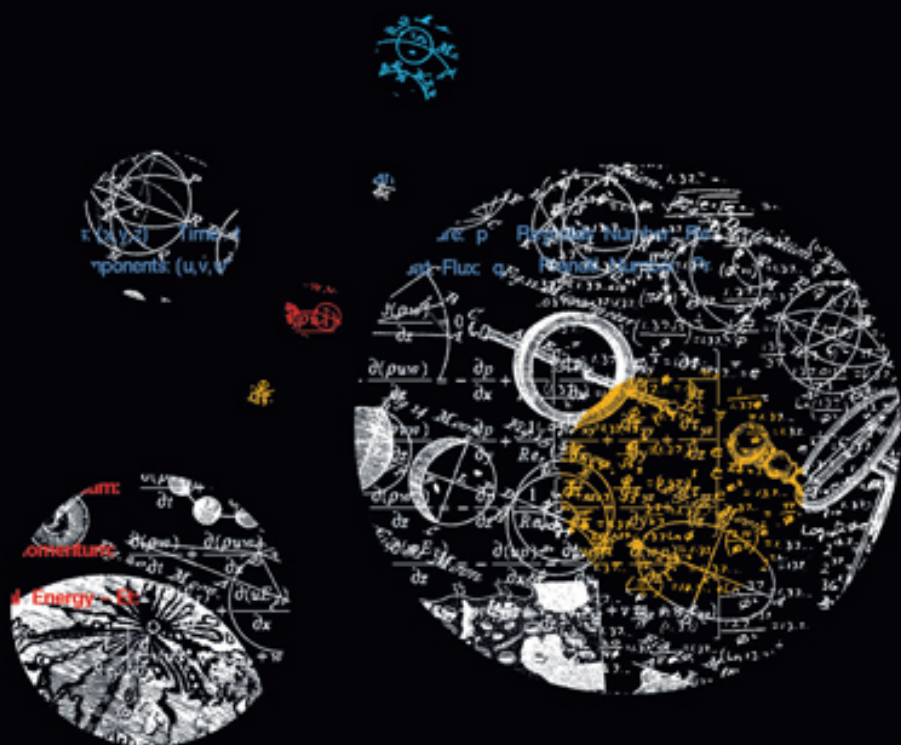


Max Tegmark

MATEMATICKÝ VESMÍR

Moje pátrání po nejhlubší
podstatě reality



argo/dokořán

ARGO / DOKOŘÁN

Max Tegmark

MATEMATICKÝ VESMÍR

**Moje pátrání po nejhlubší
podstatě reality**

ARGO / DOKOŘÁN

Max Tegmark

Matematický vesmír

Moje pátrání po nejhlubší podstatě reality

Copyright © 2013 by Max Tegmark. All rights reserved.

Translation © Jiří Podolský, 2016

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této publikace nesmí být rozmnožována a rozšiřována jakýmkoli způsobem bez předchozího písemného svolení nakladatele.

Druhé vydání (první elektronické) v českém jazyce.

Z anglického originálu *Our Mathematical Universe*.

My Quest for the Ultimate Nature of Reality, vydaného nakladatelstvím A. A. Knopf, přeložil Jiří Podolský.

Odpovědný redaktor Zdeněk Kárník.

Redakce Marie Černá.

Obálka Pavel Růt. Grafická úprava Vladimír Fára.

Sazba a konverze do elektronické verze Michal Puháč.

Vydalo v roce 2016 nakladatelství Dokořán, s. r. o., Holečkova 9, Praha 5, dokoran@dokoran.cz, www.dokoran.cz, jako svou 883. publikaci (257. elektronická).

ISBN 978-80-7363-823-8

Meie, která mne inspirovala k sepsání této knihy.

OBSAH

Kapitola 1. Co je realita?	9
Nikoli to, čím se zdá být	9
Jak zní otázka otázek?	12
Výprava začíná	15
ČÁST PRVNÍ POHLED ZDÁLKY	19
Kapitola 2. Naše místo v prostoru	20
Kosmické otázky	20
Jak velký je prostor?	21
Velikost Země	23
Vzdálenost k Měsíci	24
Vzdálenost ke Slunci a planetám	25
Vzdálenost ke hvězdám	26
Vzdálenost ke galaxiím	29
Co je prostor?	31
Kapitola 3. Naše místo v čase	35
Odkud se vzala naše sluneční soustava?	35
Odkud se vzaly galaxie?	40
Odkud se vzalo záhadné mikrovlnné záření?	48
Odkud se vzaly atomy?	59
Kapitola 4. Náš vesmír v číslech	64
Co potřebujeme: přesnou kosmologii	65
Přesné fluktuační reliktního záření	67
Přesné shlukování galaxií	74
Dokonalá mapa našeho vesmíru	80
Odkud se vzal náš velký třesk?	85

Kapitola 5. Náš kosmický počátek	88
Co je špatně na velkém třesku?	88
Jak funguje inflace	93
Dárek, který stále rozdává	98
Věčná inflace	102

Kapitola 6. Vítejte v multiverzu	110
Multiverzum úrovně I	110
Multiverzum úrovně II	121
Shrnutí multiverza v poločase	137

ČÁST DRUHÁ POHLED ZBLÍZKA 141

Kapitola 7. Kosmická lega	142
Atomová lega	143
Jaderná lega	144
Lega částicové fyziky	145
Matematická lega	147
Fotonová lega	150
Nad zákonem?	151
Kvanta a duhy	153
Vlnění	154
Kvantová podivnost	157
Podivnost nelze uvěznit	161
Kvantové zmatení	162

Kapitola 8. Multiverzum úrovně III	164
Multiverzum úrovně III	165
Iluze náhody	170
Kvantová cenzura	175
Jak radostné je nebýt první	179
Proč váš mozek není kvantový počítač	181
Subjekt, objekt a okolní prostředí	184
Kvantová sebevražda	189
Kvantová nesmrtelnost?	192
Jednota multiverz	194
Posun názorů: mnoho světů anebo mnoho slov?	199

ČÁST TŘETÍ POHLED S ODSTUPEM 205

Kapitola 9.	Vnitřní realita, vnější realita a realita konsenzu	206
	Vnější realita a vnitřní realita	207
	Celá pravda a nic než pravda	208
	Realita konsenzu	209
	Fyzika: spojení vnější reality s realitou konsenzu	212
Kapitola 10.	Fyzikální realita a matematická realita	214
	Matematika, všude je matematika!	217
	Hypotéza matematického vesmíru	223
	Co je matematická struktura?	229
Kapitola 11.	Je čas pouhou iluzí?	239
	Jak by mohla být fyzikální realita matematickou?	239
	Co jste?	246
	Kde jste? (A co vnímáte?)	255
	Kdy jste?	262
Kapitola 12.	Multiverzum úrovně IV	278
	Proč věřím v multiverzum úrovně IV	278
	Průzkum multiverza úrovně IV - jaké je?	282
	Důsledky multiverza úrovně IV	293
	Žijeme v simulaci?	301
	Souvislosti mezi H _{MV} , multiverzem úrovně IV a jinými hypotézami	305
	Testování multiverza úrovně IV	306
Kapitola 13.	Život, náš vesmír a vůbec	311
	Jak velká je naše fyzikální realita?	312
	Budoucnost fyziky	317
	Budoucnost našeho vesmíru - jak skončí?	318
	Budoucnost života	322
	Vaše budoucnost - jste bezvýznamný?	340
	Poděkování	347
	Doporučená četba	348
	Rejstřík	353

CO JE REALITA?

... stromy jsou tvořeny hlavně ze vzduchu. Když je spálíme, změní se zpět na plyny a v teple plamenů se uvolní sálající teplo Slunce, jež bylo spoutáno při přeměně vzduchu na strom. A ve zbylém popelu najdeme onu nepatrnou část, která nepochází ze vzduchu, ale z pevné půdy země.

Richard Feynman

*Jsou věci mezi nebesy a zemí,
o nichž se filozofům ani nesní.*

William Shakespeare, *Hamlet*, 1. jednání, scéna 5

NIKOLI TO, ČÍM SE ZDÁ BÝT

V příští vteřině jsem zemřel. Přestal jsem šlapat do pedálů a zmáčkl brzdy, ale bylo už příliš pozdě. Světlomety. Mřížka chladiče. Čtyřicet tun oceli, zběsile troubících jako novodobý drak. Spatřil jsem děs v očích řidiče kamionu. Čas prudce zpomalil svůj běh a před očima mi ve zkratce prolétl celý život. Poslední myšlenkou mého života bylo „Snad je to jenom noční můra“. Bohužel jsem však jasně cítil, že je to realita.

Jak jsem si ale mohl být tak jist, že se mi všechno nezdá? Co kdybych těsně před nárazem spatřil cosi, co je možné pouze ve světě snů, třeba svou už mrtvou učitelku Ingrid, jak živá a zdravá sedí za mnou na nosiči kola? Anebo se před pěti vteřinami mohlo odkudsi v levém horním rohu mého zorného pole objevit okénko počítačového programu s varovným nápisem „Fakt myslíš, že je dobrý nápad vyřítit se z tohoto podjezdu, aniž by ses kouknul doprava?“, hned nad dvěma klikacími tlačítky „Pokračuj“ a „Storno“? Kdybych zhlédl hodně filmů jako *Matrix* anebo *Třinácté patro*, třeba bych začal uvažovat o tom, že celý můj život je jenom počítačová simulace, a mnohé moje klíčové představy o podstatě reality by byly rázem zpochybněny. Nic takového se však nestalo a já umřel, jist si tím, že můj problém je skutečný. Koneckonců, co může být pevnější a reálnější než čtyřicetitonový kamion?

Ale ne všechno kolem je ve skutečnosti takové, jak se nám jeví na první pohled. A platí to dokonce i o kamionech a každodenní realitě. Myslí si to nejen někteří filozofové či autoři vědecko-fantastických románů, ale též experimentální fyzikové.

1. CO JE REALITA?

Fyzika už celé století dobře ví, že pevná ocel je z podstatné části jenom prázdný prostor, neboť atomová jádra tvořící 99,95 % veškeré hmotnosti jsou jen nepatrné „kuličky“ zabírající 0,000000000001 % objemu. Tohle skoro-vakuum působí pevně pouze proto, že elektrické síly, díky nimž jsou jádra od sebe oddělená, jsou opravdu mohutné. Podrobná zkoumání subatomárních částic navíc prokázala, že dokážou být na mnoha různých místech současně, což je slavná záhada stojící v samém srdci kvantové fyziky (prozkoumáme ji v sedmé kapitole). Ale i já sám jsem poskládán z takovýchto částic. Takže když ony mohou být současně na různých místech, tak proč ne já? Tři vteřiny před srážkou s kamionem jsem se opravdu podvědomě rozhodoval, jestli se kouknu jenom doleva, tak jako vždy, když jsem doma ve Švédsku jezdil na kole do Blackebergského gymnázia, anebo se pro jistotu tentokrát podívám i doprava, přestože odtud skoro nikdy nepřijížděla žádná auta. Toto moje osudové rozhodnutí onoho rána roku 1985 skončilo tím, že jsem se ocitl doslova jen nepatrný krůček od prahu jisté smrti. A o všem rozhodoval snad jen jediný atom sodíku. Na něm záviselo, jestli vstoupí do konkrétního synaptického spoje v mém čelním mozgovém laloku, čímž způsobí, že určitý neuron vyšle elektrický signál, jenž spustí celý řetězec aktivity spousty dalších neuronů mého mozku, které jako celek kódují „Neobtěžuj se“. Takže kdyby onen sodíkový atom byl na počátku ve dvou různých stavech najednou, pak o zlomek vteřiny později by moje zorničky mířily do dvou různých stran současně a dvě vteřiny nato by moje kolo bylo na dvou různých místech současně a záhy bych byl současně mrtvý i živý. Přední světoví experti na kvantovou fyziku se vášnivě přou, jestli se něco takového opravdu děje, jestli se náš svět neustále štěpí na paralelně existující vesmíry s odlišnými historiemi, anebo zdali je nutné určitým způsobem doplnit takzvanou Schrödingerovu rovnici, což je hlavní zákon kvantového vývoje. Takže co já? Opravdu jsem umřel? V tomhle světě jsem doslova o vlasek unikl smrti, ale v jiném, stejně reálném světě, kde tato kniha nikdy nemohla vzniknout, jsem zahynul? Jsem-li opravdu současně mrtvý i živý, jsme schopni zmodifikovat naše pojetí reality tak, aby všechno dávalo nějaký smysl?

Domníváte-li se, že tohle všechno je absurdní a že soudobá fyzika jenom zamlžuje jednoduché věci a zbytečně je komplikuje, pak vězte, že záležitost se zašmodrchá ještě více, uvážíme-li, jak bych ji vnímal já osobně. Nacházím-li se na dvou různých místech ve dvou paralelních vesmírech, pak v jedné své kopii přežiju. Aplikujeme-li stejné úvahy i na všechny ostatní možnosti, kdy a jak mohu v budoucnu zemřít, vypadá to, že vždy bude existovat alespoň jeden paralelní vesmír, ve kterém nikdy nezemřu. A protože moje vědomí existuje pouze tam, kde jsem přežil, znamená to, že subjektivně vnímáno budu nesmrtelný? Pokud ano, budete také vy subjektivně nesmrtelní a časem se stanete nejstarším člověkem na Zemi? Na tyto otázky odpovíme v osmé kapitole.

Překvapuje vás, že fyzika odhalila, že naše realita je mnohem podivnější, než jsme si dokázali představit? Nuže, nijak překvapivé to vlastně není, vezmeme-li vážně darwinovskou evoluci! Evoluce nás obdařila intuicí jenom pro ty aspekty fyziky, které

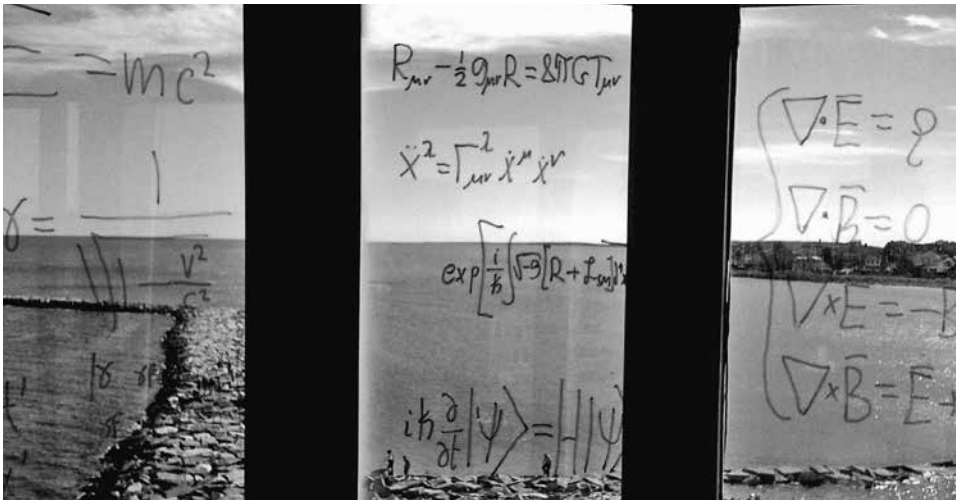
byly nezbytné pro přežití našich dávných předků, například pro parabolickou dráhu letících kamenů (což objasňuje zálibu mnohých lidí v baseballu). Jeskynní žena, jež by se příliš zahloubala do úvah o podstatě hmoty, by si nejspíš nevšimla tygra plížícího se jí za zády a její geny by tím byly nadobro vyřazeny ze seznamu. Darwinova teorie tak dává testovatelnou předpověď, totiž že kdykoli nám nějaká nová technika umožní nahlédnout o něco dále za hranice všední reality, dostane se naše evolucí získaná zkušenost do potíží. Tuto předpověď jsme otestovali už mnohokrát a výsledky Darwinovu teorii plně podporují. Einstein si uvědomil, že při velmi vysokých rychlostech se běh času zpomaluje, a starým mrzoutům ze švédského Nobelova výboru to přišlo natolik podivné, že mu odmítli udělit Nobelovu cenu za jeho teorii relativity. Při velmi nízkých teplotách může tekuté helium téct vzhůru. Při velmi vysokých teplotách mohou částice měnit svoji identitu: když se elektron srazí s pozitronem a vytvoří boson Z, přijde mi to asi tak intuitivní, jako kdyby se srazila dvě auta a vznikla z toho výletní loď. Na mikroskopických rozměrových škálách se částice vyskytují schizofrenicky na mnoha místech současně, což vede k zapeklité kvantové záhadě zmíněné výše. Na astronomických škálách – jaké to překvapení! – na nás číhají zase jiné podivnosti: pokud intuitivně rozumíte všem aspektům fyziky černých děr, pak patříte k nepatrné menšině lidstva. Měli byste okamžitě odložit tuto knihu, napsat svou vlastní a publikovat ji dříve, než vám někdo jiný vyfoukne nobelovku za kvantovou gravitaci. A když se vydáme do ještě větších rozměrů, čekají nás další podivnosti ohledně reality, která je neporovnatelně rozlehlejší, než jakou dokážeme spatřit našimi nejlepšími teleskopy. V páté kapitole uvidíme, že dnes nejoblíbenější teorie velmi raného vesmíru se jmenuje *kosmologická inflace*, a ta tvrdí, že prostor nejenže je opravdu, opravdu veliký, ale že je ve skutečnosti nekonečný a že obsahuje nekonečně mnoho přesných kopií vás samých a ještě mnohem více přibližných kopií, které žijí všechny možné varianty vašeho života, a to hned ve dvou různých typech paralelních světů. Jestliže je tato teorie správná, znamená to, že i kdyby ve výše uvedených kvantově-fyzikálních argumentech ohledně mé vlastní kopie, která už nikdy nedojela do školy, byla nějaká chyba, přesto by v paralelních slunečních soustavách existoval bezpočet jiných Maxů, kteří by žili stejný život jako já až do onoho osudného okamžiku, ale pak by se rozhodli podívat se doprava.

Jinými slovy: fyzikální objevy zpochybňují některé naše nejzákladnější představy o realitě, a to *jak směřem do mikrokosmu, tak směřem do makrokosmu*. Jak uvidíme v jedenácté kapitole, mnohé představy o realitě lze zpochybnit i na lidských rozměrových škálách, ponoříme-li se do neurovědy pátrající po fungování našich mozků.

