůči ose z –, potom jeho spin vůči kolmým osám x a y je neurčitý: je 50% pravděpodobnost, že je vůči ose x nahoru, a stejná, že je dolů; totéž platí pro osu y .

Představte si dále, že začnete s elektronem, jehož spin vůči ose z je 100% nahoru, a že změříte jeho spin vůči ose x . Podle kodaňské interpretace platí, že když naleznete spin dolů, pravděpodobnostní vlna pro spin elektronu zkolabovala: možnost, že je spin nahoru, byla odstraněna z reality, a proto zbyl pouze hrot vlnové funkce označující spin směrem dolů. Podle Everettova přístupu se naopak skuteční oba scénáře, nahoru i dolů, takže možnost, že je spin nahoru, přežije bez poskvrny.

Abychom oba přístupy rozsoudili, musíme si představit, že po změření spinu elektronu vůči ose x zcela zvrátíme vývoj systému do *zpátečního chodu*. (Fundamentální rovnice fyziky, včetně té Schrödingerovy, jsou invariantní vůči převrácení šipky času, což konkrétně znamená, že alespoň v principu lze libovolný vývoj „odčinit“. Ve *Struktuře vesmíru* se tomuto bodu věnuji do hloubky.) Takové „vrácení času“ by se muselo uplatnit na všechno: na elektron, na zařízení i na veškeré součásti experimentu. Je-li interpretace v řeči mnoha světů správně, další měření spinu elektronu vůči ose z by mělo vést se 100% pravděpodobností k hodnotě, s níž jsme začali: spin je nahoru. Ovšem je-li správný kodaňský výklad (čímž míním nějakou jeho matematicky koherentní verzi, například tu od Ghirardiho, Riminiho a Webera), potom dospějeme k jiné odpovědi. Podle kodaňské interpretace totiž byla po měření spinu vůči ose x , v němž byla nalezena hodnota dolů, možnost nahoru vymizována. Zmizela z kroniky reality. A proto se vrácením času nedostaneme zpět

do počátečního bodu: jistou část pravděpodobnostní vlny jsme už totiž natrvalo ztratili. Další měření spinu vůči ose z tedy nepovede ke 100% jistému výsledku, že dostaneme stejný spin jako na začátku. Místo toho zjistíme, že máme 50% naději, že dostaneme tento výsledek, a 50% naději, že zjistíme výsledek opačný. Kdybyste tento experiment provedli opakovaně a kdyby byla kodaňská interpretace správná, tak asi v polovině případů byste našli opačný výsledek spinu elektronu vůči ose z než na počátku. Obtížná část experimentu tkví samozřejmě ve „vrácení času“. V podstatě je to však experiment, který by mohl rozhodnout, která z teorií je správně.

Kapitola devátá: Černé díry a hologramy

- 1 Aby matematicky dokázal, že Schwarzschildova extrémní uspořádání hmoty – dnes jim říkáme černé díry – nemohou existovat, provedl Einstein výpočty za pomoci obecné teorie relativity. Matematika použitá v těchto výpočtech byla správně. Ale Einstein učinil dodatečné předpoklady, které byly příliš omezující vzhledem ke skutečně intenzivnímu zakřivení času a prostoru, které černá díra způsobuje; v podstatě zakázal, aby se hmota zhroutila. Tyto předpoklady znamenaly, že Einsteinovy matematické postupy nestačily k tomu, aby si uvědomil možnost existence černých děr. Einsteinův nedostatečně přesný rozbor jednoduše k rozhodnutí o existenci černých děr nestačil. Moderní analýzy ovšem jasně ukazují, že obecná relativita řešení pro černé díry umožňuje.
- 2 Jakmile systém dosáhne uspořádání o maximální entropii (například když pára má konstantní teplotu a je v nádobě homogenně rozptýlená), potom ztratí schopnost dále svou entropii zvyšovat. Přesnější výrok tedy zní, že entropie má tendenci narůstat, dokud nedosáhne maximální možné hodnoty entropie daného systému.
- 3 Když v roce 1972 vyjasnili James Bardeen, Brandon Carter a Stephen Hawking matematické zákony, jimiž se řídí evoluce černých děr, zjistili, že tyto rovnice jsou zcela analogické zákonům termodynamickým. Abychom našli odpovídající výroky v těchto dvou situacích, stačí za pojem „entropie“ dosadit „plochu horizontu černé díry“ (a naopak) a stejně tak zaměnit „gravitační zrychlení na povrchu černé díry“ za „teplotu“. Jestliže tedy Bekensteinova myšlenka platila – pokud nešlo jen o podobnost náhodnou, ale o poznatek, že černé díry mají entropii –, musely mít tedy černé díry i nenulovou teplotu.
- 4 Příčina této zdánlivé změny energie není vůbec očividná; závisí na těsném vztahu mezi energií a časem. Můžete považovat energii částice za frekvenci vibrace příslušného kvantového pole. Jestliže si uvědomíte, že samotný význam slova „frekvence“ závisí na pojmu „čas“, vztah mezi energií a časem se stane zřejmým. A dále: černé díry mají velký vliv na tok času. Z hlediska vzdáleného pozorovatele se čas zpomaluje pro objekty, které se blíží k horizontu černé díry, a zcela se zastaví na horizontu samotném. Když padající astronaut horizont překročí, čas a prostor si vymění úlohy – uvnitř černé díry se radiální směr stane časem. Z toho vyplývá, že uvnitř černé díry splývá pojem kladné energie s radiálním pohybem ve směru do singularity černé díry. Když člen páru částic, který má zápornou energii, překročí horizont, skutečně padá do středu černé díry. A proto se záporná energie z hlediska vzdáleného pozorovatele jeví jako kladná energie z pohledu pozorovatele uvnitř černé díry. Díky tomuto faktu je vnitřek černé díry místem, kde takové částice mohou existovat.
- 5 Když se černá díra smršťuje, smršťuje se i povrch jejího horizontu událostí, což je v rozporu s Hawkingovým výrokem, že úhrnný povrch černých děr nemůže klesat. Nezapomeňte ale, že Hawkingův teorém o povřích je založen na klasické obecné

- relativitě. Teď ale započítáváme i kvantové procesy (a entropii záření samotného) a docházíme k rafinovanějšímu výsledku.
- 6 Máme-li být o něco přesnější, musíme uvést, že je to minimální počet otázek ano/ne, jejichž odpovědi jednoznačně specifikují mikroskopické podrobnosti o systému.
 - 7 Hawking zjistil, že entropie je povrch horizontu událostí v Planckových jednotkách vydělený čtyřmi.
 - 8 Přes veškeré poznatky představené v této kapitole zůstává otázka mikroskopického složení černé díry částečně nevyřešená. Jak jsem uvedl ve 4. kapitole, Andrew Strominger a Cumrun Vafa v roce 1996 objevili, že když spojitě snížíme (matematicky) intenzitu gravitační síly, potom se jisté černé díry přemění na konkrétní objekty složené ze strun a brán. Posčítali možná přeuspořádání těchto ingrediencí a našli historicky nejneoddiskutovatelnější odvození Hawkingova slavného vzorce pro entropii černé díry. Přesto nebyli schopni popsat tyto ingredience při vyšší intenzitě gravitační síly, tedy když fakticky dojde ke zrodu černé díry. Další autoři, například Samir Mathur a jeho různí spolupracovníci, usoudili, že černé díry jsou „kulaté chomáče chmýří“, anglicky „fuzz balls“, v jejichž vnitřku jsou nahromaděné a rozsypané vibrující struny. Jejich domněnky zatím nejsou zcela prokázány. Výsledky, o nichž si povídáme v této kapitole (v podkapitole „Strunová teorie a holografie“), nám poskytují hluboký vhled do této problematiky.
 - 9 Gravitaci můžeme přesněji řečeno kompenzovat v určité oblasti prostoru tak, že se začneme pohybovat volným pádem. Velikost oblasti, v níž k takové kompenzaci dojde, závisí na charakteristické vzdálenosti, na níž se gravitační pole výrazně mění. Kdyby se gravitační pole měnilo pouze na velkých čili dlouhých měřítkách (tedy kdyby bylo téměř nebo úplně homogenní), potom by volný pád vykompenzoval gravitační pole ve velké oblasti prostoru. Jestliže se však gravitační pole mění na malých čili krátkých měřítkách – spojených řekněme s vaším tělem –, potom byste mohli vykompenzovat jen gravitaci působící na vaše chodidla, ale stále byste cítili gravitaci působící na hlavu. To začne být obzvláště důležité, když se přibližujete k singularitě černé díry, kde je gravitační pole stále silnější; jeho síla dramaticky závisí na vaší klesající vzdálenosti od singularity; nakonec vaše tělo roztrhá na kousky, protože na vaše chodidla bude působit mnohem větší síla než na vaši hlavu, předpokládáme-li, že jste do díry skočili nohama napřed.
 - 10 Zde přibližujeme objev Williama Unruha z roku 1976; dal tehdy do souvislosti pohyb pozorovatele a částice, s nimiž se pozorovatel setká. Zjistil, že když v jinak prázdném prostoru zrychlujete, budete pozorovat termální lázeň částic, jejíž teplota je určena vaším zrychlením. Obecná teorie relativity nás vede k tomu, abychom to, zda sami zrychlujeme, nebo nikoli, zjišťovali srovnáním s pozorovateli ve stavu volného pádu (viz *Struktura vesmíru*, 3. kapitola). Vzdálený pozorovatel, který nepadá volným pádem, proto záření vycházející z černé díry zaznamená, kdežto volně padající pozorovatel nikoli.
 - 11 Černá díra se vytvoří, přesáhne-li hmotnost M uvnitř kulové plochy o poloměru R hodnotu $c^2R/2G$, kde c je rychlost světla a G je Newtonova konstanta.
 - 12 Když hmota pod vlastní tíhou zkolabuje do černé díry, bude se horizont událostí ve skutečnosti nacházet uvnitř hranice oblasti, o které jsme mluvili. To znamená, že jsme zatím nemaximalizovali entropii, kterou tato oblast samotná může obsahovat. Tento nedostatek není těžké napravit. Vhodte do černé díry dodatečný materiál, jímž horizont událostí nafouknete až k původní hranici oblasti. Protože entropie by i v průběhu tohoto poněkud spletitějšího procesu stále rostla, entropie materiálu, z něhož jsme černou díru postavili, by byla menší než entropie černé

díry, která tuto oblast zaplňuje, tj. povrch jejího horizontu událostí v Planckových jednotkách.

- 13 Gerard 't Hooft, „Dimensional Reduction in Quantum Gravity“, ve sbírce *Salam Festschrift*, ed. Ahmed Ali, John Ellis a Seifallah Randjbar-Daemi (World Scientific, River Edge, New Jersey 1993), str. 284–296 (QCD161:C512:1993).
- 14 Říkal jsem, že „unavené“ nebo „vyčerpané“ světlo je takové světlo, jehož vlnová délka je natažená (posunutá k červenému konci spektra) a vibrační frekvence je snižena, protože světlo muselo na to, aby se vyšplhalo z černé díry (nebo z jakéhokoli jiného gravitačního pole), spotřebovat energii. Stejně jako známější cyklické procesy (obíhání Země kolem Slunce či otáčení Země kolem své osy atd.) lze vibrační světla použít k definici času, který uběhl. Vibrace světla emitovaného vzbuzenými atomy cesia 133 dnes fakticky vědci využívají k *definici* jedné sekundy. Pomalejší vibrační frekvence unaveného světla tedy znamená, že plynutí času nedaleko černé díry je – z hlediska vzdáleného pozorovatele – také zpomalené.
- 15 Nejdůležitější objevy ve vědě obvykle stojí na množině předcházejících výsledků, které je umožnily. To platí i v tomto případě. Vedle 't Hoofta, Susskinda a Maldaceny se na prosekávání cesty k vrcholnému výsledku i na odvozování jeho důsledků podílela řada dalších badatelů. Jsou mezi nimi Steve Gubser, Joe Polchinski, Alexandr Poljakov, Ashoke Sen, Andy Strominger, Cumrun Vafa, Edward Witten a mnozí další.
- Čtenář-matematik by si možná rád přečetl přesnější výklad Maldacenova výsledku. Nechtě N je počet třibrán ve „stohu“ brán a g je hodnota vazbové konstanty v teorii strun typu IIB. Je-li gN malé číslo, mnohem menší než jedna, hrají ve fyzikálních jevech rozhodující úlohu struny o nízké energii, které se pohybují ve „stohu“ brán. Takové struny lze dobře popsat s pomocí konkrétní čtyřrozměrné supersymetrické konformně invariantní kvantové teorie pole. Je-li však gN velké číslo, tato teorie se stane silně vázanou, a proto se její matematický rozbor stane matematicky obtížným. Za těchto podmínek ovšem můžeme díky Maldacenovu objevu použít popisu pomocí strun, které se pohybují v geometrii blízké horizontu „stohu“ brán, která má tvar $AdS_5 \times S^5$ (anti de Sitterův 5-prostor krát 5-sféra). Poloměr těchto prostorů je určen číslem gN (konkrétněji je poloměr úměrný $(gN)^{1/4}$), a proto je při velké hodnotě gN zakřivení $AdS_5 \times S^5$ nízké, což zaručuje, že strunové výpočty jsou zvládnutelné (a lze je mimochodem dobře aproximovat výpočty v konkrétní odnoži Einsteinovy gravitace). S tím, jak se hodnota gN mění od nízkých hodnot k vysokým, přeměňují se fyzikální jevy z těch, které lze popsat čtyřrozměrnou supersymetrickou konformně invariantní kvantovou teorií pole, na jevy popsané desetirozměrnou teorií strun na $AdS_5 \times S^5$. To je takzvaná AdS/CFT (anti de Sitterův prostor či „space“ / konformní teorie pole či „conformal field theory“) korespondence.
- 16 Ačkoli rigorózní verze Maldacenova argumentu zatím nebyla dokázána, souvislost mezi popisy ve vnitřku a na hranici se v posledních letech stala dobře pochopeným problémem. Například byla identifikována třída výpočtů, jejichž výsledky jsou přesné pro libovolnou hodnotu vazbové konstanty. Tyto výsledky lze explicitně extrapolovat z malé hodnoty do velké a zpět. Takto lze nahlédnout do procesu „transmutace“, jímž se popis fyzikálních jevů z perspektivy bulku přeměňuje na popis z hlediska hranice a naopak. Takové výpočty například ukázaly, že se řetězce interagujících částic na hranici prostoru mohou transformovat ve struny uvnitř prostoru – což byla zvláště přesvědčivá interpolace mezi oběma popisy.
- 17 Toto je přesněji řečeno variace Maldacenova řešení, v níž kvantová teorie pole na hranici dobře aproximuje kvantovou chromodynamiku, což není úplně přesně stejná teorie jako ta, která úlohu hraniční teorie sehrála v Maldacenově průkopnickém

článku. Konkrétně Witten ukázal, že tepelná lázeň o vysoké teplotě umístěná v teorii na hranici se projevuje jako černá díra v popisu uvnitř prostoru. Slovník mezi oběma popisy tedy dokáže převést výpočty viskozity kvarko-gluonového plazmatu na hranici na reakci horizontu událostí černé díry na konkrétní deformaci – jde sice o technický, ale proveditelný výpočet.

- 18 Další přístup, s nímž lze získat kompletní definici strunové teorie, se zrodil z dřívější práce nazývané maticová teorie (další možný význam písmena „M“ v M-teorii), kterou původně rozvinul Tom Banks, Willy Fischler, Steve Shenker a Leonard Susskind.

Kapitola desátá: Vesmíry, počítače a matematická realita

- 1 Číslo, které jsem uvedl, 10^{52} kilogramů, odpovídá hmotnosti dnešního pozorovatelného vesmíru; v dřívějších dobách byla teplota jeho složek vyšší, takže nesly vyšší energii. Údaj 10^{62} kilogramů je přesnějším odhadem energie, kterou musíte stlačit do malinkého flíčku, abyste zrekonstruovali evoluci našeho vesmíru od doby, kdy byl asi sekundu starý.
- 2 Mohli byste si myslet, že kvůli tomu, že jste co do rychlosti omezení rychlostí světla, musí být i vaše kinetická energie omezená. V případě, že se však vaše rychlost blíží rychlosti světla, roste vaše energie podle speciální teorie relativity neomezeně. Matematicky je rovnice pro energii $E = mc^2 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, kde c je rychlost světla a v vaše rychlost. Vidíte, že když se v blíží k c , tak E roste nade všechny meze. Všimněte si i toho, že situaci popisujeme z pohledu někoho, kdo sleduje váš pád, řekněme pozorovatele stojícího na povrchu Země. Z vaší vlastní perspektivy jste navzdory volnému pádu v klidu a narůstající rychlost má okolní hmota.
- 3 Při dnešní omezené úrovni znalostí mají tyto odhady značnou míru flexibility. Údaj „10 gramů“ vychází z následujícího scénáře: energetická škála, na níž se odehrává inflace, je pravděpodobně blízko 10^{-5} krát Planckova energie, která je sama rovna asi 10^{19} krát energie ekvivalentní hmotnosti protonu. (Kdyby inflace probíhala na ještě vyšší energetické škále, vyvolalo by to tak silné gravitační vlny, že by už musely být nalezeny, ale to se zatím nestalo.) V jednotkách z každodenního života je Planckova hmotnost asi 10^{-8} kilogramu (tedy nepatrná z pohledu obvyčejného člověka, ale nesmírně vysoká z pohledu částicové fyziky, protože podobné hmotnosti a energie by měly mít jednotlivé částice). Hustota energie inflatonového pole by proto byla asi 10^{-8} kilogramu na každý objem krychličky o hraně asi 10^5 krát Planckova délka (vzpomeňte si, že kvůli kvantové neurčitosti jsou energetická a délková měřítka vzájemně převrácená), což je asi 10^{-30} metru. Celková hmotnost-energie v takovém balíčku inflatonového pole o velikosti 10^{-30} metru je tedy: 10^{-8} kilogramu / $(10^{-30}$ metru)³ · $(10^{-28}$ metru)³, tedy asi 10 gramů. Čtenáři *Struktury vesmíru* si možná vzpomenou, že jsem tehdy uvedl trochu odlišnou hodnotu. Měl jsem tehdy na mysli totiž o něco vyšší energetickou škálu inflatonu.
- 4 Hans Moravec: *Robot, Mere Machine to Transcendent Mind* (Oxford University Press, New York 2000); viz též Ray Kurzweil: *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology* (Penguin, New York 2006).
- 5 Viz například Robin Hanson: „How to Live in a Simulation“, *Journal of Evolution and Technology* 7, č. 1 (2001).
- 6 Churchova-Turingova teze tvrdí, že každý počítač takzvaného univerzálního Turingova typu může simulovat akce jiného, a tak je zcela rozumné, aby počítač, který

je uvnitř simulace – a proto je sám simulován mateřským počítačem, na němž celý simulovaný svět běží –, prováděl úkoly ekvivalentní těm, které provádí i mateřský počítač.

- 7 Filozof David Lewis rozvinul podobnou myšlenku pod názvem modální realismus: viz *On the Plurality of Worlds* (Wiley-Blackwell, Malden, Massachusetts, 2001). Lewiso-va motivace k zavedení všech možných světů se ovšem liší od Nozickovy. Lewis chtěl nalézt kontext, v němž se zmaterializují kontrafaktické výroky (výroky typu „Kdyby Hitler vyhrál válku, dnešní svět by byl velmi odlišný“).
- 8 John Barrow podobně argumentoval v *Pi in the Sky* (Little, Brown, Boston 1992); česky *Pí na nebesích* (Mladá fronta, Praha 2000).
- 9 Jak jsem vysvětlil v poznámce 10 k 7. kapitole, velikost tohoto nekonečna převyšuje velikost množiny celých čísel 1, 2, 3, ... atd.
- 10 To je parafráze slavného paradoxu holiče ze Seville, který holí jen ty, kdo se sami neholí. Otázka pak stojí: Kdo holí holiče? O holičovi se obvykle předpokládá, že to je muž, abychom se vyhnuli snadné odpovědi – totiž že holičem je žena a ta se holit nemusí.
- 11 Schmidhuber poznamenává, že efektivní strategií by bylo nechat počítač vyvíjet každý simulovaný vesmír vpřed v čase „koordinovaným“ způsobem: první vesmír by byl aktualizován při každém druhém taktu počítače, druhý vesmír zase při každém druhém z těch zbylých, třetí vesmír by byl aktualizován při každém druhém taktu z těch, které nebyly věnovány předchozím dvěma vesmírům, a tak dále. Nakonec by se každý vyčíslitelný vesmír vyvinul o libovolně velký počet časových kroků.
- 12 Podrobnější výklad vyčíslitelných a nevyčíslitelných funkcí by měl zahrnout i *limitně vyčíslitelné funkce*. Tedy funkce, pro které existuje konečný algoritmus, s jehož pomocí je lze spočítat s libovolně vysokou přesností. To například platí pro číslo π : počítač dokáže nalézt každé následující číslo π , byť nikdy na konec výpočtu nedojde. Ačkoli je tedy π z formálního hlediska nevyčíslitelné, je limitně vyčíslitelné. Většina reálných čísel ovšem není jako π . Nejenže nejsou nevyčíslitelné, nejsou ani limitně vyčíslitelné

Když uvažujeme o „úspěšných“ simulacích, měli bychom zahrnout i ty založené na limitně vyčíslitelných funkcích. V principu by se dala přesvědčivá realita vytvořit částečným výstupem počítače, který vyhodnocuje limitně vyčíslitelné funkce.

Ve fyzikálních zákonech, které by měly být vyčíslitelné nebo i limitně vyčíslitelné, by tradiční závislost na reálných číslech musela být zavržena. To by platilo nejen pro prostor a čas, které většinou popisujeme souřadnicemi s hodnotami, jimiž mohou být všechna reálná čísla, ale i pro všechny ostatní matematické ingredience v zákonech zahrnuté. Síla elektromagnetického pole by například nenabývala libovolné reálné hodnoty, ale pouze jedné z hodnot v určité diskrétní (konečné nebo spočítatelné) množině. Totéž by mohlo platit dokonce i pro pravděpodobnost, že se elektron nachází v určité oblasti. Schmidhuber zdůrazňoval, že všechny výpočty, které fyzici kdy provedli, závisely na manipulacích s diskrétními symboly (napsanými na papíru, na tabuli nebo na monitoru počítače). Takže ačkoli se o tomto vědeckém výzkumu vždycky říkalo, že pracuje s reálnými čísly, v praxi tomu tak nebylo. Podobně je tomu se všemi veličinami, které jsme kdy změřili. Žádný přístroj nemá nekonečnou přesnost, a proto z našich měření vždycky vycházejí diskrétní numerické výsledky. V tomto smyslu jsou všechny úspěchy fyziky triumfy digitálního paradigmatu. A třeba jsou i přírodní zákony samotné vyčíslitelné (alespoň limitně).

Na možnost, že je fyzika „digitální“, existuje řada dalších pohledů. Najdete je v díle Stephena Wolframa *A New Kind of Science* (Wolfram Media, Champaign, Illinois 2002) a v knize Setha Lloyda *Programming the Universe* (Alfred A. Knopf, New York

2006). Matematik Roger Penrose věří, že lidská mysl je založena na nevyčíslitelných procesech, a proto vesmír, který obýváme, musí záviset na nevyčíslitelných matematických funkcích. Podle tohoto názoru náš vesmír do digitálního paradigmatu nezapadá – viz například *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, New York 1989) a *Shadows of the Mind* (Oxford University Press, New York 1994).

Kapitola jedenáctá: Hranice bádání

- 1 Steven Weinberg: *The First Three Minutes* (Basic Books, New York 1993); česky *První tři minuty* (Mladá fronta, Praha 2000), str. 131 v originále.

Literatura a náměty k dalšímu čtení

Úvahy o paralelních vesmírech vycházejí z různorodé směsi vědeckých poznatků. Existuje rozrůstající se literatura zaměřená na jednotlivé aspekty této látky; bývá většinou určena široké veřejnosti, ale někdy očekává jisté znalosti. Seznam uvedených knih doplňuje literaturu zmíněnou v poznámkách; byť jde o pouhou podmnožinu celé řady mnoha báječných knih, které byly napsány, přesto umožní čtenáři pokračovat ve studiu otázek rozebíraných ve *Skryté realitě*.

Albert, David: *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1994.

Alexander, H. G.: *The Leibniz-Clarke Correspondence*, Manchester University Press, Manchester 1956.

Barrow, John: *Pi in the Sky*, Little, Brown, Boston 1992; *Pí na nebesích*, překlad Naďa Stehlíková a Antonín Vrba, Mladá fronta, Praha 2000.

— *The World Within the World*, Clarendon Press, Oxford 1988.

Barrow, John, a Frank Tipler: *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford 1986.

Bartusiak, Marcia: *The Day We Found the Universe*, Vintage, New York 2010.

Bell, John: *The Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1993.

Bronowski, Jacob: *The Ascent of Man*, Little, Brown, Boston 1973; *Vzestup člověka*, Odeon, Praha 1985.

Byrne, Peter: *The Many Worlds of Hugh Everett III*, Oxford University Press, New York 2010.

Callender, Craig, a Nick Huggett: *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, Cambridge University Press, Cambridge, Anglie, 2001.

Carroll, Sean: *From Eternity to Here*, Dutton, New York 2010.

Clark, Ronald: *Einstein: The Life and Times*, Avon, New York 1984.

Cole, K. C.: *The Hole in the Universe*, Harcourt, New York 2001.

Crease, Robert P., a Charles C. Mann: *The Second Creation*, Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey, 1996.

Davies, Paul: *Cosmic Jackpot*, Houghton Mifflin, Boston 2007; *Kosmický jackpot*, překlad Martin Žofka, Argo a Dokořán, Praha 2009.

Deutsch, David: *The Fabric of Reality*, Allen Lane, New York 1997.

DeWitt, Bryce, a Neill Graham, ed.: *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton 1973.

Einstein, Albert: *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press, Princeton 1988.

— *Relativity*, Crown, New York 1961.

Ferris, Timothy: *Coming of Age in the Milky Way*, Anchor, New York 1989.