V neposlední řadě pak také víme, že další klíčové okno do fungování přírody nám poskytují matematické rovnice, což metaforicky vystihuje obrázek 1.1. Jak je ale možné, že náš fyzikální (reálný) svět vykazuje tak mimořádnou matematickou pravidelnost, že i astronomický superhrdina Galileo Galilei o přírodě prohlásil, že je „knihou napsanou jazykem matematiky“, a že nositel Nobelovy ceny Eugene Wigner pokládal „nepochopitelnou efektivitu matematiky ve fyzikálních vědách“ za záhadu, jež si žádá vysvětlení? Odpovědět na tuto otázku je hlavním cílem této knihy, jak

1. CO JE REALITA?

naznačuje už její název. V desáté až dvanácté kapitole uvedeme pozoruhodné souvislosti mezi počítáním, matematikou, fyzikou a myšlením a prozkoumáme můj možná bláznivý názor, že náš fyzikální (reálný) svět je pomocí matematiky nejen *popsatelný*, ale že sám *je* matematikou, což z nás samých činí sebe-vědomé části gigantického matematického objektu. Uvidíme, že důsledkem této představy je nový a vrcholný soubor paralelních světů, natolik rozsáhlý a exotický, že všechny dosud zmíněné bizarnosti ve srovnání s touto zblednou a donutí nás vzdát se mnoha našich hluboce zakořeněných představ o realitě.



Obrázek 1.1: Pohlédneme-li na realitu skrze fyzikální rovnice, spatříme, že podávají její schematický obraz plný pravidelností a souměrností. Pro mne však je matematika něčím více než pouhým oknem do vnějšího světa: v této knize předložím argumenty, že náš fyzický svět je matematikou nejen *popsatelný*, ale že sám *je* matematikou. Přesněji řečeno: matematickou strukturou.

JAK ZNÍ OTÁZKA OTÁZEK?

Už od svých prvních kroků po Zemi si naši lidští předkové bezpochyby lámali hlavu nad realitou, hloubali nad závažnými otázkami existence. *Odkud se všechno vzalo? Jak skončí svět? Jak je velký?* Jsou to natolik fascinující otázky, že téměř všechny kultury v dějinách lidstva se s nimi potýkaly všude na zeměkouli. Svě odpovědi na ně pak předávaly z generace na generaci ve formě propracovaných mýtů o stvoření, legend a náboženských doktrín. Jak naznačuje schéma na obrázku 1.2, zmíněné otázky jsou příliš obtížné, takže ze všemožných odpovědí nevznikla žádná globální a jednotná idea. Než aby lidské kultury postupně konvergovaly k unikátnímu světovému názoru, jenž by mohl aspirovat na konečnou pravdu, rozličné odpovědi se naopak diametrálně liší. Přinejmenším část těchto odlišností padá na vrub specifických způsobů života různých společností. Například všechny mýty o stvoření světa ze starověkého

JAK ZNÍ OTÁZKA OTÁZEK?

Egypta, v němž půda za svou úrodnost vděčila řece Nil, vycházely z představy, že náš svět povstal z vody. V mém rodném Švédsku, kde o přežití rozhodoval oheň a led, severská mytologie naopak hlásala, že život se zrodil (jaké to překvapení!) z ohně a ledu.

Je náš vesmír nekonečně starý?	Bude náš vesmír existovat věčně?	Existují i jiné vesmíry?	Pokud něco stvořilo náš vesmír, co to bylo?
ANO: buddhismus hinduismus NE: Ahmadija Apačové Aztékové Babyloňané baháismus Egyptané Hopiové islám judaismus křesťanství Mayové rastafariáni Řekové Seveřané Sumerové zoroastrismus	ANO: buddhismus hinduismus Řekové Seveřané zoroastrismus NE: Ahmadija Apačové Aztékové Babyloňané baháismus Egyptané Hopiové islám judaismus křesťanství Mayové rastafariáni Sumerové	ANO: hinduismus NE: Ahmadija Apačové Aztékové Babyloňané baháismus buddhismus Egyptané Hopiové islám judaismus křesťanství Mayové rastafariáni Řekové Seveřané Sumerové zoroastrismus	

Obrázek 1.2: Řada kosmologických otázek, kterými se v této knize budeme zabývat, fascinovala myslitele už od pradávna, ale žádného obecného konsenzu se nepodařilo dosáhnout. Zde uvedená klasifikace vychází z prezentace, kterou v roce 2011 připravil student MIT David Hernandez pro můj kurz kosmologie. Protože klasifikace je zjednodušením skutečnosti, je nutno brát ji s velkou rezervou: spousta náboženství se větví na různé proudy a interpretace, některé by proto bylo možné zařadit i do více kategorií. Například hinduismus obsahuje aspekty všech tří zde uvedených možností stvoření: podle jedné z legend se bůh stvořitel Brahma (znázorněný zde) i náš vesmír vynořili z vejce, které povstalo z vody.

I další velké otázky, které si kladly dávné kultury, byly zásadní povahy. *Co je skutečnost? Existuje i jiná realita než ta, kterou vidíme očima? Ano!*, odpověděl před více než dvěma tisíciletími Platón. Ve své slavné analogii s jeskyní nás připodobnil k lidem, kteří žijí celý svůj život upoutani v jeskyni, hledí před sebe na prázdnou stěnu a tam vidí stíny věci pohybujících se za jejich zády. Nakonec dojdou k mylnému závěru, že stíny představují veškerou realitu. Platón tvrdil, že to, co my lidé pokládáme za každodenní realitu, je v obdobném smyslu jenom omezená a pokřivená reprezentace skutečnosti a že se musíme osvobodit z duševních okovů, abychom ji začali správně nazírat.

Jestli mě život, který jsem prožil coby fyzik, vůbec něčemu naučil, pak tomu, že Platón měl pravdu: moderní fyzika jasně ukázala, že konečná podstata reality je zcela jiná, než jak se nám na první pohled jeví. Pokud ale není realita taková, jak jsme se domnívali, tak jaká tedy je? Jaký je vztah mezi vnitřní realitou v naší mysli a realitou vnější? Z čeho je vše v posledku utvořeno? Jak to všechno funguje? A proč? Dává vše dohromady vůbec nějaký smysl, a pokud ano, tak jaký? Douglas Adams ve své vtipné sci-fi *Stopařův průvodce Galaxií* vznáší otázku: „Jaká je odpověď na základní otázku života, vesmíru a vůbec?“

Myslitelé napříč věky nám poskytli fascinující spektrum možných odpovědí na otázku „Co je realita?“. Buď se sami pokusili na ni nějak odpovědět, anebo se

1. CO JE REALITA?

Některé odpovědi na otázku „Co je realita?“	
Otázka má smysluplnou odpověď	Pohybující se elementární částice Země, voda, vzduch, oheň a kvintesence Pohybující se atomy Pohybující se struny Kvantová pole v zakřiveném prostoru M-teorie (dosadte si své oblíbené velké počáteční písmenko...) Výtvor Boží Sociální konstrukt Neurofyziologický konstrukt Sen Informace Simulace (à la <i>Matrix</i>) Matematická struktura Multiverzum úrovně IV
Otázka postrádá smysluplnou odpověď	Realita existuje, ale my lidé ji nemůžeme úplně poznat: nemáme přístup k tomu, co Immanuel Kant nazval „das Ding an sich“. Realita je ze své podstaty nepoznatelná. Nejenže ji neznáme, ale nedokázali bychom ji vyjádřit, ani kdybychom ji poznali. Věda je jenom jazyková hra (postmoderní odpověď Jacquese Derridy a dalších). Realita existuje pouze v našich hlavách (konstruktivistická odpověď). Realita neexistuje (solipsismus).

pokusili otázku zavrhnout. Zde je pár příkladů (seznam si pochopitelně nečiní nárok na úplnost a nadto se některé z alternativních odpovědí navzájem nevylučují).

Tato kniha (a dokonce i celá moje vědecká kariéra) je pokusem vypořádat se s uvedenou otázkou. Jedním z důvodů, proč různí myslitelé přišli s tak pestrou nabídkou odpovědí, je zjevně fakt, že se rozhodli interpretovat otázku každý svým vlastním způsobem. Takže vám dlužím vysvětlení, jak tuto otázku chápu já a jak k ní přistupuji. Slovo *realita* může mít celou řadu různých významů. Já osobně tím myslím nejhlubší podstatu vnějšího fyzikálního (reálného) světa, jehož jsme součástí. Fascinuje mě úsilí mu lépe porozumět. Jaký je tedy můj přístup?

Kdysi na střední škole jsem jednoho večera začal číst detektivku *Smrt na Nilu* od Agathy Christie. Přestože jsem si byl dobře vědom, že budík začne řinčet v sedm ráno, nedokázal jsem se od knihy odtrhnout, dokud se záhada vraždy nevyjasnila. Bylo to kolem čtvrté nad ránem. Už od dětství mě detektivní příběhy neodolatelně přitahovaly, a když mi bylo dvanáct, založili jsme se spolužáky Andreasem Bettem, Matthiasem Bothnerem a Olou Hanssonem detektivní klub. Žádného zločince jsme nikdy nechytili, ale touha řešit záhady jítřila mou představivost. Otázka „Co je realita?“ je pro mne ve své podstatě detektivním příběhem všech příběhů a osobně pokládám za obrovské štěstí, že mu mohu věnovat tolik času. V následujících kapitolách budu mít příležitost popsat i jiné situace, kdy mě moje zvědavost donutila

VÝPRAVA ZAČÍNÁ

ponocovat do časných ranních hodin, než se mi podařilo záhadu objasnit. Rozdíl byl jenom v tom, že na rozdíl od četby šlo o vlastní psaní. A byly to řetězce matematických vzorců, o nichž jsem věděl, že mě nakonec dovedou k hledané odpovědi.

Jsem fyzik a k záhadám reality proto přistupuji fyzikálně. To pro mne znamená začít zásadními otázkami „Jak velký je vesmír?“ a „Z čeho je všechno uděláno?“ a řešit je stejným způsobem jako detektivní záhady: kombinovat chytrá pozorování s rozumovými úvahami a vytrvale sledovat všechny stopy, ať už nás zavedou kamkoli.

VÝPRAVA ZAČÍNÁ

Fyzikální přístup? Cožpak to není spolehlivá metoda, jak z čehokoli vzrušujícího udělat nudnou záležitost? Když se mě spolucestující v letadle zeptá, jaké je moje povolání, mám dvě možnosti. Mám-li chuť si povídat, řeknu „astronomie“, což spolehlivě odstartuje zajímavý rozhovor.* Když ale na povídání náladu nemám, řeknu „fyzika“. V tom okamžiku souseď většinou odvěti cosi jako „Aha, to byl pro mne ten nejhorší předmět na škole“, a zbytek letu mě už nechá na pokoji.

Ano, i *pro mě* byla fyzika nejméně oblíbený předmět na střední škole. Dodnes si pamatuji první hodinu fyziky. Učitel nám monotónním a uspávajícím hlasem oznámil, že se budeme učit o hustotě. Že hustota je hmotnost dělená objemem. Takže když je hmotnost bla a hmotnost je bla, tak můžeme spočítat, že hustota je bla bla. Pak si pamatuji už jenom velkou mlhu. A to, že kdykoli se učiteli nepovedl nějaký pokus, sváděl to na vlhkost vzduchu a tvrdil, že „Dneska ráno to fungovalo“. A také že moji spolužáci nedokázali pochopit, proč jim pokus nefunguje, než si všimli, že jsem jim zlomyslně dal pod jejich osciloskop magnet...

Když jsem měl podat přihlášku na vysokou školu, nezvolil jsem proto fyziku ani žádný technický obor a vstoupil na Stockholmskou ekonomickou školu, kde jsem se zaměřil na otázky životního prostředí. Toužil jsem přispět svým skromným dílem k záchraně planety a zlepšení života na ní. Měl jsem pocit, že hlavní problém nespočívá v nedostatku technických řešení, ale v tom, že stávající technologie nevyužíváme dobře. Myslel jsem si, že nejlepší způsob, jak ovlivnit chování lidí, vede přes jejich peněženky. Zaujala mne myšlenka tvorby vhodných ekonomických stimulů, jež by individuální egoismus jedinců nasměrovaly k všeobecnému prospěchu. Brzy jsem ale prošel deziluzí a poznal, že ekonomie je z velké části jen formou intelektuální prostituce, v níž jsou aktéři odměňováni za to, že říkají, co chtějí slyšet mocní tohoto světa. Ať už chce politik udělat cokoli, vždycky se mu podaří najít ekonomického poradce, jenž bude argumentovat v kýženém duchu. Franklin D. Roosevelt chtěl zvýšit vládní výdaje, a tak naslouchal Johnu Maynardu Keynesovi, zatímco Ronald Reagan chtěl vládní výdaje snížit, a tak naslouchal Miltonu Friedmanovi.

Potom mi spolužák Johan Oldhoff věnoval knihu, která úplně změnila můj život: *To nemyslíte vážně, pane Feynmane!*. Richarda Feynmana jsem nikdy nepotkal,

* Konverzace obvykle začíná: „Aha, astrologie! Já jsem ve znamení Panny.“ Když místo toho dám přesnější odpověď „kosmologie“, dostane se mi reakce „Aha, kosmetologie!“ – a další dotazy se týkají očních linek a řasenek.

1. CO JE REALITA?

ale kvůli němu jsem se stal fyzikem. I když kniha vlastně není o fyzice a zabývá se spíše tím, jak otevírat zámky sejfů a jak balit ženské, čtením mezi řádky jsem pocítil, že tenhle chlapík prostě fyziku miluje. Což mě opravdu zaujalo. Když vidíte normálně vypadající chlápka, jak jde zavěšený do nádherné ženy, začnete uvažovat o tom, jestli vám něco podstatného neuniklo. Podle všeho v něm ona žena odhalila nějaké skryté kvality. Náhle jsem i já pocítil totéž ve vztahu k fyzice: co mi zcela uniklo na střední škole, ale Feynman to spatřil?

Tuhle záhadu jsem prostě musel objasnit, takže jsem si sedl s prvním svazkem *Feynmanových přednášek z fyziky*, který jsem objevil v tátově knihovně, a začal číst: „Kdyby se v nějakém kataklyzmatu měly zničit všechny vědecké poznatky a dalším generacím by mohla zůstat jenom jediná věta, jaké tvrzení by obsahovalo nejbohatší informaci sestavenou z nejmenšího počtu slov?“

Páni, tenhle chlápek byl *úplně jiný* než můj učitel fyziky ze střední školy! Feynman pokračoval: „Jsem přesvědčený, že je to ... fakt ..., že všechny věci se skládají z atomů - nepatrných částic, které se neustále pohybují, přitahují se navzájem, dostanou-li se blízko k sobě, ale naopak odpuzují, pokud je k sobě stlačíme příliš.“

V hlavě se mi okamžitě rozsvítilo. Četl jsem dál a dál a dál, zcela okouzlen. Měl jsem pocit doslova nábožného vytržení. Konečně jsem našel tu pravou věc! Zažil jsem zjevení, které objasnilo, co mi tak dlouho unikalo a co Feynman věděl: že fyzika je nejvyšším intelektuálním dobrodružstvím, velkou výpravou za pochopením nejhlubších tajemství vesmíru. Fyzika neznamenaá vzít něco fascinujícího a udělat z toho nudnou záležitost. Místo toho nám pomáhá vidět věci jasněji, světu kolem nás přidává na kráse a úžasnosti. Když v podzimním čase jedu na kole do práce, vidím nádheru stromů oděných do červena, oranžova a zlatova. Ale pohled na tyto stromy prizmatem fyziky v nich odhaluje ještě hlubší krásu, jak vystihuje Feynmanův citát v záhlaví této kapitoly. A čím hlouběji se na danou věc zadívám, tím elegantnější pohled se mi naskytne. Ve třetí kapitole uvidíme, že stromy mají svůj počátek ve hvězdách, a v osmé kapitole shledáme, že studium jejich stavebních bloků naznačuje existenci paralelních světů.

V té době jsem měl přítelkyni, která studovala fyziku na Královském technickém institutu. Její učebnice mi přišly mnohem zajímavější než ty moje. Náš vztah nevydržel, ale moje láska k fyzice ano. Protože vysokoškolské studium ve Švédsku bylo volné, zapsal jsem se na její univerzitu, aniž jsem úředníkům Stockholmské ekonomické školy řekl o svém tajném dvojím životě. Tím oficiálně začalo mé detektivní pátrání, a předkládaná kniha je zprávou o něm sepsanou o čtvrt století později.

Takže co je realita? V této úvodní kapitole s dosti odvážným názvem jsem vám nechtěl arogantně prodat nějakou definitivní odpověď (i když různé pozoruhodné možnosti prozkoumáme v poslední části knihy), ale spíše vás pozvat, abyste mě doprovodili na mé osobní výzkumné výpravě, a podělit se s vámi o své vzrušení a poznatky vyvolané vábivými záhadami. Stejně jako já i vy možná dojdete k poznání, že ať už je realita jakákoli, nesmírně se liší od toho, co jsme si o ní kdysi mysleli. A že v hlubině našich každodenních životů se skrývá fascinující tajemství. Doufám,

VÝPRAVA ZAČÍNÁ

že i vy, tak jako já, nahlédnete své každodenní problémy, jako jsou parkovací lístky a různé zármutki, z neotřelé perspektivy, jež vám usnadní brát je s klidným srdcem a plně se soustředit na radosti života a jeho četná tajemství.

Když jsem poprvé probíral ideu této knihy se svým agentem Johnem Brockmanem, dal mi jasný příkaz: „Nechci žádnou učebnici – chci tvoji knihu.“ Proto je kniha de facto vědeckou autobiografií. Přestože obsahuje víc informací o fyzice než o mé osobě, rozhodně to není obvyklá populárně-naučná kniha, která se snaží o nestranný přehled fyziky, odráží převládající názor fyzikální komunity a poskytuje vyvážený prostor všem protichůdným názorům. Je to spíše jen osobní výprava za poznáním nejhlubší podstaty reality. Doufám, že najdete potěšení v možnosti nahlédnout ji mýma očima. Spolu pak zhodnotíme stopy, které osobně pokládám za nejzajímavější, a pokusíme se z nich vydedukovat, co to všechno znamená.