- *The Whole Shebang*, Simon & Schuster, New York 1997; *Žpráva o stavu vesmíru*, překlad Jiří Adam a Dagmar Adamová, Aurora, Praha 2000.
- Feynman, Richard: *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1995; *O povaze fyzikálních zákonů*, překlad Jana a Tomáš Ledvinkovi, Aurora, Praha 2001.
- *QED*, Princeton University Press, Princeton 1986.
- Gamow, George: *Mr. Tompkins in Paperback*, Cambridge University Press, Cambridge, Anglie, 1993; *Pan Tompkins v říši divů*, překlad Jiří Bičák a Jan Klíma, Mladá fronta, Praha 1986.
- Gleick, James: *Isaac Newton*, Pantheon, New York 2003.
- Gribbin, John: *In Search of the Multiverse*, Wiley, Hoboken, New Jersey 2010.
- *Schrödinger's Kittens and the Search for Reality*, Little, Brown, Boston 1995; *Schrödingerova kotata*, překlad Zdeněk Urban, Columbus, Praha 2001.
- Guth, Alan H.: *The Inflationary Universe*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1997.
- Hawking, Stephen: *A Brief History of Time*, Bantam Books, New York 1988; *Stručná historie času*, překlad Vladimír Karas, Mladá fronta 1991.
- *The Universe in a Nutshell*, Bantam Books, New York 2001; *Vesmír v kostce*, překlad Martin Žofka, Argo, Praha 2002.
- Isaacson, Walter: *Einstein*, Simon & Schuster, New York 2007; *Einstein: jeho život a vesmír*, překlad Martin Pokorný, Paseka, Praha 2010.
- Kaku, Michio: *Parallel Worlds*, Anchor, New York 2006; *Paralelní světy*, překlad Jiří Podolský, Argo a Dokořán, Praha 2007.
- Kirschner, Robert: *The Extravagant Universe*, Princeton University Press, Princeton 2002; *Výstřední vesmír*, překlad Jiří Podolský, Paseka, Praha 2005.
- Krauss, Lawrence: *Quintessence*, Perseus, New York 2000.
- Kurzweil, Ray: *The Age of Spiritual Machines*, Viking, New York 1999.
- *The Singularity Is Near*, Viking, New York 2005.
- Lederman, Leon, a Christopher Hill: *Symmetry and the Beautiful Universe*, Prometheus Books, Amherst, New York 2004.
- Livio, Mario: *The Accelerating Universe*, Wiley, New York 2000.
- Lloyd, Seth: *Programming the Universe*, Knopf, New York 2006.
- Moravec, Hans: *Robot*, Oxford University Press, New York 1998.
- Pais, Abraham: *Subtle Is the Lord*, Oxford University Press, Oxford 1982.
- Penrose, Roger: *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, New York 1989.
- *Shadows of the New Mind*, Oxford University Press, New York 1994.
- Randallová, Lisa: *Warped Passages*, Ecco, New York 2005; *Tajemství skrytých dimenzí vesmíru*, překlad Michael Prouza a Karel Výborný, Paseka, Praha 2011.
- Rees, Martin: *Before the Beginning*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1997.
- *Just Six Numbers*, Basic Books, New York 2001; *Pouhých šest čísel*, překlad Zdeněk Urban, Academia, Praha 2004.
- Schrödinger, Erwin: *What Is Life?*, Canto, Cambridge, Anglie 2000.
- Siegfried, Tom: *The Bit and the Pendulum*, John Wiley & Sons, New York 2000.
- Singh, Simon: *Big Bang*, Fourth Estate, New York 2004; *Velký třesk*, překlad Martin Žofka a Jiří Podolský, Argo a Dokořán, Praha 2007.
- Susskind, Leonard: *The Black Hole War*, Little, Brown, New York 2008.
- *The Cosmic Landscape*, Little, Brown, New York 2005.
- Thorne, Kip: *Black Holes and Time Warps*, W. W. Norton, New York 1994; *Černé díry a zborcený čas*, překlad Jiří Langer a kol., Mladá fronta, Praha 2004.
- Tyson, Neil de Grasse: *Death by Black Hole*, W. W. Norton, New York 2007; *Smrt v podání černé díry*, překlad Petr Kulhánek, Mladá fronta, Praha 2008.

- Vilenkin, Alexandr: *Many Worlds in One*, Hill and Wang, New York 2006; *Mnoho světů v jednom*, překlad Oldřich Klimánek, Paseka, Praha 2009.
- von Weizsäcker, Carl Friedrich: *The Unity of Nature*, Farrar, Straus and Giroux, New York 1980.
- Weinberg, Steven: *Dreams of a Final Theory*, Pantheon, New York 1992; *Snění o finální teorii*, překlad Jiří Bičák a kol., Hynek, Praha 1999.
- *The First Three Minutes*, Basic Books, New York 1993; *První tři minuty*, překlad Michal Horák, Mladá fronta, Praha 1982.
- Wheeler, John: *A Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American Library, New York 1990.
- Wilczek, Frank: *The Lightness of Being*, Basic Books, New York 2008; *Lehkost bytí aneb Bytí jako světlo*, překlad Jan Fischer, Paseka, Argo a Dokořán, Praha 2011.
- Wilczek, Frank, a Betsy Devineová: *Longing for the Harmonies*, W. W. Norton, New York 1988.
- Yau, Shing-Tung, a Steve Nadis: *The Shape of Inner Space*, Basic Books, New York 2010.

Rejstřík

Číslo stránek v *kurzivě* označují ilustrace; p. jsou poznámky

- absolutní jasnost versus zdánlivá jasnost 126, 128–9, 129, 132
- Aguirre, Anthony 158
- Albrecht, Andreas 47, 53
- Alpher, Ralph 42–3, 44, 61, 300
- alternativní vesmíry *viz* paralelní vesmíry
- analytičnost 311 p. 14
- Anderson, Carl 279
- ano/ne otázky 238–9
- anti de Sitterův 5-prostor krát 5-sféra 251, 331 p. 15
- antropické uvažování 139–143, 277, 294, 321 p. 9
 - konkrétní hodnoty konstant 142–3, 168–170
 - planetární oběh 170–1
 - princip průměrnosti 171–2
 - předpovědi multivesmíru 167–170
- Aspinwall, Paul 275
- astronomická pozorování:
 - barvy, tj. vlnové délky světla 130–3
 - drobných teplotních variací reliktního záření 58–61, 61–2
 - hustota hmoty v prostoru 30–1
 - konečnost versus nekonečnost 25–6
 - kosmické zrychlování 133–5
 - kosmologická konstanta 29, 123–5, 136, 144, 146
 - kosmologický princip 22
 - měření vzdálenosti k nebeským tělesům 124–29, 129
 - rozpínajícího se vesmíru 20–3
 - skrytá energie 26–9
 - tempo kosmického rozpínání 124–9
 - teorie velkého třesku 118
- Astrophysical Journal* 44
- atomy 73
 - vznik a stabilita 41–2, 64–5
- Babylonská knihovna (Biblioteca de Babel, La)* (Borges) 278
- Banks, Tom 332 p. 18
- Bardeen, James 60 p., 329 p. 3
- barvy světla:
 - chemické složení zdrojů 130–1
 - rudý posuv 131–2, 316 p. 5
- Bekenstein, Jacob 95, 225, 226, 231, 232, 236, 239–40, 24, 315 p. 16, 329 p. 3
- Bergshoeff, Eric 316 p. 5
- Berkeley, biskup 281
- Bessel, Friedrich 126
- Bethe, Hans 43
- bílé díry 263–4
- bílý trpaslík 127
- binární tetrahedrální prostor 28
- bit (dvojková číslice) jako jednotka informace 238, 240, 239, 247, 287
- Blau, Steven 261
- Blue Brain Project 268
- Blue Gene 268
- Bohm, David 327 p. 11
- Bohr, Niels 179–80, 188–192, 196–7, 210, 212, 218
 - viz též* kodaňská interpretace
- Boltzmann, Ludwig 229–30
- Borges, Jorge Luis 278
- Born, Max 186, 325 p. 9
- Bostrom, Nick 271–2
- Bousso, Raphael 120, 146, 320 p. 5
- bránový multivesmír 113, 115, 158, 163, 280, 296, 299
- brány:
 - černé 250–1
 - bránové toky 120–1, 121
 - gravitační pole 250
 - Maldacenův objev 248–51, 249
 - odhalení 109, 316 p. 5

- srážky 14, 116–7, 119
 struny na nich končíci 113–4, 114
 velikost 110–1
- Brogie, princ Louis de 327 p. 11
- Brout, Robert 64
- Brundrit, Geoff 306 p. 17
- Burke, Bernard 43
- Calabi, Eugenio 88
- Calabiho-Yauovy tvary 88–9, 89, 315
 p. 17
 ovinuté bránami a prostoupené toky
 121, 120–2, 146, 149, 316 p. 9, 319
 p. 15
 počet 89
 příspěvky teorie strun matematice
 97–8
- Callan, Curtis 316 p. 5
- Candelas, Philip 315 p. 17
- Cantor, Georg 321 p. 10
- Carter, Brandon 139, 141–3, 329 p. 3
- Cassini-Huygens (sonda) 21
- Cicero 117
- Cocke, John 271
- Coleman, Sidney 149–51 310 p. 13
- Cosmic Background Explorer (COBE)
 61
- cyklické kosmologie 117–9, 124–5
 druhý termodynamický zákon 118–9
 výhody 117–8
- cyklický multivesmír 117–8, 119, 163, 280,
 296, 299
 shrnutí 290
- čas:
 kosmický a průměrná hustota hmoty
 67
 cyklické srážky brán 115–17
 hodnota inflatonového pole 67–8
 jako rozměr časoprostoru v teorii strun
 82
 jeho zakřivení 19–21;
viz též časoprostorové zakřivení
 měření jeho plynutí 66–8, 310 p. 12
 nárůst entropie v něm 118–9
 prostor ve vesmírné bublině 68–71,
 69, 70
 vztah k energii 329 p. 4
- čas nula 31, 40
viz též stvoření, vznik vesmíru
- časoprostor:
 kvantové chvění gravitačního pole 76
 počet rozměrů v teorii strun 82–7
 časoprostorové zakřivení:
 důkazy na jeho podporu 20–1
- Einsteinův matematický popis 24–5,
 81, 96
- nulové zakřivení prostoru 29 p.
 teoretická podstata 19–21; *viz též*
 obecná teorie relativity
 v okolí těžkých objektů, podle
 Schwarzschildova přesného řešení
 226–7
- částice 306 p. 15
 fundamentální síly 55–6
 jejich hmotnost a Higgsova pole 64–5
 jejich modelování a matematika 96–7
 kondenzace energie inflatonu do nich
 54–5, 58
 kvantový stav 37
 nedostatky klasické fyziky 181–2
 omezení přesnosti jejich měření 35–6,
 305–6 p. 13
 popsán jako body v kvantové teorii
 pole 75, 78, 80–1, 311 p. 4
 popsán jako vlákna v teorii strun 78,
 78–81
 pravděpodobnostní přístup kvantové
 mechaniky k nim 180–2, 185–90,
 187–189; *viz též* pravděpodobnostní
 předpovědi v kvantové mechanice
 redukcionistický pohled na ně 37–8
 souhlas teorie a experimentu
 ve vlastnostech 87
 spin 312–3 p. 7
 supersymetrické 91–2, 138
 vlastnosti v teorii strun 87–94, 100
 změna jejich vlastností v multivesmíru
 154
viz též konkrétní částice
- částicové urychlovače 79, 162, 296
 LHC (Large Hadron Collider),
 Ženeva, Švýcarsko 14, 64, 79, 90–4,
 104–5, 115, 119, 138, 227–8, 314 p. 14
 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider),
 Brookhaven, New York 254–5, 297
 struny jsou na ně moc malé 90
- černé brány 250–1
- černé díry 36, 226–7, 232, 329 p. 3–8
 drobné 93–5, 115, 228
 druhý zákon termodynamický 228,
 231–4, 236, 256
 entropie 95, 101, 232–4, 236, 239–41,
 240, 244, 245–6, 253 p., 256, 306 p.
 14, 315 p. 16
 geometrie časoprostoru 96–7
 Hawkingovo záření 236–7, 242–3
 hranice *viz* horizont událostí
 informační kapacita 239–41, 240, 244–
 –6, 256