Naši výpravu začneme shrnutím, kterak se kontext otázky „Co je realita?“ zásluhou vědeckých revolucí měnil, když fyzika umožnila vrhnout nové světlo na naši vnější realitu od těch největších škál (kapitoly 2-6) po škály nejmenší (kapitoly 7-8). V první části knihy se budeme zabývat otázkou „Jak velký je vesmír?“, přičemž finální odpověď budeme hledat pohledem do čím dál vzdálenějších hlubin kosmu, pak prozkoumáme náš kosmický původ i dva typy paralelních světů a spatříme indicie, že náš prostor je v určitém smyslu matematický. Ve druhé části knihy budeme systematicky zkoumat otázku „Z čeho je všechno složeno?“: vydáme se do subatomárního mikrosvěta, prozkoumáme třetí typ paralelního vesmíru a spatříme indicie, že základní stavební bloky hmoty jsou také v určitém smyslu matematické. Ve třetí části knihy trochu poodstoupíme a zamysleme se nad tím, co tohle všechno znamená pro fundamentální podstatu reality. Začneme argumentem, že náš

Jak číst tuto knihu?		Skální čtenář naučných knih				
		Zájeme o vědu	Fyzik	Název kapitoly	Ústřední téma	Status
Pohled zdálky (Jaká je realita na největších škálách?)	1	1	1	Co je realita?	Úvod	
	2	přeskočit ↓	přeskočit ↓	Naše místo v prostoru	Jak velký je prostor?	Hlavní proud
	3			Naše místo v čase	Historie našeho vesmíru	Hlavní proud
	4			Náš vesmír v číslech	Přesná kosmologie	Hlavní proud
5	Náš kosmický počátek			Kosmologická inflace	Hlavní proud	
Pohled zblízka (Jaká je realita na nejmenších škálách?)	6	6	6	Vítejte v multiverzu	Paralelní vesmíry úrovně I a II	Kontroverzní
	7	přeskočit ↓	přeskočit ↓	Kosmická lega	Kvantová mechanika	Hlavní proud
	8			Multiverzum úrovně III	Kvantové paralelní vesmíry	Kontroverzní
	9			Vnitřní a vnější realita	Role vědomí	Kontroverzní
10	Fyzikální a matematická realita			Idea že „realita je matika“	Velmi kontroverzní	
Pohled s odstupem (Je realita matematikou?)	11	11	11	Je čas pouhou iluzí?	Jak tomu dát smysl	Velmi kontroverzní
	12	12	12	Multiverzum úrovně IV	Nejzazší multiverzum	Velmi kontroverzní
	13	13	13	Život, náš vesmír a vůbec	Budoucnost vesmíru a lidstva	Kontroverzní

Obrázek 1.3: Jak číst tuto knihu. Pokud jste už přečetli hodně moderních populárně-naučných knih o vědě a máte pocit, že víte, co je zakřivený prostor, náš velký třesk, reliktní mikrovlnné záření, temná energie, kvantová mechanika atd., pak můžete přeskočit druhou, třetí, čtvrtou a sedmou kapitolu poté, co si přečtete „Shrnutí základních faktů“ na jejich koncích. A pokud jste profesionální fyzik, můžete přeskočit i pátou kapitolu. Avšak v mnoha dobře známých pojmech se ukrývají překvapivě jemné nuance, takže neumíte-li zodpovědět všech 16 otázek uvedených na začátku následující kapitoly, mohou pro vás být úvodní části knihy užitečné. Uvidíte také, jak z nich pozdější kapitoly logicky vycházejí.

1. CO JE REALITA?

dosavadní neúspěch porozumět lidskému vědomí nám nijak nebrání v kompletním pochopení vnější fyzikální reality. Poté se ponoříme do mé nejradikálnější a velmi kontroverzní představy, totiž že nejhlubší podstata reality je matematická. Degradujeme při tom známé pojmy, jako je nahodilost a složitost, a dokonce pozměníme obsah pojmu iluze, z čehož vyplyne existence čtvrté a nejzazší úrovně paralelních světů. Naši výpravu zakončíme ve třinácté kapitole návratem domu a prozkoumáme, jaké to vše má důsledky pro budoucnost života ve vesmíru, pro lidské pokolení a pro vás osobně. Cestovní plán najdete na obrázku 1.3 spolu s mými radami ohledně způsobu čtení. Čeká nás fascinující výprava. Vydejme se na ni!

SHRNUTÍ ZÁKLADNÍCH FAKTŮ

- Mám pocit, že nejdůležitější ponaučení, které nám o konečné podstatě reality poskytuje fyzika, zní, že ať už je realita jakákoli, hodně se liší od toho, jak se nám jeví.
- V první části této knihy se vydáme do velkých dálek a prozkoumáme fyzikální realitu na největších rozměrových škálách, od planet ke hvězdám, galaxiím, jejich kupám, našemu vesmíru a dvěma možným úrovním paralelních světů.
- Ve druhé části této knihy se vydáme do mikrosvěta a prozkoumáme fyzikální realitu na nejmenších rozměrových škálách, od atomů k ještě fundamentálnějšímu stavebnímu bloku, kde potkáme třetí úroveň paralelních světů.
- Ve třetí části podstoupíme a prozkoumáme konečnou podstatu této podivné fyzikální reality, uvážíme možnost, že je ryze matematické povahy, konkrétně že se jedná o matematickou strukturu, která je součástí čtvrté a nejzazší úrovně paralelních světů.
- *Realitou* myslí různí lidé spoustu různých věcí. Já toto slovo používám ve smyslu konečné podstaty vnějšího fyzikálního (reálného) světa, jehož jsme součástí, a už od dětství mě inspirovala a fascinovala snaha lépe jí porozumět.
- Tato kniha je o mé osobní výzkumné výpravě za podstatou reality - připojte se, prosím!

ČÁST PRVNÍ

POHLED ZDÁLKY

NAŠE MÍSTO V PROSTORU

Prostor ... je velký. Opravdu velký. Nevěřili byste, jak obrovsky a nesmírně úžasně je velký.
Douglas Adams, *Stopařův průvodce Galaxií*

KOSMICKÉ OTÁZKY

Zvedá ruku a já naznačuji, že je úplně v pořádku, když mi položí otázku. „Pokračuje prostor donekonečna?“ táže se.

Čelist mi poklesla. Páni. Zrovna jsem dokončil svou krátkou přednášku o astronomii v dětském koutku, což byl můj odpolední program pro děti ve Winchesteru. Tahle strašně roztomilá skupinka předškoláků sedí na zemi, kouká na mne všetečnými očima a čeká, co řeknu. A ten pětiletý klučina mi zrovna položil otázku, na kterou nedokážu odpovědět! Vážně, na tenhle dotaz nezná odpověď nikdo na celé planetě. A přitom nejde o nějakou absurdní metafyzickou záležitost, ale o vážnou vědeckou otázku. Různé teorie, o nichž vám záhy povím, na ni dávají různé odpovědi, a díky stále probíhajícím experimentům se o ní dozvídáme pořád víc. Opravdu si myslím, že to je zcela zásadní otázka týkající se podstaty fyzikální reality. Jak uvidíme v páté kapitole, tato otázka nás zavede dokonce do dvou různých typů paralelních světů.

V důsledku pravidelného sledování zpráv o světových událostech se postupem let stávám čím dál pesimističtější, ale během několika málo sekund dokázal ten předškolák nesmírně povzbudit mou víru v tvůrčí schopnosti lidstva. Jestliže pětileté dítě umí zformulovat tak hlubokou myšlenku, co asi dokážeme my všichni dospělí, dostaneme-li vhodnou příležitost! Onen chlapec mi znovu připomněl nesmírný význam správně vedené výuky. My všichni se rodíme s vrozenou zvědavostí, ale v určité chvíli ji v nás škola obvykle potlačí. Mám intenzivní pocit, že mou hlavní zodpovědností učitele není poskytovat fakta, ale znovu rozdmýchat ztracené nadšení klást otázky.

Zbožňuji otázky. Hlavně ty zásadní. Mám vážně štěstí, že mohu trávit takovou spoustu času potýkáním se se zajímavými otázkami. Pokládám za ohromné štěstí, jež předčilo všechna moje očekávání, že tahle aktivita se stala mojí profesí a že se jí dokonce mohu živit. Zde je můj seznam šestnácti hlavních otázek, na které se mě lidé obvykle ptají:

JAK VELKÝ JE PROSTOR?

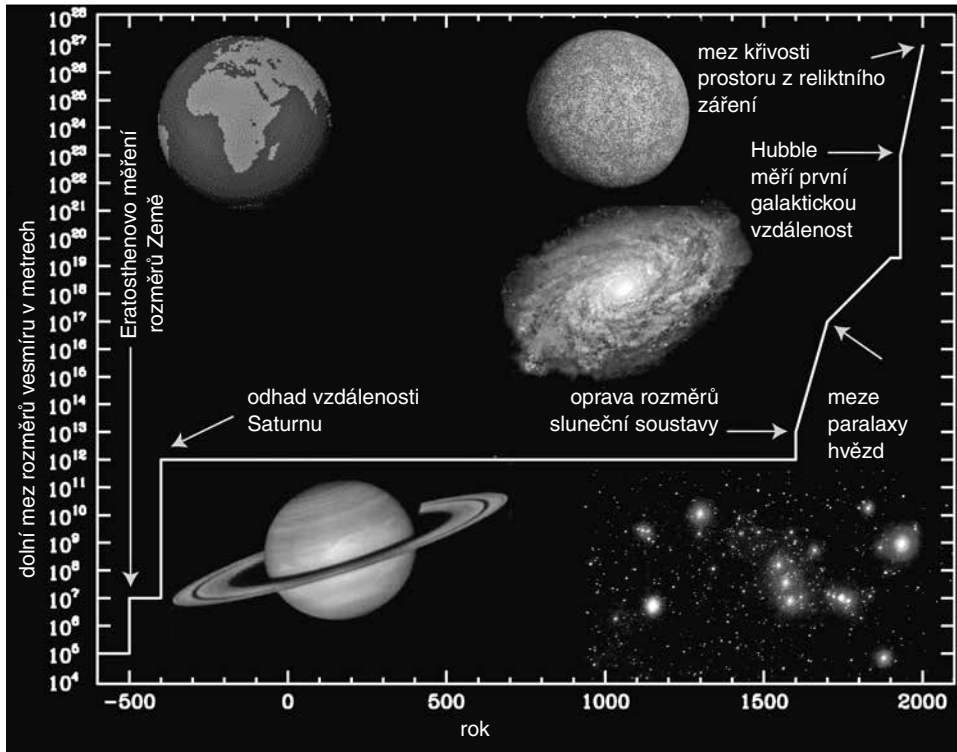
1. Jak by mohl být prostor konečný?
2. Jak mohl nekonečný prostor vzniknout v konečném čase?
3. Kam se rozpíná náš vesmír?
4. Ve kterém místě prostoru se odehrál počáteční velký třesk?
5. Nastal náš velký třesk v jediném bodě?
6. Jestliže je náš vesmír starý jenom 14 miliard let, jak je možné, že vidíme objekty, které jsou od nás vzdáleny 30 miliard světelných let?
7. Neporušují galaxie, které se od nás vzdalují nadsvětelnými rychlostmi, teorii relativity?
8. Opravdu se od nás galaxie samy vzdalují, anebo jenom expanduje prostor?
9. Zvětšuje se i Mléčná dráha?
10. Máme nějaké důkazy o počáteční singularitě velkého třesku?
11. Nenarušuje vznik hmoty inflaci z téměř ničeho zákon zachování energie?
12. Co způsobilo velký třesk?
13. Co bylo před naším velkým třeskem?
14. Jaký bude konečný osud našeho vesmíru?
15. Co je temná hmota a temná energie?
16. Jsme bezvýznamní?

Pojďme se do těchto otázek pustit. Jedenáct z nich zodpovíme v následujících čtyřech kapitolách a zbývajících pět nás dovede k překvapivým závěrům. Nejprve se však vrátíme k oné otázce z mateřské školy. Stane se ústředním tématem celé první části této knihy: *Pokračuje prostor donekonečna?*

JAK VELKÝ JE PROSTOR?

Táta mi kdysi dal tuto radu: „Dostaneš-li těžkou otázku, na kterou neumíš odpovědět, pusť se nejdřív do lehčí otázky, na kterou odpovědět umíš.“ Začněme tedy v tomto duchu a položme si lehčí otázku: jaký je nejmenší možný rozměr prostoru kolem nás, který není v rozporu s žádným pozorováním? Obrázek 2.1 ilustruje, jak odpověď na tuto otázku dramatickým způsobem v průběhu minulých staletí narůstala: dnes víme, že náš prostor je přinejmenším miliardabilionkrát (10^{21} krát) větší než vzdálenosti, které znali naši dávní předci lovci-sběrači – jež byly vymezeny okolím, jaké za svůj celý život poznali. Obrázek navíc ukazuje, že rozšiřování našich horizontů nebylo dílem jednoho radikálního skoku, ale spíše posloupností mnoha postupných kroků. Kdykoli se nám lidem podařilo pohlédnout o něco dál a zmapovat vesmír ve větším měřítku, objevili jsme, že všechno, co jsme dosud znali, je jenom jedna část většího celku. Jak ilustruje obrázek 2.2, naše rodná zem je součástí planety, která je součástí sluneční soustavy, která je součástí galaxie, která je součástí kosmického uskupení galaxií, které je součástí pozorovaného vesmíru, který je, jak se pokusím ukázat, součástí různých úrovní paralelních světů.

2. NAŠE MÍSTO V PROSTORU

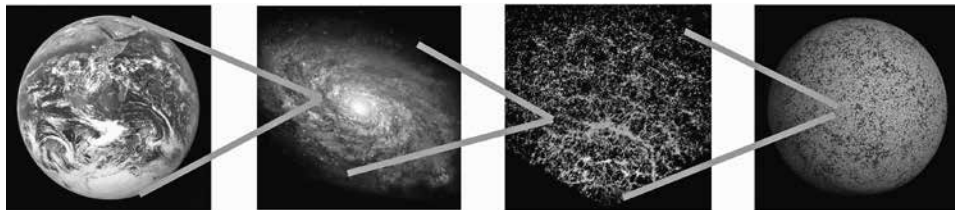


Obrázek 2.1: Jak popíšeme v této kapitole, náš dolní odhad rozměrů vesmíru stále roste. Pověšměte si, že svislá škála je logaritmická, tedy s každou další značkou je rozměr vesmíru desetkrát větší.

Jako pštros, co strká hlavu do písku, jsme si i my lidé pořád dokola mysleli, že to, co můžeme vidět, představuje veškerou existující realitu, arogantně jsme stavěli sami sebe do středu všehomíra. V naší snaze porozumět kosmu nás tudíž provázelo neustálé podceňování reality. Naše úspěchy, jak je vidíme na obrázku 2.1, však ukazují i druhý aspekt věci, který pokládám za inspirující: *opakovaně jsme podceňovali nejenom rozměry našeho vesmíru, ale i schopnosti lidského mozku mu porozumět.* Naši jeskynní předci měli stejně velké mozky jako my, a protože netrávili večery sledováním televize, jsem si jist, že si kladli otázky jako: „Co je to všechno tam nahore na obloze?“ a „Kde se to všechno vzalo?“ Vyprávěli o tom nádherné mýty a příběhy, ale jen pramálo si uvědomovali, že je pouze na nich najít správnou odpověď na tyto otázky. A že tajemství nespočívá v tom, naučit se létat do vesmíru a zblízka zkoumat nebeské objekty, ale dopřát rozletu vlastní lidské mysli.

Spolehlivou zárukou neúspěchu je přesvědčit sám sebe, že úspěchu nelze dosáhnout, a tudíž se o něj ani nepokusíte. Ohlédneme-li se do historie lidstva, zjistíme, že řada velkých fyzikálních objevů mohla být učiněna dříve, neboť vše důležité již bylo připraveno. Je to jako nevstřelit tutový gól do prázdné branky, protože se

VELIKOST ZEMĚ



Obrázek 2.2: Kdykoli se nám lidem podařilo pohlédnout o něco dál, objevili jsme, že vše, co jsme dosud znali, je jenom jedna část většího celku: naše rodná země je součástí planety (vlevo), která je součástí sluneční soustavy, která je součástí galaxie (vlevo uprostřed), která je součástí kosmického uskupení galaxií (vpravo uprostřed), které je součástí pozorovaného vesmíru (vpravo), který je možná součástí různých úrovní paralelních světů.

chybně domníváte, že máte zlomenou hokejku. V následujících kapitolách uvedu pozoruhodné příklady, kterak zmíněný nedostatek sebedůvěry nakonec překonali Isaac Newton, Alexander Friedmann, George Gamow a Hugh Everett. V tomto duchu zcela souzním s citátem nositele Nobelovy ceny Stevena Weinberga: „Takhle to ve fyzice chodí často: chyba není v tom, že bereme naše teorie moc vážně, ale v tom, že je nebereme dostatečně vážně.“

Pojďme nejprve prozkoumat, jak je možno stanovit velikost Země a vzdálenost Měsíce, Slunce, hvězd a galaxií. Osobně to pokládám za jednu z nejlepších detektivek všech dob a za okamžik zrodu moderní vědy, takže se s vámi o ni hodlám podělit a nabídnout vám ji coby předkrém před hlavním chodem, jímž budou největší kosmologické objevy. Jak sami uvidíte, v prvních čtyřech případech nepůjde o nic složitějšího nežli o chytré měření úhlů. Současně z těchto příkladů vysvitne, jak důležité je hloubat nad zdánlivě banálními jevy, neboť právě z nich může povstat zcela zásadní zjištění.

VELIKOST ZEMĚ

Když se rozmohly plavby lodí s plachtami, lidé si hned všimli, že ztrácí-li se plachetnice z dohledu za horizontem, tak nejprve mizí její trup a teprve potom plachty. Tím přirozeně přišli na myšlenku, že povrch oceánu je zakřivený a že Země je kulatá, stejně jako Slunce a Měsíc na obloze. Staří Řekové našli i přímý argument ve prospěch kulatosti Země, když si všimli, že během zatmění Měsíce vrhá Země na Měsíc kruhový stín, jak je vidět na obrázku 2.3. Přestože je snadné odhadnout velikost Země z úvahy o plachetnici,* už před více než 2 200 lety přišel Eratosthenes s ještě mnohem přesnějším měřením, a to tím, že chytře využil úhly. Věděl, že v egyptském městě Syena (dnešní Asuán) v pravé poledne o letním slunovratu stojí Slunce přímo v nadhlavníku, zatímco v Alexandrii, vzdálené 794 kilometrů severněji, se Slunce ve stejné chvíli nachází 7,2 stupňů od nadhlavníku jižním směrem.

* Poloměr Země je přibližně $d^2/2h$, kde d je největší vzdálenost, na kterou ještě můžete vidět plachtu výšky h nad úrovní moře.

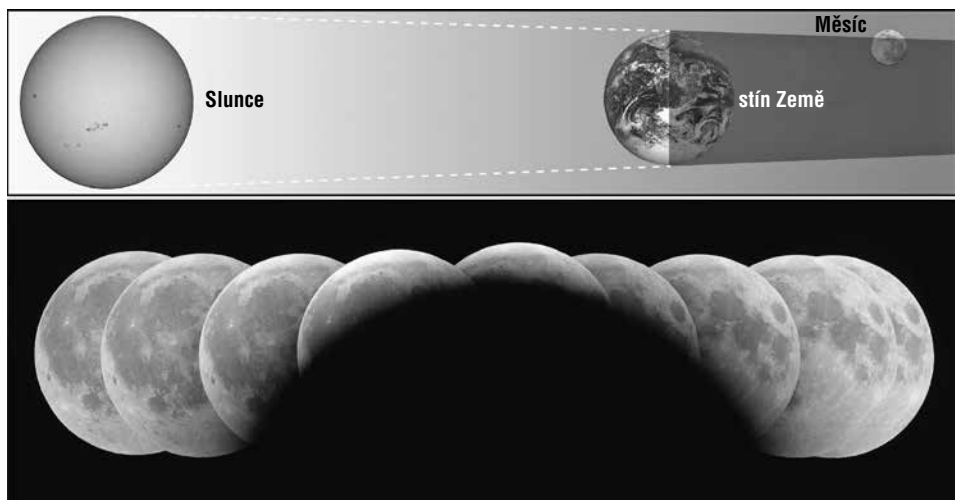
2. NAŠE MÍSTO V PROSTORU

Z toho vyvodil závěr, že cesta na jih dlouhá 794 kilometrů odpovídá 7,2 úhlovým stupňům z celkových 360 stupňů kolem celého zemského obvodu. Takže obvod Země musí být zhruba $794 \text{ km} \times 360^\circ / 7,2^\circ \approx 39\,700 \text{ km}$, což je neuvěřitelně blízko dnešní hodnotě 40 000 km.

Je komické, že Kryštof Kolumbus to dost zpackal, když se spolehl na mnohem nepřesnější výpočty z pozdějších dob a popletl si arabské míle s italskými, v důsledku čehož učinil závěr, že k plavbě do Orientu mu bude stačit překonat jen 3 700 kilometrů, zatímco skutečná hodnota činí 19 600 kilometrů. Zjevně by na svou plavbu nesehnal žádné finanční prostředky, kdyby své výpočty provedl správně, a zjevně by vůbec nepřežil, kdyby neexistovala Amerika. Takže mít kliku je někdy důležitější nežli mít pravdu.

VZDÁLENOST K MĚSÍCI

Po celé věky budila zatmění posvátnou hrůzu a strach a inspirovala četné mýty. Když Kolumbus během své plavby zůstal trčet na Jamajce, podařilo se mu zastrašit místní domorodce tím, že předpověděl zatmění Měsíce 29. ledna roku 1504. Zatmění Měsíce ovšem poskytuje i báječný klíč k určení velikosti vesmíru. Již před více než dvěma tisíciletími si Aristarchos ze Samu povšiml toho, co můžete vidět na obrázku 2.3: dostane-li se Země mezi Slunce a Měsíc a způsobí tím zatmění Měsíce, má stín Země vržený na Měsíc obloukovitý tvar. Kruhový stín Země je přitom několiknásobně větší než Měsíc. Aristarchos si rovněž uvědomil, že vržený stín musí být o něco menší, než je rozměr Země, neboť Země je menší než Slunce, ale



Obrázek 2.3: Během svého zatmění prochází Měsíc stínem, který vrhá Země. Před více než dvěma tisíciletími Aristarchos ze Samu porovnal velikost Měsíce s velikostí zemského stínu během zatmění Měsíce a dospěl ke správnému závěru, že Měsíc je zhruba čtyřikrát menší než Země. (Fotografickou sekvenci pořídil Scott Ewart.)

VZDÁLENOST KE SLUNCI A PLANETÁM

i tuto komplikaci dokázal překonat a dospěl k závěru, že Měsíc je zhruba 3,7krát menší než Země. A protože Eratosthenes stanovil rozměr zeměkoule, Aristarchos ho prostě jen vydělil číslem 3,7 a dostal rozměr Měsíce! Osobně to pokládám za okamžik, kdy se lidská vynalézavost poprvé vymanila z pozemských pout a vydala se na cestu napříč kosmickým prostorem. Mnoho lidí před Aristarchem hledělo na Měsíc a lámalo si hlavu nad jeho velikostí, ale teprve on ji dokázal určit. A obešel se bez mohutných raket, stačil mu jenom vlastní důvtip.

Jeden vědecký průlom často přináší další. V tomto případě určení velikosti Měsíce ihned umožnilo stanovit jeho vzdálenost. Natáhněte před sebe paži a podívejte se, jaké věci ve vašem okolí dokáže zakrýt malíček. Váš nejmenší prst pokrývá úhel zhruba jeden stupeň, což je přibližně dvojnásobek toho, co je zapotřebí k zakrytí Měsíce na obloze. Opravdu si to sami vyzkoušejte, až se příště budete dívat na Měsíc. Aby objekt měl úhlový rozměr půl stupně, musí být jeho vzdálenost od vašeho oka přibližně 115krát větší, než činí jeho rozměr. Koukáte-li například z okénka letadla a zakryjete-li půlkou svého malíčku padesátimetrový plavecký bazén, víte, že letadlo se nachází ve výšce $115 \times 50 \text{ m} = 6 \text{ km}$. A úplně stejným způsobem Aristarchos spočítal, že vzdálenost k Měsíci je 115krát větší než jeho rozměr, což odpovídá asi třicetinasobku zemského průměru.

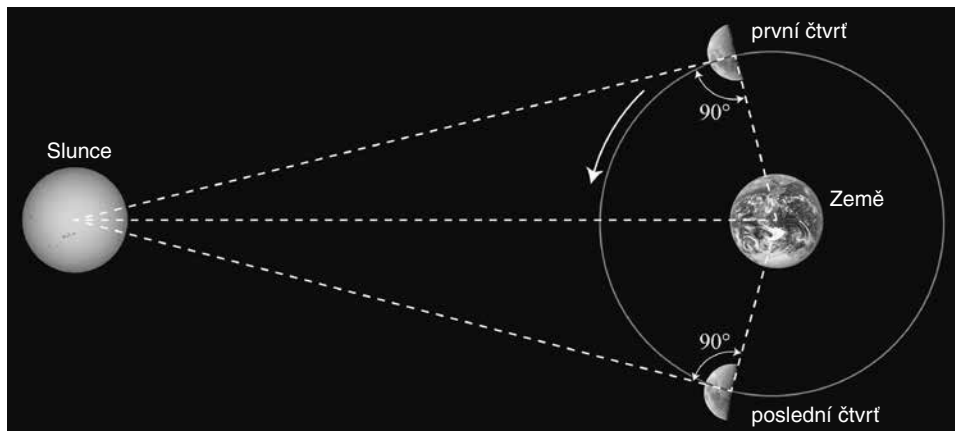
VZDÁLENOST KE SLUNCI A PLANETÁM

Ale co Slunce? Zkuste ho zakrýt svým malíčkem a zjistíte, že na obloze zabírá zhruba stejný úhel jako Měsíc, tedy asi půl stupně. Slunce je od nás evidentně dál než Měsíc, protože během svého zatmění je Slunce Měsícem překryto (i když jen taktak). Ale jak přesně je daleko? To záleží na jeho skutečné velikosti: kdyby například bylo Slunce třikrát větší než Měsíc, muselo by být třikrát tak daleko, aby na obloze vykrylo stejný úhel.

Aristarchos ze Samu měl tenkrát velmi úspěšné období a dokázal chytre odpovědět i na tuto otázku. Uvědomil si, že ve fázi, kdy je Měsíc právě v první anebo poslední čtvrti (tedy když ze Země vidíme měsíční povrch osvětlený Sluncem přesně z jedné poloviny), tvoří Slunce, Měsíc a Země vrcholy pravouhlého trojúhelníka, viz obrázek 2.4. Odhadl, že úhel mezi Měsícem a Sluncem v tento okamžik činí asi 87 stupňů. Znal tvar trojúhelníka a jeho odvěsnu danou vzdáleností Měsíce od Země, takže s pomocí trigonometrie uměl spočítat přeponu, tedy vzdálenost Země od Slunce. Dospěl k závěru, že Slunce musí být asi dvacetkrát dál než Měsíc, a tudíž dvacetkrát větší než Měsíc. Jinými slovy, Slunce je *obrovské*: více než pětikrát větší než Země. Toto poznání ho inspirovalo k tomu, že dvě tisíciletí před Mikulášem Koperníkem přišel s hypotézou heliocentrismu: správně vytušil, že je daleko přirozenější, aby Země obíhala kolem mnohem většího Slunce, než naopak.

Tento příběh je inspirativní, ale současně nás nabádá k opatrnosti. Svědčí o tom, jak nesmírně důležitý je důvtip a jak nesmírně důležité je, aby naše měření byla přesná. Antičtí Řekové byli méně zdatní v tom druhém, a Aristarchos bohužel nebyl

2. NAŠE MÍSTO V PROSTORU



Obrázek 2.4: Změřením úhlu mezi Sluncem a Měsícem v první či poslední čtvrti dokázal Aristarchos odhadnout vzdálenost Slunce od nás. (Obrázek je schematický a neodpovídá skutečným velikostem: ve skutečnosti je Slunce více než stokrát větší než Země a zhruba čtyřistakrát vzdálenější než Měsíc.)

výjimkou. Ukázalo se, že je velmi obtížné stanovit, kdy je Měsíc osvětlen přesně z 50 procent. A úhel mezi Sluncem a Měsícem v onom okamžiku není 87 stupňů, nýbrž 89,85 stupňů, tedy velmi blízko pravému úhlu. Trojúhelník na obrázku 2.4 by proto ve správném měřítku měl být mnohem protaženější. Ve skutečnosti je Slunce téměř dvacetkrát dál, než odhadl Aristarchos, a jeho průměr je zhruba 109krát větší než průměr Země, takže do celého objemu Slunce by se vešlo asi milion zeměkoulí. Tento velký omyl se bohužel podařilo napravit až o dva tisíce let později. Když tedy přišel Koperník a pomocí svého geometrického důvtipu stanovil velikost a tvar naší sluneční soustavy, byly tvary a relativní velikosti oběžných drah všech planet již správné, ale celkový rozměr jeho modelu sluneční soustavy byl zhruba dvacetkrát menší než ve skutečnosti – jako bychom místo ve skutečném domě žili v domečku pro panenky.

VZDÁLENOST KE HVĚZDÁM

Ale co hvězdy? Jak dalekou jsou ony? A co vlastně jsou? Osobně si myslím, že tohle je jedna z největších detektivek všech dob. Určení vzdálenosti k Měsíci a ke Slunci byl zajisté impozantní výkon, ale bylo při něm možné opřít se o různá geometrická vodítka: obě nebeská tělesa se po obloze pohybují specifickým způsobem a mají určitý tvar a úhlový rozměr, který můžeme změřit. Ale s hvězdou to vypadá beznadějně. Jeví se nám jako pouhá svítící tečka. Když se na ni podíváte podrobněji, vidíte, že... je to pořád jen mrňavá svítící tečka, která nemá žádný pozorovatelný tvar ani velikost, je to jenom bodové světlo. A nepozorujeme ani, že by se hvězdy po nebeské sféře nějak pohybovaly, vyjma společné rotace všech souhvězdí po nebeské klenbě, o níž dnes víme, že je pouhou iluzí způsobenou vlastní rotací Země.

Někteří učenci spekulovali, že hvězdy by mohly být malé otvory v černé sféře nebes, jimiž k nám proniká vzdálené světlo. Italský astronom Giordano Bruno naproti tomu tvrdil, že hvězdy jsou objekty podobné našemu Slunci, jen jsou od nás mnohem dál, a možná mají i své vlastní planety a civilizace – to se zrovna moc nehodilo katolické církvi, a tak ho nechala v roce 1600 upálit.

V roce 1608 se objevil záblesk naděje: byl objeven dalekohled! Galileo Galilei rychle vylepšoval jeho konstrukci, pozoroval hvězdy svými čím dál dokonalejšími dalekohledy a viděl... stále jen mrňavé svítící tečky. Byli jsme pořád jen tam, kde předtím. Rád vzpomínám, jak jsem coby dítě hrál na babiččino piano „Třpyť se, třpyť se, hvězdičko“. Ještě v roce 1806, kdy se takhle písnička objevila, vyjadřoval verš „moc rád bych věděl, co jsi“ *pořád ještě* jen zbožné přání mnoha lidí. A nikdo nemohl zodpovědně tvrdit, že zná správnou odpověď.

Jsou-li hvězdy opravdu vzdálená slunce, jak tvrdil Bruno, musí být od nás neporovnatelně dál než naše Slunce, když září tak slabě. Ale o kolik dál? To záleží na jejich skutečné svítivosti, ale ani tu neznáme. Dvaatřicet let po zveřejnění textu zmíněné dětské písničky se německému matematikovi a astronomovi Friedrichu Besselovi konečně podařilo rozlousknout záhadu tohoto detektivního příběhu. Natáhněte před sebe ruku a koukejte se na svůj vztyčený palec střídavě levým a pravým okem. Vidíte, jak váš prst přeskakuje zprava doleva o určitý úhel, promítnuto na pozadí vzdálených objektů? Když teď prst přiblížíte k očím, úhel „přeskoku“ se zvětší. Astronomové tento úhel nazývají *paralaxa* a je jasné, že ho můžete použít k určení vzdálenosti vašeho palce. Nemusíte k tomu provádět žádné matematické výpočty, protože váš mozek to dělá zcela automaticky, a to tak snadno, že si toho ani nevšimnete. Skutečnost, že vaše dvě oči vidí tělesa pod dvěma různými úhly v závislosti na jejich vzdálenosti, je samou podstatou trojrozměrného vidění a fungování příslušného systému mozku.

Kdybyste měli oči víc od sebe, mohli byste lépe vnímat vzdálenost objektů, které jsou mnohem dál. Stejný trik s paralaxou proto využíváme v astronomii. Chováme se jako obři, jejichž oči jsou od sebe vzdáleny 300 miliard metrů, což je dvojnásobek poloměru dráhy Země kolem Slunce. Prakticky to provádíme tak, že porovnáváme dva snímky téhož místa na obloze pořízené dalekohledem v časovém odstupu právě 6 měsíců, kdy je Země zrovna na opačné straně od Slunce. Přesně tímto způsobem přišel Bessel na to, že zatímco většina hvězd se na obou snímcích nacházela na zcela stejných místech, jedna konkrétní hvězda nikoli: nesla podivný název 61 Cygni. Rozdíl v úhlech na obou snímcích znamenal, že vzdálenost této hvězdy od nás musí být asi milionkrát větší než vzdálenost Slunce. To je tak ohromná vzdálenost, že světlu trvá 11 let, než doletí z hvězdy k nám, zatímco světlu ze Slunce to trvá jenom 8 minut.

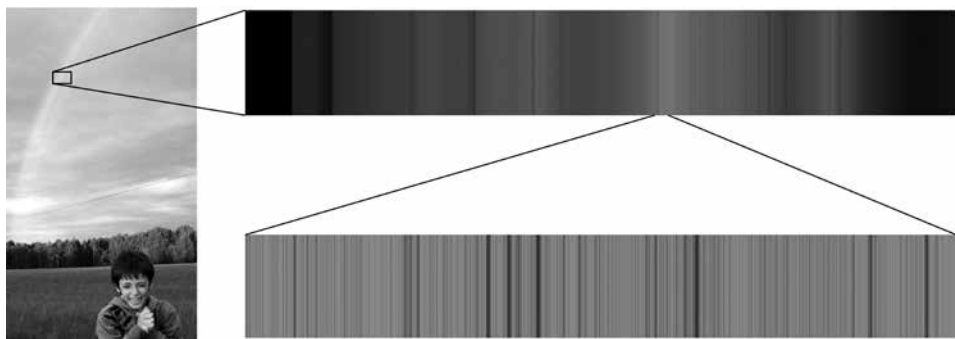
Netrvalo dlouho a byly změřeny paralaxy mnoha dalších hvězd, takže jsme konečně zjistili vzdálenosti spousty těchto záhadných bílých teček! Když v noci sledujete, jak se od vás vzdaluje auto, svítivost zadních světel klesá s druhou mocninou vzdálenosti (dvojnásobná vzdálenost znamená čtyřnásobně slabší jas). Když tedy

2. NAŠE MÍSTO V PROSTORU

nyní Bessel znal vzdálenost hvězdy 61 Cygni, použil tohoto optického zákona k určení její absolutní svítivosti. Zjistil, že svítivost této hvězdy je přibližně stejná jako svítivost našeho Slunce. Takže nakonec měl Giordano Bruno pravdu!

Zhruba ve stejné době se podařil druhý velký průlom v tomto směru pomocí naprosto odlišné metody. Roku 1814 vynalezl německý optik Joseph von Fraunhofer zařízení zvané *spektrograf*, jenž mu umožnil rozložit bílé světlo do barevné duhy a s velkou přesností proměřit zastoupení různých barev. Objevil, že ve všech barvách duhy se nacházejí záhadné tmavé čáry (viz obrázek 2.5) a že přesná poloha těchto čar v barevném spektru záleží na zdroji světla, že je tedy specifickým druhem jeho spektrálních „otisků prstů“. Během následujících pár desítek let se podařilo změřit a katalogizovat spektra velkého množství běžných látek. Tuhle informaci můžete použít třeba na příští party a překvapit kamarády, když jim řeknete, co svítí v jejich lucerně, jen pomocí toho, jaké světlo vydává, tedy aniž byste se k ní vůbec přiblížili. Je opravdovou senzací, že spektrum slunečního světla prokázalo, že Slunce – ona záhadná žhnoucí koule na obloze – je složeno ze stejných prvků, jaké dobře známe zde na Zemi, například z vodíku. A když se podařilo spektroskopicky analyzovat světlo hvězd posbírané dalekohledy, zjistilo se, že také hvězdy obsahují zhruba stejnou směs plynů jako naše vlastní Slunce! To definitivně prokázalo, že Bruno měl naprostou pravdu: hvězdy jsou vzdálená slunce, mají podobné složení a vydávají zhruba stejné množství energie. Takže během několika málo desetiletí přestaly být hvězdy tajemnými bílými tečkami na noční obloze a staly se z nich obrovské koule žhavých plynů, jejichž chemické složení dokážeme určit.