- jako ztělesnění pořádku 233
jednotná teorie 76–8
jejich střed 95, 314 p. 15
kolaps hvězd 308 p. 4
kvantová pole u nich 234–7
kvantové vlastnosti 14, 234, 253 p.
mikroskopické složení 330 p. 8
obecná relativita 226–7, 231–3, 239,
241–2, 301, 329 p. 1
povrch 234, 236, 239–41, 240, 244
problém nedosažitelnosti 160
Schwarzschildovo řešení
Einsteinových rovnic 226–8, 232,
234
singularity 94–6
skrytá informace 239–44
teorémy o plešatosti 233, 239
teplota 233, 236, 246
umělá výroba vesmírných bublin 262,
263
umístění skryté informace 241–4, 245
uvnitř Maldacenaova vesmíru 253, 254
velikost určená hmotností 244
volný pád do nich, z dvou pohledů
241–2
vývoj 329 p. 3
červení obří 126
Čibisov, Gennadij 60 p.
- Dai, Jin 316 p. 5
Davisson, Clinton 182–3, 183–4
definitivní multivesmír 277–87, 297, 299,
302
odůvodnění 280–83
problém ověřitelnosti 295–6
shrnutí 290
simulování jeho částí 283–7
dekoherence 211, 223
Delaunay, Charles-Eugène 102
De Luccia, Frank 149–51, 310 p. 13
Deutsch, David 222
de Wit, Bernard 316 p. 5
DeWitt, Bryce 180
Dicke, Robert 43–4, 61, 139, 306 p. 1
Dirac, Paul 278
Dixon, Lance 94, 315 p. 17
dodatečné rozměry prostoru 82–7, 88–
90, 242, 251
drobné černé díry 91–2, 94
důvod neviditelnosti 83, 84, 85, 114
gravitace 90, 93, 114–5
chybějící energie 92, 114–5
jako zdroj vesmíru s různými
kosmologickými konstantami 146–7,
151–3, 152–3
Kaluzova-Kleinova teorie 83–7, 86, 91
konstrukce strunových modelů 154
počet 82–3, 109
scénář bránových světů 111, 114
strunová krajina 148, 149, 151–3, 152–3,
299
určování přesného tvaru 88–91, 120–2;
viz též Calabiho-Yauovy tvary
vliv na částicové vlastnosti 88, 90–1
v teorii strun 82–3, 85, 88–94, 111,
114–5
druhá mocnina velikosti 323 p. 3
druhá superstrunová revoluce (1995) 110
druhý zákon termodynamický 118–9,
231–4
černé díry 228, 231–4, 236, 256
skladování informace 244–6
dualistické teorie duševna 267
dualita 242–4
mezi teorií strun a teorií pole 248–57,
253
v pohledu na pád do černé díry 243–4
variační teorie strun 106–8, 315 p. 3
Duff, Michael 106, 316 p. 5
Dukasová, Helen 73
dvourozměrná kulová plocha (sféra) 26
dvouštěrbínový experiment 182–5, 183–4
linearita 193
pravděpodobnostní vlny 185–7, 187,
194
s měřidly za oběma štěrbínami 210–2
- $E = mc^2$ 20, 78
Eddington, Arthur 21, 303–4 p. 4
Efstathiou, George 139 p., 168
Einstein, Albert 61, 140, 181, 191, 301
černé díry 227, 232–3, 239, 241, 329
p. 1
jednotná teorie pole 72–4, 85, 146–7,
301
kosmologická konstanta 14, 24, 25,
29–30, 48–9, 53, 123–4, 134, 135
kosmologický princip 21–4, 45
Lemaîtreova teorie stvoření 18–9, 25–6
Newtonova teorie gravitace 18–9
obecná teorie relativity 18–26, 46–50,
72, 96, 159–60, 301; *viz též* obecná
teorie relativity
obrázek s Monroevou 107, 107, 242
pravděpodobnostní teorie 218
relativita času 66
Schwarzschildovy výsledky 227–8
speciální teorie relativity 33, 47, 66,
159–60, 300–1
úvahy o oscilujícím vesmíru 117

- věčný statický vesmír 18–9, 23–4, 26, 49, 124, 303 p. 1, 304 p. 6, 7
- Einsteinovy rovnice pole 20–1, 81, 94, 117, 300–1, 303 p. 3, 304 p. 6, 311 p. 1
- dodatečné rozměry prostoru 85–7
- dřívější poznatky k nim vedoucí 96
- entropie 118, 232–3
- redukce jejich složitosti 23, 304 p. 5
- Schwarzschildovo řešení pro černou díru 226–7, 231–2, 234
- tvar vesmíru 28–9
- úprava nutná pro víru ve statický vesmír 24–6, 124
- Elegantní vesmír* (Greene) 72, 82
- elektrická pole 50–1, 120, 159
- elektrický proud 73
- elektromagnetické vlny 51, 75, 159, 300
- elektromagnetismus, elektromagnetická pole 104, 113, 143, 311 p. 2, 315 p. 1
- jednotná teorie pole 72–3
- Kaluzova-Kleinova teorie, 85–6, 86
- kvantová teorie pole 85
- kvantové chvění 85–6
- vlnění 75
- změna vlastností částic 64–5
- elektronová pole 51
- elektrony 85, 121, 292
- dipólový moment 176
- dvouštěrbinový experiment 192–5, 183–4, 186–7, 187, 193, 212–3
- elektrický tok 120, 121
- Higgsova pole 63–4
- spin 328 p. 12
- usazení do atomů 42–3
- vazbová konstanta 104
- v kvantové teorii pole 75, 78
- v teorii strun 78
- vlastnosti 87, 88
- elektroslabá síla 311 p. 2
- Ellis, George 306 p. 17
- emergentní strategie 273–4
- energie:
- barva fotonu 130
- černé díry 93–4
- chybějící a skryté rozměry 92, 114–5
- její souvislost s časem 329 p. 4
- kinetická 53–4, 260–1, 332 p. 2
- kvantová produkce párů 234–5
- obsažená v polích 52–3
- potenciální *viz* potenciální energie
- strunová délka 110
- toků v Calabiho-Yauově tvarech 146
- tvar vesmíru 28–30
- ve vsudypřítomném kvantovém chvění 135–6, 137, 138, 148
- zaplňující vakuum (Einsteinův popis) 24–5
- zaplňující vakuum (skrytá energie) 29–30
- Englert, François 64
- entropie 329 p. 2
- černých děr 95, 101, 231–4, 237, 239, 239–41, 242, 243–4, 245–6, 253 p., 256, 306 p. 14, 315 p. 16
- Boltzmannův matematický popis 118–9, 231, 236, 243
- jako míra skryté informace 237–9, 256
- logaritmy 238
- teplota 233
- epistemologie 265
- Everett, Hugh III. 179–80, 225, 322–3 p. 2
- Schrödingerova rovnice 192, 197–99, 199, 200, 209–10, 301
- včlenění pravděpodobnosti do mnoha světů 215–22
- evoluce 51, 111, 201
- Evropská kosmická agentura 93
- Faraday, Michael 50, 80, 120
- Farhi, Edward 262–3
- Feynman, Richard 225
- Filozofická vysvětlení* (Nozick) 276–8
- Fischler, Willy 332 p. 18
- flopové singularity 95
- Fokker, Adrian 21
- fotony 75, 121
- barvy či vlnové délky 130–1
- Hawkingovo záření 243
- pohyb rychlostí světla 42
- pokles vibrační frekvence 42
- prvotní 41–2
- prvotní, jejich překvapivá homogenita 44–7, 55, 60
- rudý posuv 131–3, 317 p. 5
- v reliktním záření 41–7
- ve scénářích bránových světů 113
- Fredkin, Edward 271–2
- Freivogel, Ben 158
- Fridman, Alexandr 18, 26, 28, 41, 42, 61, 117, 301
- funkcionalistické teorie duševna 267
- fyzika:
- falešná hranice mezi ní a matematikou 281
- jen o předpovědích 223–4
- koperníkovské korekce 291–2
- posloupnost teoretických vývoje 80, 81, 99, 257, 291
- tradiční zaměření na objekty 226

- třífázový proces v ní 208
 fyzikalistické teorie mysli 267
- galaxie 22, 161, 292, 298–9
 antropické uvažování 143–4, 167–71
 astronomické pozorování 25–6
 gravitační vtažování částic 61–2, 143
 jako důkaz rozpínání prostoru 125
 možné překonání rychlosti světla 47
 kosmické zrychlování 133
 měření jejich vzdálenosti 125–9, 129
 pohyb 19, 26, 28, 47, 67, 126, 133–4,
 307 p. 2, 317 p. 4, 6
 s černou dírou v centru 227
 ve stále ranějších dobách 31
 v modelech různých tvarů prostoru 28
 vznik a kosmologická konstanta 143–
 4, 168–70
 vznik z energie inflatonu 55, 58
 vyslané světlo 30
- Gamow, George 41–4, 61, 124, 300
 Garriga, Jaume 158, 306 p. 17
 Gauss, Carl Friedrich 96
 Georgi, Howard 74, 311 p. 2
 Germer, Lester 182–3, 183–4
 Ghirardi, Giancarlo 326–7 p. 11
 Giddings, Steven 120
 Glashow, Sheldon 74, 311 p. 2
 GPS (polohový systém) 21
 Gödel, Kurt 286
 Graham, Neill 180
 gravitační vlny 93, 110, 119, 296
 gravitony 80
 ve scénáři bránových světů 114–5
 gravitace, gravitační pole 140, 143
 cyklický multivesmír 116–7
 černé díry 227–8, 308 p. 4
 dodatečné rozměry 90–2
 drobné černé díry 92–4
 jednotná teorie pole 72–8, 79–82, 89
 její nepřátelství s kvantovou
 mechanikou 73–8, 80–2, 89, 94–5,
 98, 136–7, 239, 312–3 p. 5, 6, 8
 jako zdroj energie inflatonových polí
 260–1, 309 p. 9
 Kaluzova-Kleinova teorie 83–7, 86
 kvantová teorie pole 256
 kvantové chvění 313 p. 8
 Newtonova teorie 18–20, 48–9, 289,
 303 p. 2
 obecná relativita 18–26; *viz též* obecná
 teorie relativity
 odpudivá 25, 49–55, 124, 260; *viz též*
 odpudivá gravitace
 plynutí času 66, 310 p. 12
 prostor jako její médium 19–20
 při formování struktur ve vesmíru
 61–2, 143–4
 singularity 94–6
 specializace na svět těžkých objektů
 76–7
 teorie strun 80, 242
 ve scénáři bránových světů 113–5, 280–1
 volný pád 241–3, 330 p. 9–10
 změna vlastností částic 64–5
 zpomalování rozpínání prostoru 124,
 133, 134
 způsobená hmotou i tlakem 48, 308 p. 4
- Greaves, Hilary 222
 Green, Michael 80, 110 p.
 Green, Paul 315 p. 17
 Gross, David 156
 Gubser, Steven 252
 Guendelman, Eduardo 261
 Guralnik, Gerald 64
 Guth, Alan 47, 52–3, 59, 59, 158, 261–2,
 309–10 p. 7, 10
 Guven, Jemal 263
- Hagen, Carl 64
 Harvey, Jeff 94
 Hawking, Stephen 60 p., 93, 95, 234–6,
 239–41, 240, 245, 315 p. 16, 329–30 p.
 3, 5, 8
 Hawkingovo záření 236, 242–3
 Heisenberg, Werner 35, 179, 181
 helium, jeho objev 130
 Herakleitos 117
 Herman, Robert 43–4, 61, 300
 Higgs, Peter 63
 Higgsova pole 63–5
 jejich křivka potenciální energie 64,
 65, 66
 několikanásobná 65, 65, 66
 strunová krajina 148–9
- Vysoké-Z supernovový vyhledávací tým
 123–4, 127, 132, 144
- Hilbertův prostor 324 p. 7, 324–5 p. 9
 hinduismus 117
 hmota:
 kritická hustota 29, 30
 rozptýlená v prostoru, Einsteinův
 popis 24–5
 tvar vesmíru 28–30
- hmotnost:
 gravitace 48
 Higgsova pole 63–6
 její hustota jako kosmické hodiny 67
 holografický multivesmír 246, 248, 280,
 297