Spektrum je doslova zlatý důl astronomických informací. A pokaždé, když už si myslíme, že jsme z něj vytěžili všechno, zjistíme, že je v něm zakódováno něco dalšího. Především nám spektrum umožňuje změřit teplotu objektu, aniž bychom se ho museli dotknout. Víme, že kus doběla rozžhaveného železa je žhavější než tentýž kus železa, jestliže žhne rudě. A podobně i bílé zářící hvězda je teplejší nežli hvězda



Obrázek 2.5: Duha, kterou spatřil můj syn Alexander, nás nedovedla k pokladu zlatých duhovek, ale doslova k zlatému dolu informací o tom, jak fungují atomy a hvězdy. Jak uvidíme v sedmé kapitole, relativní intenzity různých barev se dají vysvětlit tím, že světlo se skládá z částic (fotonů), přičemž všechny polohy a velikosti mnoha tmavých čar je možné spočítat ze Schrödingerovy rovnice kvantové mechaniky.

VZDÁLENOST KE GALAXIÍM

červená. Pomocí spektrografu jejich teplotu stanovíme dost přesně. Jako vítaný bonus nám tato informace prozradí velikost hvězdy, podobně jako jedno uhádnuté slovo v křížovce pomáhá uhodnout další. Trik spočívá v tom, že teplota určuje, kolik světla emituje každý čtvereční metr povrchu hvězdy. A protože můžete spočítat celkové množství světla vyzařované hvězdou (z její vzdálenosti a zdánlivé svítivosti), víte už, kolik čtverečních metrů musí mít povrch hvězdy, a tedy jak je velká.

Aby toho nebylo dost: spektrum hvězdy skrývá informaci také o jejím pohybu, neboť frekvence (barva) světla se pohybem trochu mění. Tento efekt nazýváme Dopplerův jev a projevuje se obdobně i v charakteristické změně zvuku (výšky tónu) *vrrruum* auta, které vás právě míjí: frekvence je vyšší, když se auto blíží, a naopak nižší, když se od vás vzdaluje. Na rozdíl od našeho Slunce žije většina hvězd ve stabilních partnerských dvojicích, přičemž oba hvězdní partneři kolem sebe obíhají v pravidelném rytmu. Tento společný tanec dokážeme často detekovat pomocí Dopplerova jevu, díky němuž se spektrální čáry hvězd během vzájemného oběhu pravidelně posouvají tam a zase zpět. Velikost těchto posuvů spektrálních čar je úměrná oběžné rychlosti. Občas dokážeme změřit i vzdálenost dvojhvězdného systému. Kombinací obou informací pak dokážeme provést další kaskadérský kousek: změřit hmotnost hvězd. A nepotřebujeme k tomu žádné gigantické váhy. Stačí použít Newtonovy zákony pohybu a gravitace. V některých případech se nám díky Dopplerovým posuvům podařilo objevit dokonce i planety obíhající kolem centrální hvězdy. Prochází-li planeta na své dráze mezi hvězdou a námi, jasnost hvězdy mírně poklesne, což nám umožňuje změřit velikost planety, a slabé změny spektrálních čar nám zase mohou napovědět, jestli má planeta atmosféru a z čeho se skládá. Spektra jsou doslova dar z nebes. A zdá se být nevyčerpatelný. Když například změříme šířku spektrálních čar hvězdy s danou teplotou, dokážeme určit tlak její plynné atmosféry. A změřením velikosti rozštěpení určitých spektrálních čar dokážeme stanovit velikost magnetického pole na povrchu hvězdy.

Když to shrneme: jedinou informací o hvězdách je slaboučké světlo, které k nám od nich přichází. Ale díky velmi důmyslné detektivní práci můžeme z tohoto světla vyčíst spoustu informací: vzdálenost hvězd, jejich rozměr, hmotnost, složení, teplotu, tlak, magnetické pole a případně i přítomnost planetární soustavy. To, že se nám lidem podařilo tohle všechno vydedukovat ze zdánlivě neuchopitelných bílých teček na obloze, je výkon, na který by podle mého názoru mohli být právem hrdí i největší detektivové všech dob jako Sherlock Holmes či Hercule Poirot!

VZDÁLENOST KE GALAXIÍM

Když ve věku 102 let umřela moje babička Signe, strávil jsem nějaký čas úvahami o jejím životě. Uvědomil jsem si, že vyrůstala v úplně jiném vesmíru. Když začala chodit na střední školu, celý známý vesmír tvořila jenom sluneční soustava a pár okolních hvězd. Ona i její kamarádi si nejspíš mysleli, že hvězdy jsou velmi daleko, že světlu trvá několik let, než k nám doletí od těch nejbližších, a tisíce let, než doletí

2. NAŠE MÍSTO V PROSTORU

z těch nejuvdálenějších. Ale tohle všechno je dnes pro nás pouhé kosmické zápraží.

Kdyby v její škole byli astronomové, asi by mluvili i o takzvaných mlhovinách, difuzních objektech vypadajících jako nepatrné obláčky na noční obloze. Některé z nich mají nádherný spirálovitý tvar, podobný těm na Van Goghově slavné olejomalbě *Hvězdná noc*. Co jsou zač? Mnoho astronomů je přehlíželo jako nezajímavá mračna plynu mezi hvězdami, ale někteří zastávali radikálnější názor: jde o „ostrovní světy“, jimž dnes říkáme *galaxie*. Jsou to obrovská uskupení hvězd vzdálená od nás tak moc, že ani pomocí dalekohledů v nich tenkrát nebylo možné rozlišit jednotlivé hvězdy, a proto se jevíly jen jako mlžné obláčky. Aby astronomové tento názorový spor vyřešili, museli změřit jejich vzdálenost. Ale jak?

Technika měření paralaxy, která skvěle fungovala na blízké hvězdy, v mlhovinách selhala: byly totiž tak daleko, že jejich paralaktický úhel byl příliš malý, aby se dal změřit. Jaké jiné možnosti pro určení velkých vzdáleností máme? Podíváte-li se dalekohledem na vzdálenou žárovku a spatříte, že je na ní napsáno „100 wattů“, máte vyhráno: stačí použít zákon optiky, podle kterého svítivost klesá s druhou mocninou vzdálenosti, a spočítáte, jak daleko musí žárovka být, aby měla vámi pozorovanou svítivost. Tyto velmi užitečné zdroje světla, jež mají známou svítivost, astronomové nazývají *standardní svíčky*. Detektivními metodami, o nichž jsem se již zmínil, astronomové bohužel přišli na to, že hvězdy rozhodně nemají standardní svítivost: některé jsou milionkrát jasnější než Slunce, zatímco jiné jsou tisíckrát méně jasné. Kdybyste ale viděli hvězdu, na které by bylo napsáno „ 4×10^{26} wattů“ (což by byl správný výrobní štítek pro naše Slunce), měli byste standardní svíčku a bylo by možné určit její vzdálenost, stejně jako v případě žárovky. Máme štěstí, že příroda nám takový typ hvězd opravdu nabízí: jsou to proměnné hvězdy zvané *cefeidy*. Jejich jasnost v čase osciluje díky tomu, že v pravidelných pulzech mění svou velikost. V roce 1912 učinila harvardská astronomka Henrietta Swan Leavittová objev, že perioda pulzací cefeid funguje jako wattmetr: čím více dní uplyne mezi dvěma následnými pulzy zjasnění, tím více wattů světla hvězda vydává.

Cefeidy mají navíc tu výhodu, že jsou hodně jasné, takže je můžeme spatřit i na velké vzdálenosti (některé z nich jsou 100 000krát jasnější než Slunce). Americký astronom Edwin Hubble jich několik objevil v takzvané mlhovině v Andromedě, což je obláček o úhlové velikosti Měsíce, který můžete spatřit i pouhým okem, nemáte-li oblohu přezářenu světlem měst. Použil čerstvě dokončený Hookerův dalekohled v Kalifornii (jeho zrcadlo o průměru 2,5 metru bylo tehdy největší na světě), změřil periodu pulzací, použil vzoreček Leavittové ke spočtení skutečné jasnosti, porovnal ji s pozorovanou jasností a odtud spočítal vzdálenosti cefeid. Když své výsledky zveřejnil v roce 1925 na konferenci, mnoha přítomným astronomům klesla čelist: Hubble tvrdil, že mlhovina v Andromedě je galaxie vzdálená od nás asi milion světelných let, tisíckrát dál než většina hvězd, které moje babička viděla na nočním nebi! Dnes víme, že galaxie v Andromedě je ještě dál, než se Hubble domníval, skoro tři miliony světelných let od nás. Takže dokonce i sám Hubble, podobně jako Aristarchos či Koperník před ním, bezděčně pokračoval v tradici podceňování velikosti našeho vesmíru.

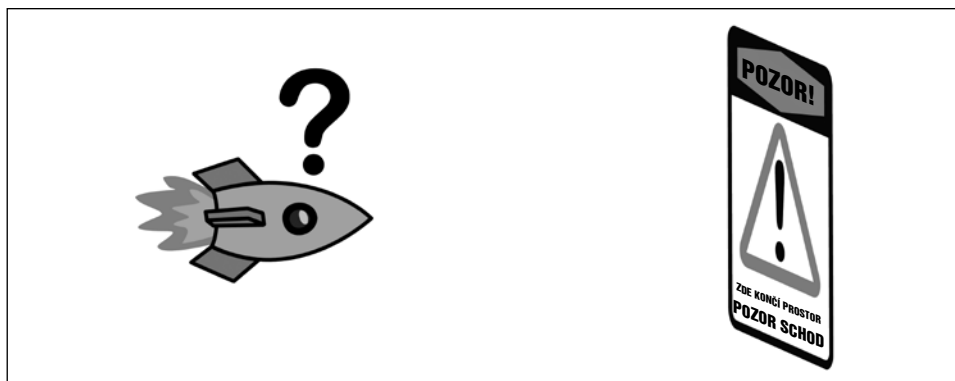
CO JE PROSTOR?

V následujících letech Hubble a další astronomové objevovali čím dál vzdálenější galaxie, čímž rozšířili naše obzory z milionů až na miliardy světelných let. V páté kapitole je posuneme dokonce k bilionům a ještě dál.

CO JE PROSTOR?

Takže, jak se mne zeptal onen předškolák: Pokračuje prostor donekonečna? K otázce můžeme přistoupit dvěma způsoby: observačně a teoreticky. V této kapitole jsme zatím postupovali první cestou: popsali jsme, jak rafinovaná měření postupně odhalovala čím dál vzdálenější oblasti vesmíru, aniž bychom při tom narazili na nějaké hranice. Nesmírného pokroku však bylo dosaženo i na teoretické frontě. Především: Jak by prostor *nemohl* pokračovat donekonečna? Bylo by vážně dost divné, kdybychom někdy někde narazili na značku, kterou vidíme na obrázku 2.6, jež by nás varovala před koncem prostoru. Vzpomínám si, že jako dítě jsem o něčem takovém přemýšlel. Co by asi bylo za touhle značkou? Přišlo mi, že obávat se dosažení konce prostoru je stejně hloupé, jako když se dávní mořeplavci báli, že přepadnou přes okraj světa. Na základě čistě logické úvahy jsem si pro sebe učinil závěr, že prostor zkrátka musí pokračovat pořád, že musí být nekonečný. Již v antickém Řecku si na základě logických argumentů Eukleides uvědomil, že geometrie je součástí matematiky a že celý trojrozměrný prostor je možno axiomaticky popsat stejně dobře jako jiné matematické struktury, například teorii čísel. Vybudoval svou úžasnou matematickou teorii nekonečného trojrozměrného prostoru a popsal jeho geometrické vlastnosti. Všeobecně byla pak přijata jako jediná logicky možná verze fyzikálního prostoru.

Na počátku 19. století ale matematici Carl Friedrich Gauss, János Bolyai a Nikolaj Lobačevskij objevili, že existují i další logicky bezrozporné varianty stejnoměrných trojrozměrných prostorů. Bolyai nadšeně psal svému otci: „Z ničeho jsem stvořil podivný nový vesmír.“ Tyto nové prostory se řídí odlišnými pravidly: na rozdíl od Eukleidova prostoru již nemusí být nekonečné, součet úhlů trojúhelníka v nich již



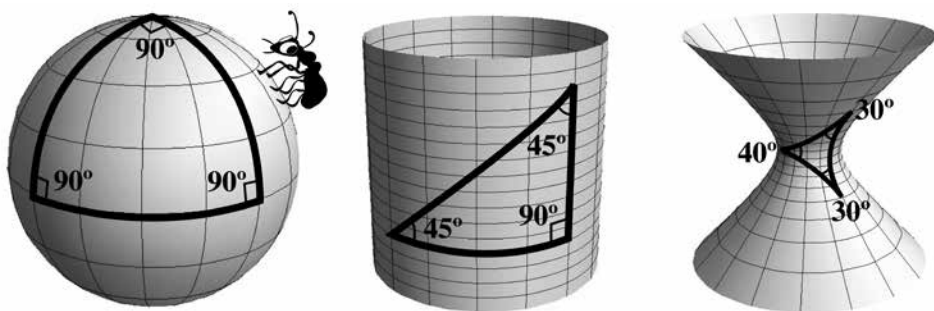
Obrázek 2.6: Je těžké představit si konec prostoru. Kdyby opravdu končil, co by leželo za ním?

2. NAŠE MÍSTO V PROSTORU

nemusí činit 180 stupňů a tak dále. Představte si trojúhelníky nakreslené na dvou-
rozměrných zakřivených plochách, jak je znázorněno na obrázku 2.7. Suma vnitř-
ních úhlů trojúhelníka na kouli dává součet větší než 180 stupňů (vlevo), přesně
180 stupňů na válci (uprostřed) a méně než 180 stupňů na hyperboloidu (vpravo).
Nadto je dvourozměrný sférický povrch konečný, přestože nemá žádné hranice.

Tento příklad ukazuje, že pro zakřivené povrchy nemusí platit pravidla eukleidov-
ské geometrie. Gauss a další ale dospěli k ještě radikálnějšímu poznatku: prostor se
může zakřivovat sám o sobě, aniž by byl povrchem něčeho jiného! Představte si, že
jste slepý mravenec a chcete zjistit, na kterém ze tří povrchů nakreslených na obrázku
2.7 žijete. Cítíte, že žijete na dvourozměrném povrchu, protože nemáte přístup do
třetí dimenze (tedy mimo plochu). To vám ale nijak nebrání ve vašem detektivním
pátrání. Můžete definovat přímou čáru (jako nejkratší spojnici dvou bodů) a pak pro-
stě sečíst úhly v trojúhelníku. Když například dostanete 270 stupňů, zvoláte: „Ahá,
je to víc než 180 stupňů, takže jsem na kouli!“ A své mravenčí kamarády můžete
dokonce oslnit tím, že přesně určíte, jak daleko musíte jít přímým směrem vpřed,
než se dostanete zase zpátky do výchozího místa. Jinak řečeno: všechny geometrické
souvislosti bodů, přímých čar, úhlů, křivostí a tak dále je možno rigorózně defino-
vat pouze pomocí odkazů na váš dvourozměrný prostor. Není nutné se odvolávat
na dodatečnou třetí dimenzi. To znamená, že matematici dokážou přesně definovat
zakřivený dvourozměrný prostor i tehdy, když žádná třetí dimenze neexistuje, tedy
dvourozměrný prostor zakřivený sám o sobě, jenž není povrchem něčeho jiného.

Většinu lidí se nejspíš tento matematický objev neeukleidovských prostorů zdál
být pouhou ezoterní abstrakcí bez praktických důsledků v reálném světě. Ale pak
přišel Einstein se svou obecnou teorií relativity, která v podstatě říká: „Jsme jako
mravenci!“ Einsteinova teorie připouští, že náš trojrozměrný prostor je zakřivený
- aniž by přitom musela existovat skrytá čtvrtá prostorová dimenze, do které by se
ohýbal. Takže otázku, v jakém typu prostoru žijeme, *nemůžeme* zodpovědět pomocí
čistě logických úvah, jak doufali Eukleidovi stoupenci. Můžeme na ni odpovědět



Obrázek 2.7: Nakreslíte-li na tyto zakřivené povrchy trojúhelníky, budou součty jejich vnitřních
úhlů větší než 180 stupňů (vlevo), přesně 180 stupňů (uprostřed) a menší než 180 stupňů
(vpravo). Einstein nás naučil, že tyto tři možnosti platí i pro trojúhelníky v našem fyzikálním
trojrozměrném prostoru.

pouze tak, že provedeme skutečná měření. Například sestrojíme obrovský trojúhelník (vytvoříme ho třeba ze světelných paprsků) a změříme jeho vnitřní úhly: bude jejich součet přesně 180 stupňů? Ve čtvrté kapitole vám povím, jak jsme s nadšenými kolegy provedli přesně toto měření. Odpověď zní, že pro trojúhelníky o rozměrech celého známého vesmíru je součet dost blízký 180 stupňům, ale je výrazně větší než 180 stupňů, jestliže trojúhelník z větší části vyplňuje neutronová hvězda anebo černá díra. Tvar našeho fyzikálního prostoru je tedy mnohem složitější, než ukazují tři jednoduché varianty na obrázku 2.7.

Vraťme se ale k otázce, kterou položil onen předškolák. Vidíme, že Einsteinova teorie připouští existenci konečného prostoru, který není tak absurdní jako na obrázku 2.6: může být konečný proto, že je zakřivený a napojený sám na sebe. Jestliže je například náš trojrozměrný prostor zakřivený jako povrch čtyřrozměrné hypersféry, pak je možné oběhnout ho celý dokola: vydáme-li se v něm kupředu stále stejným směrem, přijdeme po určité době z opačné strany zase na místo, ze kterého jsme vyšli. A nepřepadneme při tom nikde z okraje tohoto trojrozměrného prostoru, protože žádné hranice nemá. Stejně jako nenarazí na žádné hranice mravenec plazící se po sféře (kouli) nakreslené v levé části obrázku 2.7.

Einstein dokonce připouští, že by náš trojrozměrný prostor mohl být nekonečný i v případě, kdy není zakřivený! Válec nakreslený uprostřed obrázku 2.7 je v matematickém smyslu plochý, nikoli zakřivený: když na něm nakreslíte trojúhelník, bude součet jeho úhlů 180 stupňů. O tom se můžete snadno sami přesvědčit. Stočte a slepte si válec z kusu papíru, nakreslete na něj trojúhelník a vystříhnete ho nůžkami. Sami uvidíte, že ho bez problému můžete celý položit na rovnou desku stolu. Taková věc není možná s papírovou sférou (koulí) ani hyperboloidem, neboť v těchto případech musíte papír potřhat anebo pomačkat. Přestože však je válec na obrázku 2.7 z lokálního pohledu mravence plochý, napojuje se sám na sebe: kdyby se mravenec po něm vydal vodorovně dopředu, obešel by celou kružnici a vrátil by se z opačné strany domů. Takovouto propojenost nazývají matematici *topologií* prostoru. Definují ploché prostory, které se napojují samy na sebe ve *všech* svých dimenzích, a nazývají je *torusy*. Dvourozměrný torus má stejnou topologii jako povrch cukrářského věnečku (s otvorem uvnitř). Einstein připouští možnost, že fyzikální prostor, který obýváme, je trojrozměrný torus. V takovém případě by byl plochý a současně konečný. Ale mohl by být i nekonečný.

Když to shrneme: náš prostor se může rozprostírat až donekonečna anebo nemusí. Obě možnosti jsou v plném souladu s Einsteinovou obecnou relativitou, což je naše nejlepší fyzikální teorie prostoru. Tak jak je tomu ve skutečnosti? K této fascinující otázce se vrátíme ve čtvrté a páté kapitole, kde zjistíme, že prostor je nejspíš opravdu nekonečný. Rozbor hluboké otázky, kterou mi položil onen předškolák, nás ale vede k otázce další: Co to vlastně je prostor? Přestože my všichni už od svého narození pokládáme prostor za cosi *fyzikálního*, za něco, co vytváří arénu našeho materiálního světa, vidíme, že matematici mluví o prostorech jako o *matematických* entitách. Pro matematiky je studium prostoru totéž co studium geometrie,

2. NAŠE MÍSTO V PROSTORU

a geometrie je jen jedna součást matematiky. Mohli bychom si tedy myslet, že prostor je specifický matematický objekt v tom smyslu, že jeho základní vlastnosti jsou matematické povahy, například počet dimenzí, křivost a topologie. V desáté kapitole tento pohled na svět dále rozvineme a přijdeme s tvrzením, že v dobře definovaném smyslu je veškerá naše fyzikální realita matematickou strukturou.

V této kapitole jsme prozkoumali naše místo v prostoru a objevili neskonale větší vesmír, než jaký znali naši předkové. Abychom pochopili, co se odehrává v jeho nejzazších viditelných koutech, pozorujeme ho našimi dalekohledy. Nestací ale zkoumat jenom naše místo v prostoru. Musíme prozkoumat i naše místo v čase. Tak zní název následující kapitoly.

SHRNUTÍ ZÁKLADNÍCH FAKTŮ

- Lidstvo během své historie znovu a znovu zjišťovalo, že fyzikální realita je neporovnatelně větší, než si do té doby představovalo, a že všechny dosavadní znalosti o světě se týkaly pouze části grandióznější struktury: planety, sluneční soustavy, galaxie, nadkupy galaxií a tak dále.
- Einsteinova obecná teorie relativity připouští nekonečný prostor.
- Připouští ale i alternativní možnost, že prostor je konečný, i když bez hranic. Takže kdybyste se vydali dostatečně rychle dostatečně daleko, vrátili byste se z opačné strany domů.
- Prostor, sám základ našeho fyzikálního (reálného) světa, může být ryze matematické podstaty v tom smyslu, že jeho fundamentální vlastnosti jsou matematické povahy – například počet dimenzí, jeho křivost či topologie.

NAŠE MÍSTO V ČASE

Pravé poznání tkví v tom, znát meze vlastní nevědomosti.

Konfucius

Nejvyšší formou nevědomosti je, když zavrhnete něco, o čem vůbec nic nevíte.

Wayne Dyer

Odkud se vzala naše sluneční soustava? Můj syn Philip se zapletl do vášnivé debaty na toto téma, když byl ve druhé třídě. Probíhala asi takhle:

„Myslím, že ji stvořil Bůh,“ řekla jeho spolužačka.

„Můj táta ale říká, že vznikla z obrovského mraku molekul,“ vložil se do toho Philip.

„Ale odkud se vzal ten obrovský mrak molekul?“ zeptal se další chlapec.

„Obrovský mrak molekul možná stvořil Bůh, a pak ten obrovský mrak molekul mohl vytvořit sluneční soustavu,“ řekla dívka.

Vsadím se, že celou dobu, co lidstvo chodí po této Zemi, hledí vzhůru na noční oblohu a láme si hlavu nad tím, odkud se všechno vzalo. Stejně jako v minulosti i dneska existuje spousta věcí, které známe, a také spousta věcí, které neznáme. Víme hodně o tom, co je zrovna tady a teď, a také docela dost o tom, co je nám blízké v prostoru i čase. Jako třeba, co máme za zády anebo jakou jsme měli dneska snidani. Když se ale vydáme dále a více do minulosti, nevyhnutelně narazíme na meze našich znalostí, tam, kde začíná naše nevědomost. V předchozí kapitole jsme viděli, kterak lidský důvtip postupně posouval tyto hranice poznání čím dál hlouběji od nás, pokud jde o *prostor*. Říše poznání se zvětšila natolik, že postupně obsáhla celou naši planetu, naši sluneční soustavu, naši Galaxii a dokonce miliardy světelných let kosmického prostoru všemi směry. Vydejme se nyní na druhou intelektuální expedici a prozkoumejme, jak lidé postupně posouvali hranice poznání nazpět v *čase*.

Proč nám Měsíc nespadne na hlavu? Odpověď na tuhle otázku přinesla první takový posun hranic poznání.

ODKUD SE VZALA NAŠE SLUNEČNÍ SOUSTAVA?

Ještě před čtyřmi staletími bylo beznadějně pokusit se na takovou otázku odpovědět. Viděli jsme, že důvtipné detektivní pátrání umožnilo zjistit polohu hlavních částí

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

vesmíru viditelných pouhým okem: Slunce, Měsíce, Merkuru, Venuše, Marsu, Jupiteru a Saturnu. Usilovné a svědomité pátrání Mikuláše Koperníka, Tycho Brahe, Johannese Keplera a dalších odhalilo i charakter pohybu těchto objektů: zjistili, že naše sluneční soustava připomíná hodinový stroj, jehož součásti se pohybují stále dokola po přesných drahách, a zdá se, že věčně. Vůbec nic nenasvědčovalo tomu, že by se onen hodinový mechanismus měl někdy zastavit, ani že by byl v určitém okamžiku v minulosti spuštěn. Je ale opravdu věčný? A pokud ne, odkud se vzal? O tom jsme neměli ani potuchy.

Zákony, jimiž se řídil pohyb mechanických hodin oné doby, všech jejich ozubených koleček, pružin a dalších součástí, byly natolik dobře známy, že se dala předpovídat jak jejich budoucnost, tak i minulost. Dalo se například spolehlivě říct, že hodiny budou tikat pravidelně a také, že kvůli tření se nakonec zastaví, pokud je znovu nenatáhneme. Jejich podrobným studiem jste také mohli zjistit, kdy byly naposledy nataženy. Kdyby existovaly podobně přesné zákony popisující a vysvětlující nebeské pohyby, mohly by i ony zahrnovat efekt podobný tření. Sluneční soustava by se v tom případě měnila v čas, což by nám mohlo napovědět, kdy a jak vznikla.

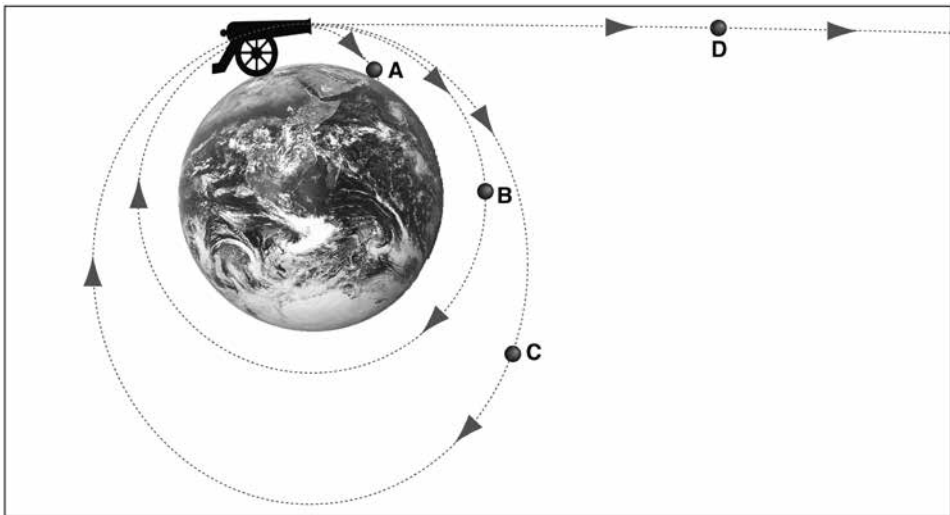
Odpovědí ale bylo rozhodné *ne*. Tady na Zemi se nám podařilo dost dobře pochopit, jak se hýbou tělesa, například hozené kameny, balvany vrhané římskými katapulty anebo železné koule vystřelované z kanonů. Ať už ale byly zákony ovládající nebeské objekty jakékoli, rozhodně vypadaly diametrálně odlišné od zákonů platných tady dole na Zemi. Co třeba takový Měsíc? Je-li to cosi jako obrovská skála někde na obloze, proč nepadne sem dolů, tak jak to činí kdejaký kámen? Klasická odpověď na tuto záhadu zněla, že Měsíc je nebeský objekt a nebeské objekty se zkrátka chovají podle úplně jiných pravidel. Třeba jsou imunní vůči gravitaci, a tak nepadnou dolů k nám. Někteří zašli dokonce ještě dál a přišli s vysvětlením, že nebeské objekty se prý chovají tímto způsobem, protože jsou dokonalé. Mají dokonalé sférické tvary, neboť sféra je dokonalý tvar. Pohybují se po kruhových drahách, protože kružnice jsou také dokonalé. Pád dolů by byl hrubým narušením této jejich dokonalosti. Zde na Zemi je nedokonalost úplně běžnou věcí: tření zpomaluje pohyb těles, oheň mění věci v popel a lidé umírají. Ale na nebesích není pohyb třením nijak ovlivněn, Slunce svítí pořád dál a konec je v nedohlednu.

Tato čistá a neposkvřněná reputace nebes však při bližším ohledání neobstála. Pečlivým rozbořením měření, jež provedl Tycho Brahe, zjistil Johannes Kepler, že dráhy planet nemají tvar kružnic, ale elips. Elipsy jsou protažené, a tedy méně dokonalé nežli kružnice. Galileo svými dalekohledy spatřil, že dokonalost Slunce je poskvřněna ošklivými černými skvrnami. A že Měsíc není dokonalá sféra (koule), nýbrž vypadá jako nějaké *pozemské místo* plné hor a obrovských kráterů. Takže proč nepadne sem dolů?

Na tuto otázku nakonec odpověděl Isaac Newton, když domyslel do konce myšlenku, která byla prostá a radikální zároveň: že se nebeské objekty řídí *stejnými* zákony jako objekty zde na Zemi. Pochopitelně, Měsíc nepadá dolů jako upuštěný kámen, ale bylo by naopak možné vrhnout obyčejný kámen takovým způsobem,

ODKUD SE VZALA NAŠE SLUNEČNÍ SOUSTAVA?

aby už také nedopadl na Zemi? Newton věděl, že pozemské kameny padají k Zemi, nikoli k mnohem hmotnějšímu Slunci. Z toho usoudil, že příčinou bude mnohem větší vzdálenost Slunce, neboli že gravitační přitažlivost objektu musí klesat s jeho vzdáleností. Je tedy možné hodit kámen nad sebe tak velkou rychlostí, aby se vymanil z gravitační přitažlivosti Země dřív, než tato přitažlivost stačí obrátit směr jeho pohybu? Newton sám něco takového prakticky provést neuměl, ale uvědomil si, že hypotetický superkanon by takový trik dokázal, pokud by kamenu udělal dostatečnou rychlost. Jak můžete vidět na obrázku 3.1, budoucí osud dělové koule vystřelené vodorovným směrem z kanonu závisí na její rychlosti: na zem dopadne jen tehdy, je-li její rychlost menší než určitá magická hodnota. Když budete vystřelovat koule stále většími rychlostmi, doletí dál a dál, než dopadnou. A když rychlost výstřelu dosáhne magické hodnoty, poletí koule pořád ve stejné výšce nad zemí. Nikdy nedopadne a začne obíhat Zemi po kruhové dráze – úplně stejně jako Měsíc! Protože z experimentů s padajícími kameny, jablky a tak podobně Newton znal velikost gravitační přitažlivosti na zemském povrchu, dokázal tuto magickou rychlost spočítat: činila ohromných 7,9 kilometrů za sekundu. Proto když předpokládal, že se Měsíc řídí úplně stejnými zákony gravitace jako dělová koule, mohl podobným způsobem předpovědět rychlost potřebnou k tomu, aby se i on pohyboval po kruhové dráze kolem Země. Chybělo mu jenom pravidlo, kolikrát slabší je gravitace Země ve vzdálenosti Měsíce nežli na zemském povrchu. Ale protože Měsíci trvá oběh kolem Země po kružnici, jejíž poloměr určil už Aristarchos, jeden měsíc, Newton znal rychlost jeho pohybu: činila asi 1 kilometr za sekundu, zhruba tolik jako



Obrázek 3.1: Dělová koule (D) vystřelená větší rychlostí než 11,2 kilometrů za sekundu unikne ze Země a už nikdy se nevrátí (zanedbáme-li odpor vzduchu). Pokud je vystřelena o něco pomaleji (C), dostane se na eliptickou orbitu kolem Země. Je-li vystřelena vodorovně rychlostí 7,9 kilometrů za sekundu, bude její oběžná dráha přesně kruhová (B), a při menších rychlostech výstřelu (A) vždy dopadne na zem.

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

rychlost střely z dnešních vojenských pušek. V tom okamžiku učinil úžasný objev: bude-li předpokládat, že gravitační síla ubývá s druhou mocninou vzdálenosti od středu Země, pak magická rychlost pro kruhový pohyb Měsíce bude přesně odpovídat jeho změřené rychlosti! Tím objevil gravitační zákon a zjistil, že má univerzální platnost. Platí nejen tady na Zemi, ale i kdekoli na nebesích.

Všechno do sebe náhle začalo zapadat. Kombinací jeho gravitačního zákona s matematickými zákony pohybu, které také sám zformuloval, se Newtonovi podařilo vysvětlit nejen pohyb Měsíce, ale i pohyby planet kolem Slunce. Newton dokonce dokázal matematicky odvodit fakt, že obecné orbity jsou eliptické, nikoli jen kruhové, což pro Keplera zůstalo nevysvětlenou záhadou.

Tak jako u všech velkých průlomů v dějinách fyziky i Newtonovy zákony zodpověděly mnohem více otázek než jenom ty, které vedly k jejich objevu. Vysvětlily například slapové jevy přílivu a odlivu: gravitační přitažlivost působící na vodní masu je větší na té straně zeměkoule, která je zrovna přivracená k Měsíci a Slunci, což způsobuje pravidelné vzdouvání vodní hladiny na otáčející se Zemi. Newtonovy zákony také ukázaly, že celkové množství energie se zachovává (slovem *zachovává* se ve fyzice myslí skutečnost, že příslušná veličina se v čase *nemění*), takže pokud někde nějaká energie je, nemohla vzniknout z ničeho, ale musela se tam dostat odjinud. Slapy obsahují spoustu energie (její část můžeme využít v přílivových elektrárnách), ale odkud všechna tato energie pochází? Z větší části ze zemské rotace, která se díky slapovému tření postupně zpomaluje. Máte-li někdy pocit, že máte málo času, počkejte 200 milionů let: v té době bude mít den 25 hodin!

Z toho plyne, že tření ovlivňuje i planetární pohyby, čímž padá představa věčné sluneční soustavy. V minulosti se Země musela otáčet rychleji a je možné spočítat, že systém Země-Měsíc nemůže být ve stávající podobě starší než 4 až 5 miliard let. Jinak by Země kdysi rotovala tak rychle, že by ji odstředivá síla roztrhala. Získali jsme tedy první klíč k objasnění původu sluneční soustavy: Máme odhad, kdy se odehrál její zrod!

Newtonův zásadní objev umožnil lidské mysli proniknout do kosmického prostoru: ukázal, že nejprve můžeme objevit fyzikální zákony pomocí experimentů prováděných tady dole na Zemi, a pak tyto zákony extrapolovat a vysvětlit pomocí nich to, co se děje na nebi. I když Newton tento postup použil zprvu jen na pohyb a gravitaci, jeho revoluční myšlenka se šířila doslova rychlostí blesku a záhy byla aplikována i na světlo, plyny, tekutiny, pevné látky, elektřinu a magnetismus. Lidé ji směle extrapolovali nejenom do makrokosmu, do vnějšího kosmického prostoru, ale i do mikrokosmu. Tím se jim podařilo odhalit, že spousta vlastností plynů a dalších látek se dá vysvětlit pomocí Newtonových zákonů popisujících pohyby atomů, z nichž se skládají. Propukla vědecká revoluce a dovedla nás k revoluci průmyslové i do informačního věku. Tento pokrok nám umožnil sestrojít mocné počítače, které dále stimulují nebývalý vědecký rozvoj, pomáhají nám řešit fyzikální rovnice a získat odpovědi na mnoho zajímavých fyzikálních otázek, které pro nás byly předtím neřešitelné.

ODKUD SE VZALA NAŠE SLUNEČNÍ SOUSTAVA?

Fyzikální zákony můžeme použít mnoha způsoby. Často toužíme na základě dnešních znalostí zjistit budoucnost, například při předpovídání počasí. Rovnice se ale dají stejně dobře použít i v opačném směru, to znamená pomocí dnešních znalostí odhalovat minulost – třeba když zpětně určujeme podrobnosti ohledně zatmění, jehož byl Kolumbus svědkem na Jamajce. Je ale také možné studovat různé hypotetické situace a pomocí fyzikálních rovnic spočítat jejich časový vývoj, například když simulujeme start rakety k Marsu a zkoumáme, zdali doletí ke stanovenému cíli. Právě tento přístup nám poskytl nové poznatky o původu naší sluneční soustavy.