- shrnutí 290
- holografický princip 14, 225, 312 p. 6
- Maldacenuv objev 262–73, 268, 331–2 p. 15–18
- skrytá informace na povrchu 240, 244, 246
- slovník hranice versus vnitřek 252–4, 257
- homogenita prostoru:
- fotony reliktního záření 44–8, 55, 59–61, 61
- kosmologický princip 22, 26–7, 45
- homogenní tvary, slučitelné
- s kosmologickým principem 26–8
- horizonty událostí 36, 161, 232, 233, 234, 235, 329 p. 4–5, 330 p. 12
- černých děr 250–1
- entropie černých děr 239–41, 240, 243
- pád skrz ně, z dvou protichůdných pohledů 242–3
- skrytá informace 241–39, 245
- Hořava, Petr 316 p. 5
- Howe, Paul 316 p. 5
- Hubble, Edwin 25, 26, 124, 131
- Hubbleův vesmírný dalekohled 30
- Hull, Chris 106, 316 p. 5
- Humason, Milton 304 p. 8
- hvězdy 144
- gravitační vtahování částic 61–2
- kolaps do černé díry 308–9 p. 4
- kondenzace energie inflatonu do materiálu pro ně 54–5
- měření vzdálenosti k nim 125–8, 129
- pohyb 19
- pohyb světla jimi vyslaného 30, 301
- vlastnosti elektronu 87
- hypotéza matematického vesmíru 282
- viz též* definitivní multivesmír
- chaos 181
- chaotická inflace 309 p. 5
- Church, Alonzo 286
- IBM 268, 271
- Inami, Takeo 316 p. 5
- inflační kosmologie 13–4, 41–71, 135, 280, 296–7, 309–9 p. 5–9, 320 p. 4
- analogie s ementálem 58–9
- kvantová pole 50–55
- počáteční semínko inflace 261–2, 263, 263
- problém magnetických monopolů 322 p. 11
- spojení s teorií strun 147–55
- problém horizontu 47–8, 58, 307–8 p. 3
- umělá výroba nových vesmírů 259–264
- varianty 55–6, 59
- věčná inflace 55–8, 147
- inflační multivesmír 55–71, 116, 162, 172, 283, 296, 310 p. 14, 316 p. 6
- analogie s ementálem 58–9
- Higgsova pole 64–6, 65
- kvantová neurčitost 56–7, 59
- ostré oddělení vesmírů v něm 63
- problém míry 175–6
- rozdílly v prostředí v něm 62–6, 67, 299
- shrnutí 290
- srážky vesmírných bublin v něm 158
- strunová krajina 14, 147–8; *viz též* krajinný multivesmír
- univerzálnost fyzikálních zákonů v něm 62–64, 66
- viz též* vesmírné bubliny
- vztah k sešívánému multivesmíru 62, 66, 68, 70–1
- zrod ve věčné inflaci 55–8, 59, 162
- inflační rozpínání 47–71
- gravitační vlny 119
- charakteristická energetická škála 260–1, 332 p. 3
- inflatonová pole 51–7, 309 p. 5
- jako člen 47
- jako rámec bez definitivní verze 55–6, 58
- jej podporující pozorování 59–62, 258
- kondenzace energie do částic na jeho konci 55–6, 58, 259–60
- kvantové chvění 56–7, 58–62
- nesmírně rychlý výbuch 39, 47–8, 49–50, 53–5, 259–60
- neustálé opakování na různých vzdálených místech 56
- objem prostoru zaplavený vysokou energií pole 57–8
- poháněná záporným tlakem 49–50, 54
- potenciální energie 53–5, 62
- pozorované variace teploty reliktního záření 59–62, 61, 174–6
- problém nedosažitelnosti 160
- rozfoukávání bublin od sebe 63, 158
- shlukování částic do chomáčů na konci 61–2
- tvorba paralelních vesmírů 55–9, 61–71; *viz též* inflační multivesmír
- tvorba vesmírných bublin 58–9, 59, 262–3, 263
- umělá výroba nových vesmírů 259–264
- věčná povaha 55–8, 58–9, 62, 147, 174–6, 309 p. 7
- inflační semínko 261–2, 263, 261

- inflatonová pole 51–6
 čerpání energie z gravitace 260–1, 309 p. 9
 jejich hodnota jako čas 67–8
 kvantové chvění 56–7, 57, 58, 60, 309 p. 8, 310 p. 14
 neexistence důkazů 261
 počet 56, 58
 potenciální energie 53–8, 54, 61–2, 148, 309 p. 5
 prostor vyplněný jejich energií 56–8, 158
 převedení energie na částice 54–6, 58, 260, 310 p. 14
 záporný tlak 52–3, 54
- informace:
 holografický princip 241, 244, 246
 její míra 238, 240
 paměťová kapacita 241, 244–6, 245
 skrytá 237–44; *viz též* skrytá informace
 ukrytá na povrchu 241–4, 245–6, 252
- informace jako podstata fyziky 226
- instrumentalisté 160 p.
- interference 185, 186
 pravděpodobnostní vlny 185–6, 187, 212
- interferenční obrazce 185, 186, 212
- Išihara, Hideki 263
- jaderné síly a změna vlastností částic 65–6
- jaderná fyzika 43
- jádra, silné a slabé jaderné síly 73
- Janssen, Pierre 130
- jasnost, absolutní versus zdánlivá 126, 128–31, 129, 132
- jednotná teorie pole 72–101, 311 p. 2
 Einsteinova práce na ní 72–4, 85–6, 146–7, 301
 gravitace 73–8, 79–82, 89
 kvantová teorie pole 73–8, 79–81, 89–90
 skryté rozměry prostoru (Kaluzova-Kleinova teorie) 83–7, 86
 stručná historie 73–4
 teorie strun 13, 72, 73–5, 79–80, 85–7, 92, 313 p. 8
- Johnson, Matthew 158
- Johnson, Samuel 281
- Kachru, Shamit 120, 147
- Kaloshová, Renata 147, 319 p.15
- Kaluza, Theodor 83, 91
- Kaluzova-Kleinova teorie 86–7, 86, 91
- Kepler, Johannes 140
- Kerr, Roy 96
- Khoury, Justin 116
- Kibble, Tom 64
- kinetická energie 53–4, 235 p., 260, 332 p. 2
- klasická teorie pole 50–2, 80, 120, 159
 vztah k teorii strun 80, 81
- klasická mechanika 80, 159, 315 p. 1
 měření 34, 35
 kvantová revoluce 180–2
 ve vztahu k teorii strun 80–2, 81
 třífázový proces v ní 298
 versus kvantová mechanika 12
viz též Newton, Isaac
- Kleban, Matthew 158
- Klebanov, Igor 252
- Klein, Oskar 83
- klonování a pravděpodobnost 215–6
- Kobajaši, Makoto 263
- kodaňská interpretace 188–91, 190, 196–7, 210, 212–5, 326 p. 11, 328 p. 12
 experimentální potvrzení 191
 nesouhlas s mnoha světy 223–4, 328 p. 12
 nesouhlas se Schrödingerovou rovnicí 191–2, 196–7, 209–10, 213, 215
- konfigurační prostor 319 p. 2, 323 p. 4
- konformně-invariantní supersymetrická kvantová kalibrační kvantová teorie pole 251
- konstanta jemné struktury 315 p. 2
- konstantní kladná křivost 26, 28
- konstantní nulové zakřivení 27, 28
- konstantní záporná křivost 27, 28
- konstanty přírody 293, 320 p. 6
 antropický princip 139, 142–3
 jejich změna v členských vesmírech 299
 možnost života na Zemi 142–46
 selekční zkresení 139–40
viz též kosmologická konstanta; vazbová konstanta
- konstrukce strunových modelů 124
- Koperník, Mikuláš 139
- koperníkovský princip 139, 291–2
- kosmické horizonty 32, 33, 305 p. 12, 306 p. 16
 analogie s dekou 33, 33, 37–9
 jako izolované světy 32, 33, 39
 jejich překryv 39
 opakování v něm 33–4, 36–9; *viz též* opakování, kosmické
 počet uspořádání částic v něm 37
 problém horizontu 47–8, 58, 307–8 p. 3
 problém nedosažitelnosti 160

- rozpínání prostoru 133, 161, 319–20
 p. 3
 větvení sešívánoho vesmíru 39–40
- kosmické záření mikrovlnného pozadí
viz reliktní záření
- kosmologická konstanta (kosmologický člen) 14, 25, 26, 122, 123–4, 133–5
 antropické uvažování 139–43, 168–70
 astronomická pozorování 29–30 123–35, 136, 144, 146
 existence života 143–6
 formování galaxií 149, 168–70
 hojnost vesmírů 145–7, 151–5, 318–9
 p. 14
 multivesmírný pohled na ni 168–70, 177, 294, 320–1 p. 8
 kvantová neurčitost 135, 170
 odpudivá gravitace 25, 49–50, 53, 133–4, 144, 151, 168, 321 p. 10
 proměnlivost v multivesmíru 164–6, 165, 177
 předpoklad její nulovosti 136–9
 strunová krajina 148, 149, 151–4
 terminologie 123 p.
 výpočet její hodnoty 123, 133–4, 135, 139, 143–4, 152–3, 168–9, 176–7
- kosmologický princip 22–4
 Einsteinova víra v něj 21–2
 důkazy platnosti 22, 45
 homogenita vesmíru 22, 26–7, 45
 jím umožněné tvary vesmíru 26–28
 zjednodušení matematiky 27
- kosmologie 17–71
 jako okrajová disciplína 43
 nekonečnost prostoru 13, 14, 17
 počátky a Einstein 21–4
viz též inflační kosmologie
- Kovtun, Pavel 255
- Kragh, Helge 303 p. 1
- krajinný multivesmír 148–55, 162–3, 164, 170, 280, 283, 295–6, 299
 jako bojiště o duši vědy 156–7
 kosmologická konstanta 148, 149, 151–3
 konstrukce strunových modelů 153–4
 kvantové tunelování 149–53, 152, 153, 166–7
 obtížnost zjišťování detailů o něm 166–7
 shrnutí 290
 strunová krajina 147–8, 149
- kritická hustota 29–30
- křesťanství 117
- křivka potenciální energie 54, 65
 pro Higgsova pole 65, 65
 pro inflatonová pole 54, 54, 62
 křížová symetrie 314 p. 14
 kvanta 75
 kvantová anomálie 82
 kvantová elektrodynamika 75
 kvantová chromodynamika 255
 kvantová mechanika 43, 73–4, 80, 280, 283, 315 p. 1
 aplikovaná na pole 75–6; *viz též*
 kvantová teorie pole
 barva fotonu 130
 černé díry 14, 234, 253 p.
 experimentální potvrzení 181–2, 190, 213–5, 219, 223, 258
 interpretace s mnoha světy 11–3, 12, 180–2, 197–9, 199
 jako vládce mikrosvěta 77
 jednotná teorie pole 73–8, 79–80, 89, 234, 313 p. 8
 její svržení klasické fyziky 181–2
 kodaňská interpretace 188–202, 190, 196–7, 210, 212–3
 linearita 192–7, 194, 197, 203, 297
 matematický a fyzikální příběh o ní 199–210, 202, 204–9
 nepřátelství s obecnou relativitou 73–8, 80–2, 89, 94–5, 98, 136–8, 239, 312 p. 5, 312–3 p. 6, 8
 omezení rozlišení v ní 35–6, 305–6 p. 13
 paralelní vesmíry z ní se vynořující 180–1, 296–7; *viz též* mnoho světů (interpretace)
 pojem holografické projekce 14
 pravděpodobnostní předpovědi v ní 12–3, 14, 159–61, 167, 174–6, 180–2, 185–97, 189–1900, 273, 324–5 p. 9; *viz též* pravděpodobnostní předpovědi; pravděpodobnostní vlny
 princip neurčitosti 35; *viz též* kvantová neurčitost
 problém nedosažitelnosti 159–62
 proces skloubení s obecnou relativitou 234
 pronikání bariérami 149–50
 protirečící zdravému rozumu s jednou určitou realitou 12–3
 Schrödingerova rovnice 190–210, 192, 213, 223, 301, 327–8 p. 11; *viz též* Schrödingerova rovnice
 Schwarzschildovo řešení pro černou díru 234
 singularity 94–5
 spin v ní 312–3 p. 7

- toky 121
 třífázový proces v ní 298
 ve vztahu k teorii strun 81, 81
 vlnově-částicový dualismus 326–8 p. 11
 kvantová neurčitost 35, 305–6 p. 13, 311 p. 4
 energie ve vsudypřítomném kvantovém chvění 135–7, 137, 138, 148
 gravitační pole 313 p. 8
 inflatonová pole 55–9, 60, 309 p. 8, 310 p. 14
 jednotná teorie pole 76, 234
 kosmologická konstanta 135, 170
 kvantová produkce párů 234–5
 malé variace teploty reliktního záření 60–2, 61, 174–5
 ovlivňující všechna pole 75
 průchod bariérami 149–50
 kvantová pole 50–5, 235
 v přítomnosti černé díry 234–7
viz též inflatonová pole
 kvantová produkce párů 235
 kvantová teorie pole 51, 75–6, 78, 81, 90, 283, 311 p. 4–7, 313–4 p. 12
 částice popsané jako body v nich 75, 78, 311 p. 4
 dřívější pojem pole 50–1
 experimentální ověření 75, 90–1
 gravitace 257
 jednotná teorie pole 73–8, 79–80, 90
 kvantové chvění 56–7, 136
 měřené vlastnosti částic jako její vstup 88, 90, 314 p. 13
 renormalizace 312 p. 5
 standardní model 63, 79
 supersymetrická 311 p. 3
 vztah k teorii strun 80, 81, 90–1, 248–57, 252
 kvantové anomálie 82
 kvantové chvění:
 užití pojmu 305 p. 13
viz též kvantová neurčitost
 kvantové počítače 270
 kvantové tunelování 149–53, 150, 152–3, 167, 263, 295
 kvantové vlny *viz* pravděpodobnostní vlny
 kvantový multivesmír 199, 277, 280, 296, 301
 shrnutí 290
viz též mnoho světů (interpretace)
 kvantový stav 37, 306 p. 14
 kvarková pole 51
 kvarko-gluonové plazma 254–5
- kvarky:
 Higgsova pole 63
 jejich vazbová konstanta: 105–6
 v kvantové teorii pole 75, 78
 v teorii strun 78
- LHC (urychlovač, Large Hadron Collider), Ženeva, Švýcarsko 14, 64, 79, 90–4, 104–5, 115, 119, 138, 227–8, 314 p. 14
 Leibniz, Gottfried von 277
 Leigh, Robert 316 p. 5
 Lemaître, Georges 18, 25–6, 28, 40–2, 61, 301
 Lerche, Wolfgang 315 p. 17
 Lewis, David 333 p. 7
 lidské bytosti, nedůležité v kosmickém řádu 139–40, 291–2
 limitně vyčíslitelné funkce 330 p. 12
 Linde, Andrej 47, 53, 55, 147, 168, 264, 309 p. 5
 linearita 297
 Schrödingerova rovnice 192–7, 194, 197, 209
 zjednodušení kvantových výpočtů 192–3
 Lobačevskij, Nikolaj 96
 Lockyer, Joseph Norman 130
 logaritmy 238
 lokální Lorentzova invariance 314 p. 14
- McAllister, Liam 318 p. 15
 magnetická pole 50–1, 63–4, 120, 159
 magnetické monopóly 263
 jejich problém 322 p. 11
 magnety a toky jimi vytvořené 120, 121
 Maldacena, Juan 248–57, 319 p. 15, 331–2 p. 15–18
 Markram, Henry 268
 Martel, Hugo 168
 matematika 8, 297
 definitivní multivesmír 280–3
 falešné oddělení od fyziky 281
 filozofické postoje k ní 160 p.
 jako generátor teorií paralelních vesmírů 15–6, 258
 jako kvantitativní jazyk pro popis reality 280–2
 jako nástroj objevu tajemství o fungování světa 15, 300–2
 jako synonymum fyzikální existence 282
 její objev versus vynalézání 278–9
 nedávné zvraty způsobené teorií strun 103, 106