Představte si obrovský oblak plynu v kosmickém prostoru. Co se s ním během času stane? Fyzikální zákony v tomto případě předpovídají, že o jeho osudu rozhodne souboj dvou sil: vlastní gravitace se snaží oblak stlačit, zatímco jeho vnitřní tlak se ho naopak snaží rozepnout. Začne-li vítězit gravitační přitažlivost a oblak se stlačí, vzroste tím i jeho teplota (ze stejných důvodů jako se zahřeje hustilka, když dohušťujeme kolo) a následkem toho se zvětší tlak, což vítězný postup gravitace zastaví. Oblak tedy může zůstat dlouhou dobu stabilní, neboť gravitace a tlak se navzájem vyvažují, ale nakonec se jejich vzájemné přiměří naruší. Oblak plynu je totiž horký, a proto září, což znamená, že část jeho tepelné energie, která generuje vnitřní tlak, je odnesena pryč. Gravitace proto může oblak o něco stlačit. A tak vše pokračuje dál. Naprogramováním gravitačního zákona a fyzikálních zákonů ovládajících chování plynů do našich počítačů dnes dokážeme podrobně simulovat tento hypotetický souboj a zjistit, co se stane. Nej hustší část oblaku se nakonec zahřeje natolik, že se z něj stane termonukleární reaktor: atomy vodíku se v něm slučují v atomy helia, zatímco mohutná gravitace brání tomu, aby vše naráz nevybuchlo. Zrodila se hvězda. Vnější části nové hvězdy jsou velmi horké a intenzivně září. Toto záření doslova odfoukne okolní zbytky plynného mračna a nově zrozená hvězda se stane pozorovatelnou našimi dalekohledy.

Přetočení zpět. Přehrání děje. Jak se oblak plynu postupně zmenšuje, jeho původně malá rotace se zesiluje, stejně jako se víc roztočí krasobruslařka, když v piruetě přitáhne paže k tělu. Odstředivá síla z této čím dál rychlejší rotace zabrání gravitaci, aby mrak plynu stlačila do jediného bodu. Místo toho se oblak stlačí do diskovitého útvaru podobného pizze, jako když pekař roztočí těsto, aby z něj udělal plochý útvar. Hlavními přísadami každé takové kosmické pizzy jsou vodík a helium ve formě plynu. Když seznam přísad obsahuje i těžší atomy jako uhlík, kyslík a křemík, pak v centru plynné pizzy vznikne hvězda, zatímco vnější části disku se mohou shluknout do chladnějších objektů, *planet*, které se zjeví v okamžiku, kdy nově zrozená hvězda odfoukne zbytky původního „těsta“. Protože veškerá rotace (jak my fyzikové říkáme: *moment hybnosti*) pochází z otáčení původního oblaku, není žádným překvapením, že všechny planety v naší sluneční soustavě obíhají kolem Slunce ve stejném směru (proti směru hodinových ručiček, díváme-li se ze severního pólu), což je stejný směr, jakým se kolem své osy otáčí i samo Slunce, a to zhruba jednou za kalendářní měsíc.

Toto vysvětlení původu naší sluneční soustavy dnes potvrzují nejen teoretické výpočty, ale i přímá pozorování mnoha jiných slunečních soustav zachycených moderními

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

teleskopy v různých stadiích svého zrodu. Naše Galaxie obsahuje ohromné množství gigantických molekulárních mračen, plynných oblaků obsahujících molekuly, které jim umožňují vyzařovat teplo, ochlazovat se a smršťovat. V mnoha z nich už dokážeme přímo spatřit, jak se rodí nové hvězdy. V některých případech můžeme dokonce pozorovat, že novorozené hvězdy mají kolem sebe dosud téměř nedotčený plynný protoplanetární disk ve tvaru pizzy. Tento nedávný objev velkého množství slunečních soustav kolem cizích hvězd poskytl astronomům spoustu informací, které nám umožňují daleko lépe pochopit, jak se zformovala naše vlastní sluneční soustava.

Pokud se *takovéto* zrození opravdu odehrálo i v naší vlastní sluneční soustavě, *kdy* přesně k němu došlo? Jen o něco více než před sto lety se ještě všeobecně soudilo, že Slunce mohlo vzniknout teprve před 20 miliony let. Kdyby bylo starší, energetické ztráty způsobené slunečním zářením by totiž způsobily, že Slunce by se vlastní gravitací stlačilo na mnohem menší rozměr, než jaký pozorujeme. Podobné výpočty ukazovaly, že na delších časových škálách by se vytratilo i vnitřní teplo Země (jehož projevem jsou erupce sopek či geotermální sopouchy).

Záhadu, co udržuje naše Slunce žhavé, se podařilo objasnit až po roce 1930, kdy byl objeven proces jaderné fúze. Ještě předtím objev radioaktivity v roce 1896 vedl k vyvrácení předchozích odhadů stáří Země, a navíc poskytl skvělou metodu, jak nalézt odhady lepší. Nejběžnější izotop uranu se spontánně rozpadá na thorium a jiné lehčí atomy, a to tím způsobem, že polovina atomů se rozpadne za 4,47 miliardy let. Takovéto radioaktivní rozpady produkují dostatek tepla, takže jádro Země zůstává po celé miliardy let příjemně teplé. Což vysvětluje, proč je zeměkoule tak teplá, i když je mnohem starší než 20 milionů let. Navíc změřením množství rozpadlých atomů uranu je možné určit stáří příslušné horniny. Touto metodou se zjistilo, že některé vzorky z lokality Jack Hills v západní Austrálii jsou starší než 4,404 miliardy let. Rekord ve stáří meteoritů činí 4,56 miliardy let, což ukazuje, že naše vlastní planeta i ostatní části sluneční soustavy se zformovaly před asi 4,5 miliardami let. To je v dobrém souladu s mnohem hrubším odhadem plynoucím ze slapových sil.

Suma sumárum, objev fyzikálních zákonů a jejich důmyslná aplikace poskytla lidstvu kvalitativní i kvantitativní odpověď na jednu z nejdůležitějších otázek našich předků: *Kdy a odkud se vzala naše sluneční soustava?*

ODKUD SE VZALY GALAXIE?

Posunuli jsme tedy hranice našeho poznání až do minulosti staré 4,5 miliardy let, kdy se naše sluneční soustava zformovala gravitačním stlačením obrovského molekulárního mračna. Jak ale odpovědět na otázku kamaráda mého syna Phillipa: *Odkud se vzal ten obrovský mrak molekul?*

VZNIK GALAXIE

Astronomům, vybaveným dalekohledy, propiskami a počítači, se přesvědčivým způsobem podařilo vyřešit i tuto záhadu, i když pár důležitých detailů stále ještě

ODKUD SE VZALY GALAXIE?

zbývá doplnit. V podstatě jde o to, že stejný souboj mezi gravitací a tlakem, jenž zformoval základ naší sluneční soustavy do tvaru „pizzy“, probíhá i na mnohem větší škále rozměrů: stlačuje mnohem rozsáhlejší oblasti plynu do „pizz“, které jsou milionkrát až bilionkrát hmotnější než Slunce. Tento gravitační kolaps je však hodně nestabilní, takže jeho důsledkem není vznik sluneční soustavy „na steroidech“ s jedinou megahvězdou obklopenou megaplanetami. Místo toho se smršťující oblak plynu rozpadne na bezpočet menších fragmentů, jež vytvářejí oddělené hvězdné soustavy: rodí se galaxie. Naše sluneční soustava je pouze jednou ze stovek miliard obdobných systémů v jedné z oněch diskovitých galaxií ve tvaru „pizzy“. Nazýváme ji Galaxií s velkým „G“ neboli Mléčnou dráhou a kolem jejího centra obíháme asi tak v půlce disku jednou za pár set milionů let (viz obrázek 2.2).

Galaxie se občas navzájem srážejí při dopravních kolizích kosmických rozměrů. Ve skutečnosti to není zas tak strašná událost, poněvadž většina hvězd tvořících obě galaxie se navzájem mine. Gravitace však způsobí, že převážná část hvězd nakonec vytvoří novou, větší galaxii: původní galaxie splynou. Mléčná dráha i náš nejbližší velký soused, galaxie v Andromedě, mají diskovitý tvar. Astronomové je nazývají spirální galaxie, neboť mají krásnou strukturu tvořenou spirálními rameny, jak můžete vidět na obrázku 2.2. Když se dvě spirální galaxie srazí, nejdřív je z toho docela zmatek, ale pak se mrak hvězd z obou galaxií uspořádá do oválného tvaru zvaného eliptická galaxie. Takový bude i náš osud, neboť Mléčnou dráhu čeká za pár miliard let srážka s galaxií v Andromedě. Nevíme, jestli naši vzdálení potomci nazvou svůj nový domov „mléčnometá“, ale jsme si jisti, že to bude eliptická galaxie, protože naše teleskopy už zachytily spoustu podobných srážek v různých stadiích, přičemž pořízené snímky dobře odpovídají našim teoretickým analýzám.

Jestliže se dnešní galaxie vytvořily srážkami a splýváním svých menších předchůdců, je nasnadě otázka: Jak malé byly ty vůbec nejstarší galaxie? Snaha posunout naše znalosti v tomto směru co nejdále do minulosti byla tématem mého úplně prvního výzkumného projektu. Klíčovou částí výpočtu bylo zjistit, jakým způsobem chemické reakce v plynu vytvořily molekuly, které potom umožnily zmenšit tlak díky tomu, že pomohly vyžárit tepelnou energii. Ale pokaždé, když jsem si už myslel, že výpočet je hotov, zjistil jsem, že vzorce pro chování molekul, jež jsem použil, jsou tím či oním způsobem chybné. Moje závěry tudíž byly špatné a musel jsem začít znova od začátku. Po čtyřletém úsilí od chvíle, kdy mě vedoucí mé diplomky Joe Silk přivedl k tomuto tématu, jsem byl už natolik frustrovaný, že jsem si chtěl dát vyrobit tričko s nápisem „nenávidím molekuly“ a obrázkem mé Nemesis, molekuly vodíku, přeškrtnuté velkým červeným znakem jako na značce zákazu kouření. Pak ale zasáhl šťastný osud: v Mnichově, kam jsem se přesunul jako postdoktorand, jsem potkal vstřícného studenta bakalářského studia Toma Abela, jenž zrovna dokončil vpravdě encyklopedické propočty všech molekulárních vzorců, které jsem potřeboval. Připojil se k našemu týmu spoluautorů a čtyřicet hodin nato jsme byli hotovi. Předpověděli jsme, že první galaxie ve vesmíru měly hmotnost „jen“ asi milionkrát větší než naše Slunce. Měli jsme tenkrát kliku, protože tento objev

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

v zásadě souhlasí s mnohem pečlivějšími počítačovými simulacemi, které dneska Tom provádí jako profesor na Stanfordově univerzitě.

NÁŠ VESMÍR BY MOHL EXPANDOVAT

Zjistili jsme, že velkolepé pozemské drama - v němž se generaci za generací rodí organismy, vzájemně se ovlivňují a nakonec hynou - započalo před zhruba 4,5 miliardami let. Navíc jsme objevili, že je to jenom jedna součást mnohem grandióznějšího dramatu, v němž se generaci za generací rodí galaxie, vzájemně se ovlivňují a nakonec hynou ve specifickém druhu kosmického ekosystému. Proč by nemohla existovat i třetí úroveň této dramaturgie, v níž by se rodily a hynuly dokonce celé vesmíry? Jsou nějaké náznaky, že také celý náš vesmír měl svůj počátek? A pokud ano, jak a kdy k němu došlo?

Proč nám galaxie nespádnou na hlavu? Odpověď na tuto otázku přinesla další posun poznání směrem do minulosti vesmíru. Viděli jsme, že Měsíc nespadne na zem, protože kolem nás obíhá velkou rychlostí. Náš vesmír je plný galaxií, které se doslova hemží všemi možnými směry, a je proto zřejmé, že stejné vysvětlení v tomto případě nefunguje: galaxie kolem nás většinou neobíhají. Kdyby náš vesmír byl věčný a ve své podstatě statický, takže vzdálené galaxie by se vůči nám moc nepohybovaly, nebylo by jasné, proč by na nás nakonec nespadly jako Měsíc, kdybychom ho zastavili na jeho orbitě kolem Země.

V Newtonových dobách samozřejmě lidé o galaxiích ještě nic nevěděli. A když cosi tušili, jako třeba Giordano Bruno meditující o nekonečném statickém vesmíru rovnoměrně vyplněném hvězdami, nemuseli mít příliš velké obavy z jejich pádu na nás sem dolů. Částečnou odpověď poskytly Newtonovy pohybové zákony: podle nich by na každou hvězdu působila velká (ve skutečnosti dokonce nekonečná) síla, a to v kterémkoli směru. Dalo se proto argumentovat, že všechny tyto navzájem opačné síly se vyruší, a hvězdy by tedy mohly zůstat stát na místě.

Tento argument vyvrátil v roce 1915 Albert Einstein, když přišel se svou novou teorií gravitace, obecnou teorií relativity. Einstein si uvědomil, že statický nekonečný vesmír, který je rovnoměrně vyplněný hmotou, se neřídí jeho čerstvě zformulovanými rovnicemi gravitace. Co tedy udělal? Samozřejmě se poučil z Newtonových smělejších extrapolací: nejprve se pokusil přijít na to, jaký typ vesmíru se *řídí* jeho gravitačními rovnicemi, a potom začal zjišťovat, zda jsou k dispozici pozorování, jež by mohla ověřit, zda v takovémto vesmíru opravdu žijeme. Zdá se být ironií osudu, že Einstein, jeden z nejtvořivějších vědců všech dob, který neustále zpochybňoval nikým nezpochybňované předpoklady a authority, opomenul zpochybnit tu největší známou autoritu: sám sebe a vlastní předsudek, že žijeme ve věčném a neměnném vesmíru. Místo toho pozměnil své rovnice gravitačního pole a přidal do nich dodatečný člen, který umožnil, aby vesmír byl statický a věčný. A je dvojnásobnou ironií, že přidání tohoto dodatečného členu, což později prý sám označil za velký omyl svého života, je z dnešního pohledu správné, protože reprezentuje kosmickou temnou energii (o níž budeme v knize dále hovořit), která nejspíš opravdu vyplňuje náš vesmír. Tento člen má ale jinou hodnotu, než tu, aby vesmír byl statický.

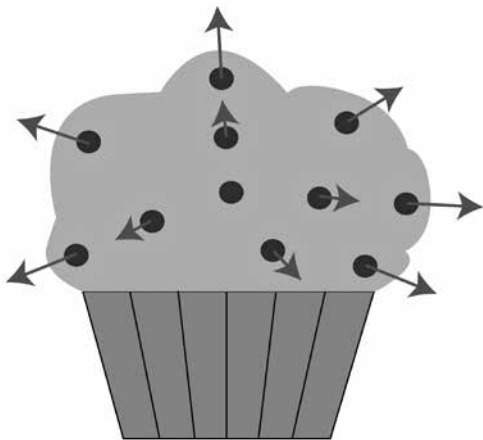
ODKUD SE VZALY GALAXIE?

Tim, kdo nakonec měl více důvěry a schopnost plně naslouchat Einsteinovým rovnicím, byl až ruský fyzik a matematik Alexander Friedmann. Rovnice vyřešil pro obecný případ vesmíru rovnoměrně vyplněného hmotou a objevil šokující věc: většina řešení *není* statická, ale mění se v čase! Einsteinovo statické řešení nejenže bylo výjimečné, ale navíc bylo nestabilní: téměř statický vesmír by dříve či později začal expandovat či naopak kolabovat. Stejně jako Newtonovo dílo ukázalo, že přirozeným stavem sluneční soustavy je pohyb (Země a Měsíc nemohou zůstat navždy stát na místě), tak Friedmannovo dílo ukázalo, že pohyb je přirozeným stavem i celého našeho vesmíru.

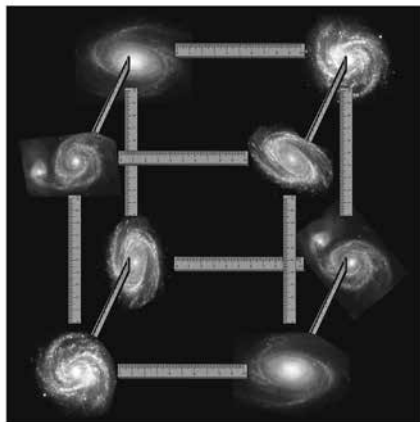
Ale jaký druh pohybu to přesně je? Friedmann objevil, že nejpřirozenější je, když žijeme ve vesmíru, který buď *expanduje*, anebo *se zmenšuje*. Expanze vesmíru znamená, že všechny daleké objekty se vzdalují navzájem jeden od druhého, jako rozinky v kynoucím těstě (obrázek 3.2). V takovém případě muselo být v minulosti všechno mnohem blíž u sebe. Opravdu, v nejjednodušších Friedmannových řešeních expandujícího vesmíru existoval jistý okamžik v minulosti, kdy vše, co dnes pozorujeme, bylo na jednom jediném místě, tedy ve stavu s nekonečnou hustotou hmoty. Jinak řečeno: náš vesmír měl počátek a toto zrození kosmu bylo kataklyzmatickou explozí čehosi nekonečně hustého. Zrodila se představa velkého třesku.

Reakcí na Friedmannův velký třesk bylo hluboké mlčení. Přestože jeho článek vyšel v jednom z nejprestižnějších německých časopisů pro fyziku a byl konzultován s Einsteinem i dalšími, byl nakonec téměř všemi ignorován a neměl skoro žádný dopad na tehdejší převládající názor ohledně uspořádání vesmíru. Ignorování nových a zásadních průlomů v poznání světa má v kosmologii (a obecně i v každé vědě)

galaxie se pohybují, prostor se nezvětšuje:



galaxie se nepohybují, prostor se zvětšuje:



Obrázek 3.2: Vzdálené galaxie se od sebe vzdalují jako rozinky v kynoucím těstě (vlevo): z pohledu kterékoli z nich se všechny ostatní pohybují přímo pryč, přičemž rychlost jejich vzdalování je úměrná vzdálenosti. Když si ale představíme, že náš prostor se celý rovnoměrně zvětšuje, tak jako kynoucí těsto, pak se galaxie vůči prostoru nepohybují, jen se všechny vzdálenosti rovnoměrně zvětšují (vpravo), asi jako kdybychom prostě jen přečíslovali značky na pravítku z milimetrů na centimetry.

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

dlouhou tradici. Již jsme se zmínili o Aristarchově heliocentrismu i o Brunových představách vzdálených slunečních soustav a spousta dalších příkladů nás na následujících stránkách knihy ještě čeká. Myslím, že ve Friedmannově případě šlo zčásti o to, že předběhl svou dobu: v roce 1922 byl tehdy známý vesmír tvořen v podstatě jen Mléčnou dráhou, naší vlastní Galaxií (ve skutečnosti jen tou její blízkou částí, kterou můžeme přímo vidět). A ta *neexpanduje*: stovky miliard jejích hvězd musí v důsledku vzájemné gravitační přitažlivosti obíhat po vázaných orbitách. Tím je dána odpověď na otázku číslo 9 ze seznamu uvedeného na začátku druhé kapitoly: **Zvětšuje se i Mléčná dráha?** Friedmannova expanze se vztahuje pouze na rozměry tak obrovské, že v nich můžeme ignorovat shlukování hmoty do galaxií a galaktických kup. Na obrázku 2.2 můžeme vidět, že prostorové rozložení galaxií se stává dosti uniformní na rozměrech o velikosti stovek milionů světelných let. Z čehož plyne, že Friedmannova řešení pro homogenní vesmír jsou na velkých škálách aplikovatelná a že všechny hodně daleké galaxie by se měly vzdalovat jedna od druhé. Jak jsme ale již uvedli, Hubble ukázal, že galaxie vůbec *existují*, až v roce 1925, tedy tři roky poté! Čas dal tedy nakonec Friedmannovi za pravdu. Bohužel, čas byl k němu i krutý: v tomtéž roce zemřel na tyfus, ve věku pouhých sedmatřiceti let.