- nezbytné aproximace na počítači
 274–5, 283
 poruchový přístup k ní 104–6, 105,
 109, 254
 příspěvky teorie struny k ní 96–9, 101
 v teorii strun, její aproximace 93, 98–
 –9, 104–6, 109, 254, 256
 vyčíslitelné funkce 284, 286, 333 p. 12
 zanedbávání komplikací v ní 102–3
 Mather, John 61
 maticová teorie 332 p. 18
 Maxwell, James Clerk 51, 72–3, 75, 80,
 85, 159, 181, 300–1
 megaverzum *viz* paralelní vesmíry
 měření
 aplikace linearity na něj 194, 194–7,
 196, 197
 Everettových mnoho světů 197–9, 199
 kolaps vlnové funkce *viz* kodaňská
 interpretace
 konečný počet různých možností
 34–5, 36
 omezená přesnost 34–6
 pozice částice, omezená přesnost
 35–6, 305–6 p. 13
 princip neurčitosti 35–6
 skryté informace 238
 měření vzdálenosti k nebeským tělesům
 124–9
 supernovy jako standardní svíčky
 126–7
 v rozpínajícím se vesmíru 127–9, 129,
 317 p. 6
 Mléčná dráha 26, 227, 236, 292, 298
 mnoho světů, přístup ke kvantové
 mechanice 12–3, 14, 179–82, 197–224,
 296, 324–8 p. 7–12
 dekoherence 211
 empirické ověřování kvantové
 mechaniky 213–5
 Everettova domněnka 179–80, 192,
 197–9, 199, 201, 210–1, 213–4, 301,
 322–3 p. 2
 jeho matematické a fyzikální příběhy
 201–10, 204–9
 kritici 213–24
 kvantověmechanická
 pravděpodobnost 215–22, 324–6 p.
 9–10
 rozpor s předpověďmi kodaňské
 interpretace 223–4, 328–9 p. 12
 mnohonásobné vesmíry *viz* paralelní
 vesmíry
 Monroeová, Marilyn, obrázek
 s Einsteinem 107, 107, 242
 Moravec, Hans 266, 271
 Morrison, David 95
 Mount Wilson (observatoř) 25
 mozek
 ekvivalentní výkon počítače 266–7
 počítačové vědomí 264–9, 297
 teorie o mysli 267–8
 zeslabený kontakt s realitou 264
 M-teorie 109–10
 Muchanov, Vjačeslav 60 p.
 multivesmír *viz* paralelní vesmíry
 mysl, teorie o ní 266–9
 Nakao, Ken-Iči 263
 napětí *viz* záporný tlak
 NASA 19
 nedosažitelné vlastnosti, důležitost pro
 vědu 159–62
 nekonečné pravděpodobnosti 76
 nekonečno, jeho dělení 171–6, 321 p. 10
 nekonečný prostor 12, 13, 17–8, 25–26,
 30–40, 162
 analogie s dekou 33–4, 33, 37–9
 jako oblíbená možnost mezi fyziky
 a kosmology 31
 konečný počet možností 34–6
 nekonečná množina paralelních světů
 17, 37–40
 nekonečný počet oblastí 33
 opakování v něm 23–4, 36–9, 70; *viz*
též opakování, kosmické
 pohyb světla 32–3
 rozdíl mezi konečným a nekonečným
 26–8, 30–1, 40, 68–71, 69–70, 296
 velikost vesmíru 131
 ve vesmírné bublině 68–71, 69–70
 neonové reklamy 130
 neutrinová pole 51
 neutrina, vazbová konstanta 104
 neutrony 65, 292
 nevyčíslitelné funkce 284, 286
 Newton, Isaac 21, 48, 80, 140, 177, 181,
 200, 291
 pohybové zákony 50, 159, 188, 289
 teorie gravitace 18–20, 48–9, 289, 303
 p. 2
New York Times 21
 Nicolai, Hermann 316 p. 5
 Nicolis, Alberto 158
 Nobelova cena za fyziku 44, 61, 74, 156,
 182, 186
 Nozick, Robert 276–8
 nula:
 mechanismy vyrušení 137–9
 tlak 262

- obecná teorie relativity 18–26, 47–50, 72, 80, 162, 280
 aplikovaná na celý kosmos 21–4
 černé díry 226–8, 233, 239, 241–2, 301, 329 p. 1
 dodatečné rozměry prostoru 83–5
 inflační kosmologie 47–50
 jednotná teorie pole 73–8, 89, 234–5, 313 p. 8
 ji podporující pozorování 20–1, 300–1, 303–4 p. 4
 kosmologická konstanta 14, 25, 26, 29, 30, 48–9, 123–4
 kosmologický princip 22–4
 Lemaîtreova kosmologické teorie 18, 25–6
 matematický popis viz Einsteinovy rovnice pole
 nepřítelství s kvantovou mechanikou 73–8, 80–2, 89, 94–6, 98, 136–7, 239, 312 p. 5, 312–3 p. 6, 8
 odpudivá gravitace 25, 48–50
 problém horizontu 47–8
 problém nedosažitelnosti 159–62
 příspěvek tlaku ke gravitaci 48–9
 určení tvaru vesmíru 28–30
 rozpor s věčným statickým vesmírem 23–26, 49, 303 p. 1
 slučování s kvantovou mechanikou 234
 vztah k teorii strun 80–2
 zakřivení časoprostoru 120–1, 24–5
 odpudivá gravitace 25, 49–55, 260
 dočasná éra 53–5
 generovaná záporným tlakem 49–50, 52–3
 kosmologická konstanta 26, 49–50, 53, 123, 134–5, 144, 151, 168, 318 p. 10
 Olivová, Aude 107
 opakování, kosmické 32–4, 36–7
 nepřesné kopie 38–9
 počet různých možných uspořádání částic 37
 sešívání multivesmír 33–4, 36–9, 63, 70
 redukcionistický pohled na částice 37–9
 vzdálenost k nejbližší kopii 38
 orbifoldové singularity 94
 Ossaová, Xenia de la 315 p. 17
 Ovrut, Burt 116
 paralaxa 126–7
 paralelní vesmíry:
 antropický princip 141–3, 144–6, 167–71, 294
 duše vědy 156–7, 298–300
 fyzikální poznatky vedoucí k nim 14–16
 jejich různé názvy 11
 jejich zpochybnění standardní vědy 298–300
 matematika podstatná pro ně 300–2
 nedůležitost člověka ve vesmíru 16, 291–2
 populární kultura 13
 problém nedosažitelnosti 159–62
 problém ověřitelnosti 156–7, 162–78, 293–8; viz též předpovědi v multivesmíru
 různorodost hodnot konstant 143–6, 318–9 p. 14
 shrnutí různých verzí 290
 srovnávání konečného počtu vesmírů 172–4
 statistický přístup k rozdělení fyzikálních vlastností v něm 168–71
 umělá výroba nových vesmírů 258–64
 určování demografických dat v nich 294
 variace od vesmíru k vesmíru 163–6, 293
 změna povahy otázek ve vědě 156–7
 viz též jeho specifické verze
 Parkesová, Linda 315 p. 17
 parní stroj 229–30
 Peebles, Jim 43, 61
 pekuliární rychlost 307 p. 2
 Penrose, Roger 334 p. 12
 Penzias, Arno 43, 61
 Perlmutter, Saul 124
 perturbativní (poruchový) přístup 104–6, 105, 109, 254
 proměna jedné teorie strun na jinou 106–8
 velikost strunové vazbové konstanty 105–9
Physics Today 180
 Pi, So-Young 60 p.
 Planck (sonda) 93
 Planckova délka 77, 77–8, 79, 312 p. 6
 ignorování oscilací kratší než ona 136
 jako jednotka pro měření povrchu 240, 239–41
 pamětová kapacita černé díry 240, 239–41, 247
 Planckova hmotnost 77, 312 p. 6
 Planckova konstanta 305 p. 13
 planety:
 jejich přitahování částic 61–2
 kondenzace energie inflatonu do hrubého materiálu v nich 55, 58

- pohyb 19–21
vzdálenost od Slunce 140–2
- Platonova jeskyně 225, 253
- Plesser, Ronen 315 p. 17
- počáteční podmínky 298–300
- počítače 330 p. 6, 11
jejich aproximace matematiky 274–5,
283
- kvantové 270
- nevyčíslitelné funkce 284, 286
- síla mozku 264–6
- simulace biologického mozku 264–9,
297
- simulace vesmírů 15, 269–76
- vyčíslitelné funkce 283–4, 286
- pohyb, Newtonovy zákony 50, 140, 159,
188–9, 289
- Poincarého dodekahedrání prostor 28
- pole 306 p. 15, 311 p. 4
- energie 52–3
- inflatonová *viz* inflatonová pole
- homogenní záporný tlak 52–5
- klasická (elektrická a magnetická)
50–1, 63–4, 80–1, 159
- kvantová mechanika *viz* kvantová
teorie pole
- kvantová neurčitost 75–6
- kvantové tunelování 150, 150–1
- potenciální energie 54, 53–5
- změna jejich hodnoty 53
- Polchinski, Joe 106, 116, 120, 146, 316 p.
5
- Poljakov, Alexandr 252
- Pope, Chris 316 p. 5
- potenciální energie 53–4
- inflatonových polí 53–5, 54, 55–6, 62,
148, 309 p. 5
- pozitrony 278
- pravděpodobnostní předpovědi 12–3, 14,
159–62, 167, 181–2, 185–97, 187–90
- problém míry 174–76
- v přístupu s mnoha světy 215–20
- pravděpodobnostní vlny 185–7, 187, 218
p., 274, 319 p. 2, 323–4 p. 3–5, 324 p. 7
- dekoherence 211, 223
- dvouštěřbinový experiment 185–8, 187,
193–4, 210–2
- druhá mocnina velikosti 323 p. 3
- jednočásticové ilustrace 194, 194–9,
196–7, 201–2
- kodaňská interpretace (kolaps vlny)
188–92, 190, 196–7, 210, 212–5
- mnohočásticové ilustrace 201–10, 202,
204–9
- linearita 192–7, 192, 196, 197
- pro makro- a mikroskopické objekty
188–90, 189, 210–2
- přístup s mnoha světy 197–9, 199,
200–12, 215–20
- Schrödingerova rovnice 190–210,
192, 204, 223, 301, 323 p. 3; *viz též*
Schrödingerova rovnice
- se dvěma či více špičkami 195–7, 196,
197, 197–9, 199, 203–10, 208, 2091
- s jednou špičkou 194, 194–5, 196, 201–
–3, 202, 204–7, 324 p. 5
- s různými velikostmi špiček, 219,
219–21, 220–1
- vlnové funkce 218 p.
- vlnově-částicový dualismus 326–7 p. 11
- princip neurčitosti 35–6
- princip průměrnosti 171
- Principia* (Newton) 19
- problém horizontu 47–8, 58, 307–8 p. 3
- problém míry 174, 280
- věčná inflace 174–6
- problém ověřitelnosti 156–8, 162–77,
294–7
- viz též* předpovědi v multivesmíru
- prostor:
- diskrétní versus spojité 286–7
- dodatečné rozměry *viz* dodatečné
rozměry prostoru
- Einsteinova víra ve věčný statický
vesmír 18–19, 20–6
- energie v něm homogenně rozptýlená
(skrytá energie) 29–30
- jako médium pro gravitaci 19–21
- jako tříbrána 110
- jeho nepřetržitá změna 20–1
- jeho křivost 19–21, 26–8; *viz též*
časoprostorové zakřivení
- nekonečně rozsáhlý 13–4, 17–8, 25–6,
30–40; *viz též* nekonečný prostor
- neomezená rychlost jeho rozpínání 47
- obrovský, ale konečný 17
- prázdný a jeho obsah 19
- rozpínání podle Fridmanovy
a Lemaîtreovy představy 18, 25–6, 28
- rozdíl mezi konečným a nekonečným
26–8, 30–1, 68–71, 69, 70, 295
- reliktní záření v něm 41–7
- různé tvary povolené kosmologickým
principem 26–8
- velmi rychlé rozpínání na počátku
13–4, 41, 47–8; *viz též* inflační
kosmologie
- viz též* vesmír
- protony 64, 292, 311 p. 2
- jejich usazení do středů atomů 42–3

- první termodynamický zákon 232
 prvotní atom; Lemaîtreův pojem 18, 25–6, 40
 prvotní plazma 42–3
 Pruská akademie věd 224
 předpovědi, fyzika je prý jen o nich 223–4
 předpovědi v multivesmíru 156–9, 163–78
 antropické uvažování 167–71
 dělení nekonečen 171–6
 korelace mezi vesmíry 293–4
 obtížnost zjištění detailů 166–7
 omezení času 295
 nemožnost ověřování 295
 standard přesnosti 176–8
 variace od jednoho vesmíru k druhému 163–6, 293
 přesnost, její standard 176–8
- radioaktivní rozpad 73
 rádiové vlny, trajektorie 21
 realisté 160 p.
 realita:
 jediná a určitá v rozporu s pravděpodobnostními předpověďmi kvantové mechaniky 11–3
 matematika jako kvantitativní jazyk pro její popis 280–1
 v simulovaném multivesmíru 287–8
- Rees, Martin 156, 169–70
 reheating (opětovný ohřev) 309 p. 6
 RHIC urychlovač (Relativistic Heavy Ion Collider), Brookhaven, New York 254–5, 297
- reliktní záření 37–42, 296–7, 300
 Gamowova práce 41–43
 homogenita 44–7, 55, 60
 inflační rozpínání 59–61, 61
 jako pozůstatek stvoření 41–44, 306 p. 1
 jeho detekce 43–44
 otisky gravitačních vln v něm 119
 problém horizontu 47–8
 problém míry 174–5
 pozorovaná variace teplot 60–62, 61, 62, 174–5, 310 p. 11
 srážky vesmírů 158
 teorie strun 91, 93
- renormalizace 312 p. 5
Review of Modern Physics 180
 Riemann, Bernhard 96
 Rimini, Alberto 326 p. 11
 roboti 269
- Roll, Peter 44
 rozměry prostoru *viz* dodatečné rozměry prostoru
 rozpínání prostoru 319–20 p. 3
 kosmické zrychlování 133–45, 160
 měření vzdálenosti k nebeským tělesům 127–29, 129, 317 p. 5
 jeho tempo 31, 124–33
 rudý posuv 131–3, 317 p. 5
 škálový koeficient 128, 131, 132, 133
 pohyb světla 32–3
viz též inflační rozpínání
- Rubakov, Valerij A. 303 p. 1
 rudý posuv 131–2, 317 p. 5, 331 p. 14
 rychlost světla:
 Einsteinova speciální relativita 33, 301
 jako rychlostní limit 33, 47
 překonaná pohybem vesmírných bublin od sebe 63
 Maxwellův výpočet 300–1
 plynutí času 66–7
- Sakaji, Nobujuki 263
 Salam, Abdus 74, 311 p. 2
 Saunders, Simon 222
- scénář bránových světů 13, 111–9, 112, 155
 cyklický multivesmír 116–7, 119
 detaily prostředí 111
 drobné černé díry 115
 experimentální hledání 115
 neviditelnost ostatních brán 113–4
 skrytá energie 316 p. 8
 uzavřené a otevřené struny 113–5, 114, 249–50
 vliv na gravitaci 113–5, 280
- sešívání multivesmír 15, 39–40, 115, 162, 172, 310 p. 14
 analogie s dekou 33–4, 33, 37–9
 konečné možnosti 34–6
 konečný versus nekonečný prostor 26–8, 30–1, 40, 68, 70–1, 296
 opakování v něm 33–4, 36–9, 62, 71
 počáteční podmínky v něm 298–300
 shrnutí 290
 ve vztahu k inflačnímu multivesmíru 61, 66, 68, 70–1
- selekční zkreslení 139–43
viz též antropické uvažování
- Sen, Ashoke 107, 316 p. 5
 Shapiro, Paul 168–9
 Shapley, Harlow 304 p. 8
 Shenker, Steve 332 p. 18
 Scherk, Joël 80

- Schmidhuber, Jürgen 285, 333 p. 11, 333 p. 12
- Schmidt, Brian 124
- Schrödinger, Erwin 159, 179, 181
- Schrödingerova rovnice 189–96, 192, 223, 323 p. 3, 326–7 p. 11
- Everettova domněnka 192, 197–9, 199, 201, 210–2
- experimentální potvrzení 191
- linearita 192–7, 192, 194, 197, 202–3
- matematická složitost 201
- matematický a fyzikální příběh 192–210, 202, 204–9
- platnost během měření 188–92, 193–7
- pro makro- versus mikroskopické objekty 191, 301
- přístup s mnoha světy 197–210, 199, 213–5, 301–2
- v rozporu s kodaňskou interpretací 190–2, 196–7, 210, 213, 214–5
- Schwarz, John 80, 107, 110 p., 316 p. 5
- Schwarzschild, Karl 96, 226–7, 232–3, 301, 329 p. 1
- Sigurdson, Kris 158
- silná jaderná pole 51, 76–7
- silná jaderná síla 73, 76, 105
- simulované vesmíry 15, 269–76, 332–3 p. 6, 11
- emergentní strategie 273–4
- chyby vzniklé z nutných aproximací na počítači 274–5, 283
- vědomí o životě v nich 271–2, 275–6, 287–8
- ultraredukcionistická strategie 274
- výpočetní náročnost 269–70
- simulovaný multivesmír 270, 275, 283–5, 295, 299
- kořeny reality 287–8
- shrnutí 290
- singularity 94–6, 101
- sítnice, počítačová simulace její 266
- Sitter, Willem de 124, 304 p. 7
- skrytá energie 30, 124, 280
- množství 30, 123, 133–4
- scénář bránových světů 316 p. 8
- terminologie 123 p.
- viz též* kosmologická konstanta
- skrytá informace 237–44
- černých děr 239–44
- entropie jako její míra 239–40, 256
- měření 238
- skrytá na povrchu 240–4, 245–6
- slabá jaderná pole 51, 76–7
- slabá jaderná síla 73, 76, 105, 311 p. 2
- Slipher, Vesto 131, 304 p. 8
- slovník, hranice versus vnitřek 252–4, 257
- Slunce 73, 87, 150, 227, 392
- fungování gravitace 16–21
- objev nového prvku v něm 130–1
- vzdálenost od planet 140–2
- Smoot, George 61
- smyčková kvantová gravitace 234
- smyčky, typ strun 113, 114, 158, 249–51
- smyková viskozita 255
- solvayská konference o fyzice (1927) 18, 25
- Son, Dam 255
- speciální teorie relativity 32, 47, 66, 80, 300
- problém nedosažitelnosti 159–60
- vztah k teorii strun 80–1, 81
- spektrální čáry 124
- spin, v kvantové mechanice 312 p. 7, 328–9 p. 12
- srovnání nekonečen 172–4
- stacionární stav (teorie stacionárního stavu) 118
- standardní model 63–4, 79
- standardní svíčky, supernovy jako příklad 126–7
- Starinec, Andrej 255
- Starobinskij, Alexej 60 p.
- statistická mechanika 229
- statistika:
- kvantověmechanické
 - pravděpodobnostní předpovědi 13–4, 159–62, 167, 174–6
 - předpovědi v multivesmíru 163–6
 - rozdělení fyzikálních vlastností v multivesmíru 167–71
- Steinhardt, Paul 47, 53, 60 p., 116, 119, 156, 309 p. 7, 322 p. 12
- Stelle, Kellog 316 p. 5
- Struktura vesmíru* (Greene) 72
- strunová vazbová konstanta 105–10
- strunová krajina 14, 148–9, 149, 295, 319 p. 16
- dodatečné rozměry prostoru 148, 149, 151–3, 152, 153, 299, 319 p. 16
 - kosmologická konstanta 148, 149, 151–3
 - kvantové tunelování v ní 149–53, 152, 153
- Strominger, Andrew 95, 316 p. 5, 330 p. 8
- strukturální realismus (filozofický směr) 280
- strunová geometrie 96–8
- stvoření, vznik vesmíru:
- analýza času nula 31

- cyklické kosmologie 117–8
 Einsteinova obecná relativita 18–9
 Gamowův a Alpherův výklad 41–4
 Lemaîtreova teorie 18–9
 reliktní záření jako pozůstatek 41–4
 umělé nové vesmíry 15, 258–64
viz též velký třesk (teorie)
- supergravitace 311 p. 3
 Supernovový kosmologický projekt 124, 127, 132, 144
- supernovy:
 jako standardní svíčky 126–7
 kosmologická konstanta 133–5
 rudý posuv 131–2, 317 p. 5
 výpočet vzdálenost k nim 317–8 p. 7
 výpočet vzdáleností k nim
 v rozpínajícím se prostoru 128–9, 129, 317 p. 6
- supersymetrická kvantová teorie pole 311 p. 3
 supersymetrie 91–2, 94, 138, 311 p. 3
 Susskind, Leonard 147, 156, 226, 242–8, 246–1, 332 p. 18
- světlo:
 elektromagnetismus 73
 jeho barvy či vlnové délky 130–3
 kosmické horizonty 32, 33, 38, 305 p. 12, 306 p. 16
 rudý posuv 130–3, 317 p. 5, 331 p. 14
 zakřivení časoprostoru 21
 v nekonečném vesmíru 32–3
 ve scénářích bránových světů 113
 viditelné jako elektromagnetická vlna 51, 73, 300
 vyslané hvězdami a galaxiemi 30
- symetrie a vztah k důvodům vyrušení členů 137–8
 Szegin, Ergin 316 p. 5
- Šapošnikov, Michail J. 303 p. 1
 škálový koeficient 128, 131, 132, 133
- Tegmark, Max 169–70, 282, 286 p.
 teorém o neúplnosti 286
 teorémy o plešatosti černé díry 233, 239
- teorie strun, strunová (čili teorie superstrun) 14, 72, 78–101, 234, 258, 296, 311 p. 3
 dodatečné rozměry v ní 82–3, 85, 88–94, 109, 111, 115, 120–2, 146–7; *viz též* dodatečné rozměry prostoru
 duality v ní 106–8, 242–4, 250–3, 252
 entropie černé díry 95, 101
 experimentální data a pozorování 90–4, 95, 98, 100, 114–5, 314 p. 14
- fundamentální stavební kameny v ní 78, 78–82
 gravitace 80, 250
 gravitační vlny 93–5, 110
 holografický princip 14, 247–57
 jako krok ve vývoji fyziky 81, 81, 98, 257
 jednotná teorie pole 13, 72, 73–5, 80, 85, 87, 199, 316 p. 8
 nedostatek ověřitelných předpovědí 74, 98–9, 103–6, 109, 254, 256
 její příspěvky matematice 96–8, 101
 nedávné matematické úspěchy 103, 106
 paralelní vesmíry z ní zrozené 74, 103, 110–8, 162; *viz též* scénář bránových světů
 pět různých verzí 106–8, 242, 315 p. 3
 příbližné metody 74, 98–9, 103–6, 109, 254, 256
 reliktní záření 93, 94
 singularity 94–6, 101
 spojení s inflační kosmologií 147–55; *viz též* krajinný multivesmír
 strunové vibrační módy 78, 80, 88
 supersymetrie 91–2, 94
 ve vztahu ke kvantové teorii pole 81, 81, 89–91, 250–7, 252
 velké množství různých vesmírů podle ní 143–7
 velikost strun v prostoru 78, 78, 89, 110, 316 p. 8
 vlastnosti částic 87–94, 100, 314 p. 13
 vysvětlení, proč nestrunové objekty nefungují 108–9, 315–6 p. 4
 základy 78, 78–9
 zpráva o jejím stavu 198–101
- teorie superstrun *viz* teorie strun
- teplota:
 černých děr 233, 235–6, 246
 entropie 233
- termodynamika 229–34
 černé díry 228, 231–4, 329 p. 3
 její první zákon 232
 pojem entropie v ní 229
 parní stroj 229–30
viz též druhý termodynamický zákon
- 't Hooft, Gerard 226, 247
 Thorne, Kip 225
- tlak:
 jako faktor pro gravitaci 48, 308–9 p. 4
 nulový 262
 záporný (napětí) 49–55; *viz též* záporný tlak
- toky 120–2, 121, 122, 146, 149, 316 p. 9
 trajektorie kosmických lodí 19

- tříbrány 109–113, 112, 116
 Maldacenaova revoluce 248–53, 249
 3D systémy (film a hry) 125
 Tolman, Richard 117, 119
 topos (teorie geometrických kategorií) 234
 torus, dvourozměrný 27, 309 p. 9
 Townsend, Paul 106, 316 p. 5
 Trivedi, Sandip 147
 Turing, Alan 286
 Turner, Kenneth 44
 Turner, Michael 60 p.
 Turok, Neil 116
 twistory 234
 typičnost 170–1, 321 p. 9
- umělé vesmíry 15, 258–264
 unitarita 314 p. 14
 univerzální gravitační zákon 18–21
 úsečky 113–5, 114, 249–50
 Unruh, William 330 p. 10
 uran (prvek) 176
- Vafa, Cumrun 94–5, 315 p. 17, 330 p. 8
 Vaidman, Lev 326 p. 10
 vazbová konstanta 105–6
 Maldacenuv argument 255–6
 přechod jedné teorie strun do jiné 106–8
 strunová 105–10
 věčná inflace 55–8, 59, 62, 162, 172, 309 p. 7
 problém míry 174–6
 strunová krajina 147, 151–3
 věčnost a cyklické kosmologie 117–8
 věda:
 její duše a multivesmírné teorie 14, 156–7, 298–300
 pokládání správných otázek v ní 157
 primární účel 157
 problém nedosažitelnosti 157–62
 problém ověřitelnosti 162–78, 293–8;
viz též předpovědi v multivesmíru
 standard přesnosti v ní 176–8
 třífázový proces v ní 298
- velké plesknutí 116
 velký krach 125
 velký třesk (teorie) 304 p. 8
 cyklické kosmologie 117
 inflační kosmologie 40–1, 47–71
 jednotná teorie 76–8
 konečnost versus nekonečnost 26
 kvarko-gluonové plazma 254–5
 Lemaítrova teorie 18, 26
 magnetické monopóly vzniklé po něm 322 p. 11
 problém horizontu 47–48, 58, 307 p. 3
 reliktní záření jako jeho pozůstatek 41–44, 306 p. 1
 singularity v něm 94–5
 srážka dvou brán 116
 umělá tvorba nových vesmírů 259–60
 vlna nesmírně rychlého rozpínání 40, 47–8, 49–50, 53–5
- vesmír:
 aplikace obecné relativity na něj 21–4
 homogenita; *viz* homogenita vesmíru
 hmotnost 259, 329 p. 1
 koperníkovský vývoj 291–2
 možné tvary, slučitelné
 s kosmologickým principem 26–8
 průměrná hustota hmoty v něm 28–30
 tempo rozpínání 31
 určování jeho tvaru 28–30
 věčný a statický, podle Einsteina 18, 20–6, 49–50, 124, 303 p. 1, 304 p. 6, 7
 věk 31, 67–8
viz též prostor
 „vesmíry“, význam slova 10
 vesmírná kapsa *viz* vesmírné bubliny
 vesmírné bubliny (vesmírné kapsy) 58–9, 59, 62–71, 66, 163–4, 310 p. 10, 310 p. 14
 kvantové tunelování 151–3, 152, 153, 295
 jejich srážky 158, 296, 319 p. 1
 měření času v nich 67–8
 ostré hranice 63
 prostor v nich 68–71
 rozdíly prostředí 62–6, 66, 299
 umělá výroba 261–2, 263
 v krajinném multivesmíru 147, 151–3, 152, 153, 155, 164, 170, 295
 záporná křivost 320 p. 4
viz též inflační multivesmír
- vibrační mody strun 78, 79
 dodatečné rozměry 88–90
 Vilenkin, Alexandr 55, 59, 158, 168, 171, 306 p. 17, 309 p. 7, 310 p. 13
 vlnová funkce 218 p.
 vodík 65, 143, 150
 vodíkové maserové hodiny 21
 volný pád 241–2, 259–60, 330 p. 9–10, 332 p. 2
 vyčíslitelné funkce 283–4, 285, 333 p. 12
- Wallace, Alfred Russel 139
 Wallace, David 222
 Warner, Nicholas 315 p. 17
 Weber, Tullio 326 p. 11

- Weinberg, Steven 74, 139, 143–4, 147,
153, 168–70, 300, 313 p. 2, 320–1 p. 8
- Wheeler, John 179, 210, 225–6, 231, 256,
270, 322 p. 2
- Wilkinson, David 43
- Wilson, Robert 43–4, 61
- Witten, Edward 94, 106, 107–10, 252,
253, 315 p. 3, 331–2 p. 17
- Yau, Shing-Tung 88
- Yoneya, Tamiaki 80
- zakřivení prostoru 320 p. 4
 hustota hmoty a energie 24–5, 28–30
 možné modely 26–8
 znaménko 26–7
- Zanstra, Herman 118–9
- záporný tlak (napětí) 49–55
 Einsteinova kosmologická konstanta
 49–50, 53
 homogenních polí 52–3
 jako hnací síla inflačního rozpínání
 49–50, 54–5
 jako zdroj odpudivé gravitace 49–50,
 52–3
- zdánlivá jasnost, absolutní jasnost,
 rozdíl 126, 128–9, 129, 131
- Zelmanov, Abraham 139
- Země 291–2
 cyklické kosmologie 117–8
 fungování gravitace 19, 20 p., 21, 102
 orbitální vzdálenost od Slunce 140–1
 život na ní *viz* život, jak ho známe
- zrcadlitá symetrie a páry 315 p. 17
- Zuse, Konrad 271, 285
- život, jak ho známe 89, 140–1, 318 p. 13
 antropické uvažování 139–43, 167–71,
 277, 294
 formování galaxií 143, 168–71
 chybějící znalosti o jeho vzniku 144,
 170–1
 konkrétní hodnoty konstant 145–6
 princip průměrnosti 170–1

Obsah

Předmluva 7

Kapitola první

Hranice reality / O PARALELNÍCH SVĚTECH 10

Kapitola druhá

Bezdný sklad dvojníků / SEŠÍVANÝ MULTIVESMÍR 17

Kapitola třetí

Věčnost a nekonečno / INFLAČNÍ MULTIVESMÍR 41

Kapitola čtvrtá

Sjednocování přírodních zákonů / NA CESTĚ KE STRUNOVÉ TEORII 72

Kapitola pátá

Vesmíry vznášející se v nedalekých dimenzích

/ BRÁNY A CYKICKÉ MULTIVESMÍRY 102

Kapitola šestá

Nový pohled na jednu starou konstantu / MULTIVESMÍR A KRAJINA 123

Kapitola sedmá

Věda a multivesmír / O ÚSUDKU, VYSVĚTLENÍ A PŘEDPOVĚDÍCH 156

Kapitola osmá

Mnoho světů kvantového měření / KVANTOVÝ MULTIVESMÍR 179

Kapitola devátá

Černé díry a hologramy / HOLOGRAFICKÝ MULTIVESMÍR 225

Kapitola desátá

Vesmíry, počítače a matematická realita

/ SIMULOVANÉ A DEFINITIVNÍ MULTIVESMÍRY 258

Kapitola jedenáctá

Hranice bádání / MULTIVESMÍRY A BUDOUCNOST 289

Poznámky 303

Literatura a náměty k dalšímu čtení 335

Rejstřík 338

BRIAN GREENE

SKRYTÁ
REALITA

PARALELNÍ VESMÍRY
A HLUBOKÉ ZÁKONY KOSMU

Z anglického originálu The Hidden Reality:
Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos
vydaného nakladatelstvím Alfred A. Knopf v New Yorku roku 2011
přeložil Luboš Motl

Překlad přehlédl dr. Martin Schnabl

Vydalo Nakladatelství Paseka s. r. o.

v Praze a Litomyšli roku 2012

jako svou 1263. publikaci

Typografie a sazba z písem Baskerville Ten Pro
a John Sans (Storm Type Foundry) Viktor Bezdíček

Obálka a titulní list s použitím písma Technomat

(Storm Type Foundry) Luboš Drtina

Odpovědná redaktorka Věra Amelová

Technická redakce Luboš Drtina

Vytiskla tiskárna FINIDR, s. r. o.,

Lipová 1965, Český Těšín

360 stran. Vydání první

ISBN 978-80-7432-205-1

Knihy Nakladatelství Paseka

žádejte u svých knihkupců nebo na adrese:

Nakladatelství Paseka, obchodní oddělení

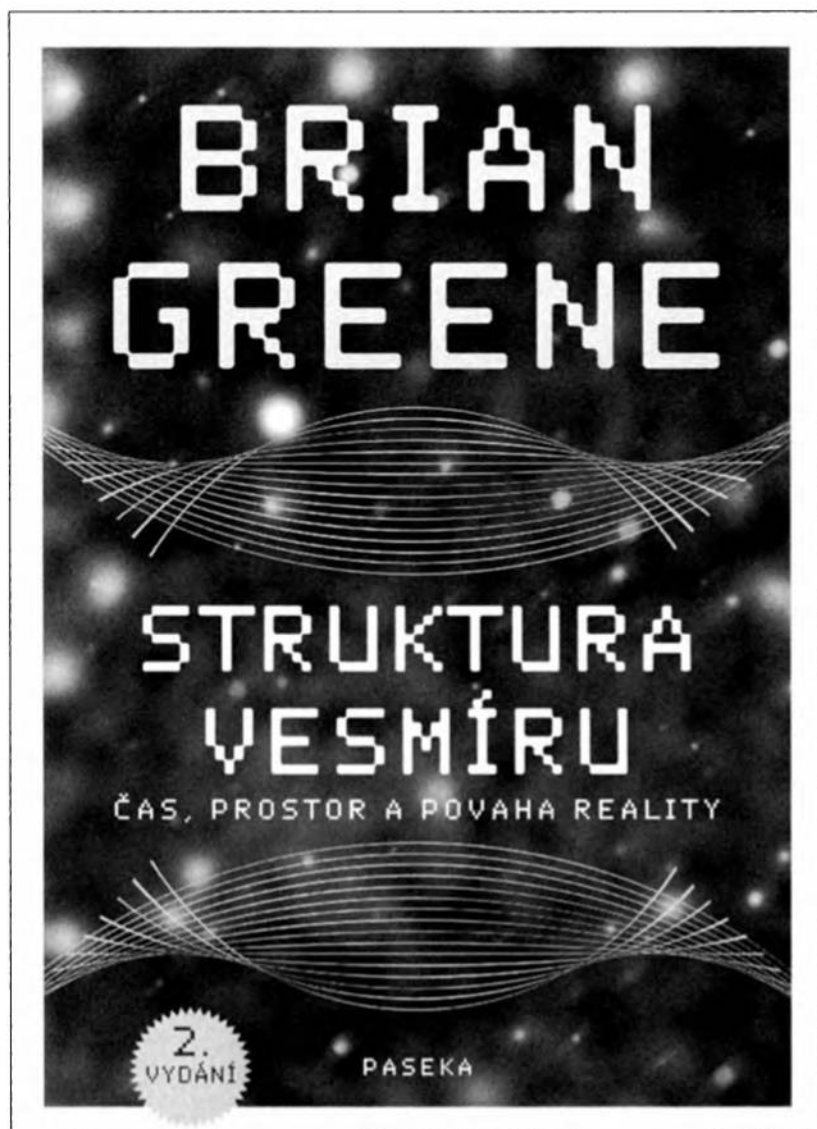
Chopinova 4, 120 00 Praha 2

tel.: 222 710 750-1

e-mail: paseka@paseka.cz

Aktuální informace o knihách Nakladatelství Paseka
najdete na internetové stránce www.paseka.cz

Právě vychází



*V celém světě dnes patrně nikdo nesrozumitelnou vědu lépe nevysvětlí...
Greene má dar nalézt vždy tu správnou metaforu.*

– The Washington Post

Brian Greene (*1963) získal vysokoškolský titul na Harvardově univerzitě a doktorát na Oxfordské univerzitě, kde pobíral Rhodesovo stipendium, udělované třiceti nejlepším studentům. V roce 1990 se připojil k fakultnímu sboru fyziků na Cornellově univerzitě a plnou profesuru získal v roce 1995. Od roku 1996 působí na Columbijské univerzitě jako profesor fyziky a matematiky. Přednášel pro širokou obec posluchačů i pro odborníky ve více než pětatřiceti zemích a je oceňován za řadu revolučních objevů v teorii superstrun. Jeho dvě předchozí knihy – *Elegantní vesmír* (česky 2001) a *Struktura vesmíru* (česky Paseka 2006, 2012) – se staly bestsellery i u nás.



Někteří zástupci našeho druhu zkonstruovali nástroje, jimiž prodloužili dosah svých smyslů; další se cvičili v systematické metodě, s níž lze zaznamenat a vyjádřit jakékoli pravidelnosti – tedy v matematice. S těmito nástroji jsme začali nahlížet pod povrch každodenních dojmů.

Co jsme našli, nás přimělo změnit názory na vesmír. Prováděli jsme pokusy i pozorování, jimiž jsme ověřovali svá očekávání a které nás vedly ke stále hlubšímu porozumění světu, vyjadřovanému se stále větší matematickou precizností. Tak jsme už prokázali, že prostor a čas, hmota a energie mají v repertoáru způsoby chování, které se nepodobají ničemu, čeho byl kdokoli z nás kdy přímým svědkem. A právě teď nás pronikavé rozborů těchto a souvisejících objevů přivádějí k něčemu, co může otřást naším chápáním světa znovu a od základů: k možnosti, že náš vesmír není jediným vesmírem.

„Mnoho vynikajících fyziků... dokáže svou látku zpřístupnit svým čtenářům, ale troufnu si tvrdit, že žádný z nich to neumí s takovým vtipem a smyslem pro každodenní realie, včetně těch televizních, jako Greene. Skrytě a nenápadně je čtenář obohacen o pojmy, jež k němu přicházejí jako vlídné vyprávění o tom, co nás nejvíce obklopuje a co nás nejhloběji proniká – o vesmíru.“

— Michal Janata, A2

„Greene je nadaný a vlídný vykladač... Jeho nadšení pro vědu na prahu zásadních objevů je nadmíru nakažlivé.“

— The New York Times

„Vysvléká záhadu z obtížných pojmů, aniž by rozmělnoval vědu.“

— Newsday



9 788074 322051