Pro mne osobně patří Friedmann k největším nedoceneným hrdinům kosmologie. Když o tom teď píšu, nemohl jsem odolat a musel jsem si znova přečíst jeho článek z roku 1922. Všiml jsem si při tom, že končí popisem fascinujícího modelu obrovského vesmíru obsahujícího pět miliard bilionů slunečních hmotností. Odtud odvozuje stáří vesmíru na zhruba deset miliard let, což se řádově shoduje s dnešní hodnotou. Nikde nevysvětluje, jak k těmto číslům dospěl několik let předtím, než byly objeveny galaxie, ale každopádně jde o příhodný závěr pozoruhodného článku napsaného pozoruhodnou osobností.

NÁŠ VESMÍR OPRAVDU EXPANDUJE

Pět let nato se historie opakovala: absolvent MIT, belgický kněz a astrofyzik Georges Lemaître opět publikoval Friedmannovo řešení s velkým třeskem, o němž nevěděl a které znova nezávisle objevil. A znova ho převážná část vědecké komunity ignorovala.

To, co nakonec přimělo lidi, aby se myšlenkou velkého třesku začali zabývat, nebyla žádná nová teoretická práce, ale nová pozorování. Když Edwin Hubble ukázal, že galaxie existují, považoval za další přirozený krok zmapovat, jak jsou v prostoru rozloženy a jak se pohybují. V předchozí kapitole jsem se už zmínil, že obvykle je snadné zjistit, jak rychle se něco pohybuje směrem k nám či od nás, protože tento pohyb způsobuje posun spektrálních čar. Červené světlo má nejmenší frekvenci ze všech barev duhy, takže když se galaxie pohybuje od nás, barvy všech jejích spektrálních čar vykazují *červený posuv*, jsou posunuty dočervena. Čím větší je rychlost vzdalování, tím větší je posuv. Pokud by se galaxie pohybovala směrem k nám, její barvy by naopak vykazovaly *modrý posuv*, tedy k vyšším frekvencím.

Kdyby se galaxie pohybovaly víceméně náhodně, očekávali bychom, že zhruba polovina jich bude vykazovat červený posuv, zatímco druhá polovina naopak posuv

modrý. Je velmi překvapivé, že téměř všechny galaxie, které Hubble studoval, vykazovaly červený posuv. Proč se ale od nás všechny vzdalují? Copak nás nemají rády? Řekli jsme snad o nich něco ošklivého? Hubble navíc objevil, že čím větší je vzdálenost d dané galaxie, tím větší je rychlost v , s níž se od nás vzdaluje, tedy že platí vzoreček:

$$v = Hd$$

kteří je dnes nazýván *Hubbleův zákon*. Symbol H je takzvaný Hubbleův parametr, který Hubble ve svém přelomovém článku z roku 1929 skromně a bez ješitnosti označil K . Je pozoruhodné, že Georges Lemaître ve svém ignorovaném článku z roku 1927 ukázal, že expandující model vesmíru *předpovídá* Hubbleův zákon: jestliže se ve vesmíru vše od všeho vzdaluje, pak opravdu budeme pozorovat, že vzdálené galaxie od nás budou expandovat dle výše uvedeného vzorce.

Jestliže se galaxie vzdaluje přímo od nás, nejspíš to znamená, že v minulosti u nás byla hodně blízko. V jak daleké minulosti? Spatříte-li auto s lupiči, co vykradli banku, můžete odhadnout, kdy k přepadení banky došlo. Stačí vydělit vzdálenost od banky rychlostí jejich auta. Když provedeme totéž se vzdalujícími se galaxiemi, dá nám Hubbleův zákon stejný výsledek $d/v = 1/H$ pro úplně všechny galaxie! Podle dnešních měření odpověď zní $1/H \approx 14$ miliard let. Hubbleův objev tedy naznačuje, že před zhruba 14 miliardami let se muselo odehrát cosi velmi dramatického, kdy obrovská spousta hmoty musela být natěsnána na jednom místě, tedy ve stavu s obrovskou hustotou. Abychom ale získali přesnější informaci, musíme také zjistit, do jaké míry auto či vesmír v minulosti zrychlovaly či zpomalovaly, anebo se jen po opuštění místa činu pohybovaly stále stejnou rychlostí. Když dnes použijeme Friedmannovy rovnice a moderní měření, zjistíme, že příslušná korekce je docela malá, na úrovni pár procent: Po velkém třesku náš vesmír strávil zhruba první polovinu času zpomalováním expanze, zatímco druhou polovinu své existence začal naopak zrychlovat, takže korekce se navzájem víceméně vyruší.

JAK CHÁPAT EXPANZI VESMÍRU

Když vešly výsledky Hubbleových měření ve známost, přesvědčily i Einsteina. Náš vesmír začal oficiálně expandovat. Co to ale vlastně *znamená*, že vesmír expanduje? V tuto chvíli už jsme připraveni pustit se hned do čtyř otázek z úvodu druhé kapitoly.

Především: ***Opravdu se od nás galaxie samy vzdalují, anebo jenom expanduje prostor?*** Einsteinova teorie gravitace (obecná relativita) nám říká, že oba pohledy na věc jsou možné a že jsou navzájem ekvivalentní, jak ilustruje obrázek 3.2. Můžete si tedy svobodně myslet jedno nebo druhé, záleží jen na tom, co vám přijde intuitivnější.* Z jednoho pohledu (vlevo) se prostor nijak nemění, ale galaxie se vůči němu pohybují jako rozinky v těstě, které kyne, když jste do něj přidali kvasnice. Všechny

* Z matematického hlediska odpovídají tyto dva různé pohledy na věc dvěma různými způsoby zavedení prostorových souřadnic, přičemž Einsteinova teorie nám dovoluje k popisu použít libovolný souřadný systém prostoru i času.

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

galaxie/rozinky se díky tomu vzdalují jedna od druhé, přičemž vzdálenější páry se vůči sobě pohybují rychleji. Budete-li stát na kterékoli z nich, spatříte, že pohyb všech ostatních galaxií/rozinek splňuje Hubbleův zákon: jejich pohyb míří přímo od vás, přičemž ty, co jsou dvakrát dál, se budou vzdalovat dvakrát rychleji. Je pozoruhodné, že pozorování bude úplně stejné, nezávislé na tom, z jaké konkrétní galaxie nebo rozinky ho provádíte. Pokud se galaxie rozprostírají až do nekonečna, nebude mít expanze vesmíru žádný privilegovaný střed. Odevšad se bude expanze jevit naprosto stejně.

Z druhého možného pohledu je prostor cosi jako těsto, které kyne, a tudíž expanduje. Rozinky se vůči těstu ve svém bezprostředním okolí nepohybují a stejně tak se ani galaxie nepohybují v prostoru. Místo toho si můžeme představovat, že galaxie tvoří klidovou soustavu prostoru (obrázek 3.2 vpravo), všechny vzdálenosti mezi nimi se však neustále zvětšují. Jako kdyby se délkové značky na imaginárním kosmickém pravítku přečíslovaly na větší hodnoty, takže číselné hodnoty vzdáleností mezi galaxiemi už nebudou udávány v milimetrech, ale třeba v centimetrech: všechny mezigalaktické vzdálenosti budou rázem desetkrát větší, než bývaly.

To vysvětluje i druhou ze čtyř otázek: ***Neporušují galaxie, které se od nás vzdalují nadsvětelnými rychlostmi, teorii relativity?*** Z Hubbleova zákona $v = Hd$ plyne, že galaxie se od nás budou vzdalovat rychleji než rychlost světla c , jestliže od nás budou dále než $c/H \approx 14$ miliard světelných let. Není žádný důvod pochybovat, že takové galaxie opravdu existují. Není tím narušeno Einsteinovo tvrzení, že se nic nemůže pohybovat nadsvětelnou rychlostí? Odpověď zní „ano“ i „ne“: Einsteinova speciální teorie relativity z roku 1905 je opravdu narušena, ale nikoli jeho obecná teorie relativity z roku 1915. Protože obecná relativita je pozdější a představuje Einsteinovo definitivní stanovisko k danému problému, je všechno v pořádku. Obecná teorie relativity se k rychlostnímu limitu staví liberálněji. Zatímco speciální teorie relativity říká, že žádné dva objekty se *za žádných okolností* vůči sobě nemohou pohybovat nadsvětelnou rychlostí, obecná teorie relativity trvá pouze na tom, aby se vůči sobě nepohybovaly nadsvětelnou rychlostí, *když jsou zrovna na stejném místě*. Galaxie, které se od nás vzdalují nadsvětelnou rychlostí, jsou ale všechny velmi daleko od nás. Představu expandujícího prostoru můžeme parafrázovat tvrzením, že *prostorem* se nic nesmí pohybovat rychleji než světlo, ale prostoru samému je dovoleno zvětšovat se libovolnou rychlostí, jakou se mu zachce.

Když už mluvíme o vzdálených galaxiích: viděl jsem novinový článek, který se zmiňoval o galaxiích, jež jsou od nás až 30 miliard světelných let daleko. ***Jestliže je náš vesmír starý jenom 14 miliard let, jak je možné, že vidíme objekty, které jsou od nás vzdáleny 30 miliard světelných let?*** Kde vzalo jejich světlo dost času na to, aby k nám mohlo doletět? Navíc jsme si právě řekli, že objekty se od nás vzdalují nadsvětelnou rychlostí, takže tvrzení, že je vidíme, zní ještě podivněji. Řešení této záhady spočívá v tom, že vzdálené galaxie nevidíme tam, kde právě teď jsou, ale kde byly, když vyslaly světlo, které nás právě nyní dostihlo. Stejně jako vidíme Slunce takové, jaké bylo před osmi minutami na místě, kde bylo před osmi minutami, tak

ODKUD SE VZALY GALAXIE?

vidíme i vzdálenou galaxii takovou, jaká byla před 13 miliardami let na místě, kde tenkrát byla – což v té době bylo zhruba osmkrát blíže Zemi než dneska! Světlo z galaxie proto nikdy nepotřebovalo uletět prostorem větší vzdálenost než 13 miliard světelných let, aby nás dostihlo, poněvadž o zbytek se postaralo roztahování samotného prostoru. Je to podobné, jako když stoupáte po eskalátoru: sami uděláte deset metrových kroků, ale eskalátor vás přitom odveze celých dvacet metrů.

KAM SE ROZPÍNÁ NÁŠ VESMÍR?

Když se daleké galaxie od nás rychle vzdalují, nemůže při tom dojít k nějaké gigantické kosmické dopravní nehodě? Nemohou do něčeho narazit? Jestliže se náš vesmír rozpíná v souladu s Friedmannovými rovnicemi, žádný takový problém neexistuje. Jak ukazuje obrázek 3.2, expanze vesmíru vypadá stejně z kteréhokoli místa, takže žádná problematická místa kolizí v něm nejsou. Jestliže se na věc díváme tak, že se galaxie pohybují statickým prostorem, pak ke kolizím nemůže dojít, protože vzdálenější galaxie se pohybují rychleji než ty bližší: starou škodovkou prostě nemůžete ze zadu narazit to uhánějícího porsche. Jestliže expanzi vesmíru naopak chápeme tak, že se rovnoměrně roztahuje sám prostor, pak vysvětlení tkví prostě v tom, že objem vesmíru se nezachovává. Protože v televizi pořád sledujeme zprávy ze Středního východu, přivykli jsme faktu, že není možné získat pro sebe více životního prostoru, aniž byste ho neukradli někomu jinému. Obecná relativita ale říká pravý opak: v určité oblasti mezi galaxiemi lze vytvořit větší objem, aniž by tento nový objem svou expanzí zabral jiné oblasti. Nový větší objem prostě stále zůstává mezi zmíněnými galaxiemi (obrázek 3.2 vpravo).

KOSMICKÁ UČEBNA

Jinak řečeno: může to znít bláznivě a v rozporu se selským rozumem, ale představa expandujícího vesmíru je nejen logická, ale také v plném souladu s astronomickými pozorováními. Observační důkazy ve prospěch této myšlenky jsou ve skutečnosti daleko silnější, než byly v dobách Edwina Hubblea. Vděčíme za to moderním technologiím a novým objevům, jež popíšeme v další části knihy. Zásadním faktem je, že dokonce i celý náš vesmír se mění: vydáme-li se na samé hranice poznaného světa miliardy let proti proudu času, spatříme vesmír, který byl mnohem menší, a tudíž daleko hustší a více zaplněný. To znamená, že prostor, který obýváme, rozhodně není nudný statický prostor, jak ho kdysi axiomatizoval Eukleides, ale velmi dynamický a vyvíjející se prostor, jenž měl své specifické dětství – a nejspíš před 14 miliardami let i zvláštní formu zrození.

Neporovnatelně výkonnější dalekohledy pomohly v nedávné době výrazně zlepšit náš pohled na vesmír, takže dnes vidíme vyvíjející se kosmos přímo a zřetelně i do velkých hlubin. Představte si, že přednášíte ve velké posluchárně. Znenadání si uvědomíte, že publikum je docela zvláštní. V předních řadách nejbliže k vám sedí lidé, kteří jsou zhruba stejně staří jako vy. Kolem desáté řady ale spatříte jenom samé náctileté středoškoláky. Za nimi je skupina dětí ze základní školy a za nimi

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

pak řada obsazená předškoláky a batolaty. Úplně vzadu jsou samá miminka. Poslední řada sedadel posluchárny je, jak se zdá, úplně prázdná. A s naším vesmírem je to podobné: když do něj hledíme našimi nejlepšími dalekohledy, v nejbližším okolí vidíme spoustu velkých a dospělých galaxií podobných té naší, hodně daleko však pozorujeme většinou jen malé mladé galaxie, které vypadají, že ještě nejsou plně vyvinuté. Za nimi pak nejsou vůbec žádné galaxie, jenom temnota. Protože světlu trvá delší dobu, než k nám doletí z větších hloubek vesmíru, znamená to, že pohled do velké vzdálenosti je současně i pohledem do velké minulosti. Temnota za nejvzdálenějšími galaxiemi tedy vyznačuje epochu vývoje vesmíru před tím, než se zformovaly první galaxie. V té době byl prostor vyplněn jen oblaky vodíku a helia, neboť gravitace dosud neměla dost času, aby je zhuстила do podoby galaxií. A protože jsou tato oblaka plynu průhledná, v našich dalekohledech je nevidíme.

Je tu ale i cosi tajemného: během své přednášky si najednou uvědomíte, že zpoza poslední prázdné řady přichází určitá forma energie: zadní stěna posluchárny není úplně tmavá, ale vydává slabou mikrovlnnou záři! Proč? Vypadá to zcela bizarně, ale přesně tohle pozorujeme, když hledíme do největších hlubin našeho vesmíru. Abychom to pochopili, nezbývá nám, než se vydat ještě mnohem dále proti proudu času.

ODKUD SE VZALO ZÁHADNÉ MIKROVLNNÉ ZÁŘENÍ?

Hlavním poučením, jež nám poskytli Newton s Friedmannem, je jednoduchá mantra: „Odvažte se extrapolovat!“ Konkrétně to znamená následující: vezměte dnešní znalosti fyzikálních zákonů, aplikujte je na novou, dosud neprobádanou situaci a podívejte se, jestli nedávají nějakou zajímavou předpověď, kterou bychom mohli zkusit ověřit pozorováním. Newton vzal pohybové zákony, které Galileo našel tady na Zemi, a extrapoloval je na Měsíc a planety. Friedmann vzal zákony pohybu a gravitace, které Einstein našel tady ve sluneční soustavě, a extrapoloval je na celý vesmír. Mohli byste si myslet, že vzhledem k úspěšnosti zmíněné mantry bude ve vědecké komunitě silně rozšířená a zakořeněná jako mem. Zejména byste si mohli myslet, že po roce 1929, kdy byla Friedmannova myšlenka expandujícího vesmíru přijata, se budou vědci celého světa doslova předhánět v systematickém studiu toho, co dostaneme při extrapolaci fyziky nazpátek v čase. Nuže, mohli byste si to myslet, ale totálně byste se mýlili... Bez ohledu na to, že my vědci o sobě rozhodným hlasem prohlašujeme, že jsme racionální hledači pravdy, ve skutečnosti jsme stejně jako kdokoli jiný náchylní k lidským slabostem, mezi něž náleží předsudky, tlak okolního prostředí a touha souznít s davem. Překonat je vyžaduje zjevně mnohem více schopností než pouhý talent k výpočtům.

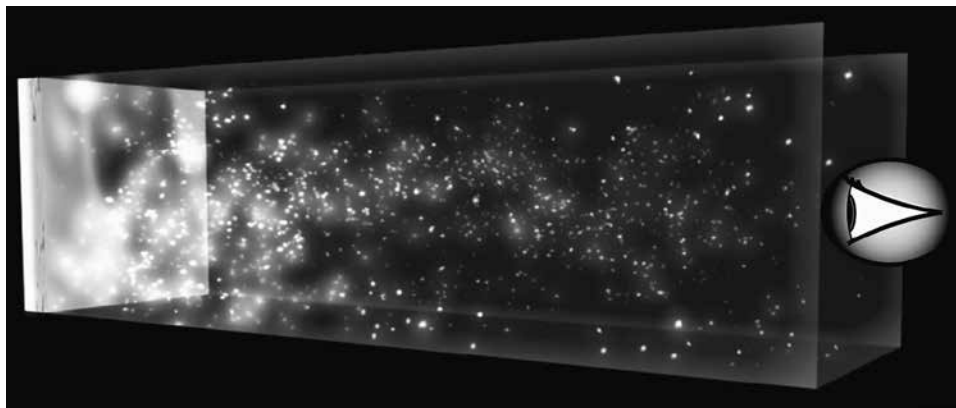
Mým dalším kosmologickým superhrdinou je proto další Rus: George Gamow. Jeho školitelem během doktorských studií v Leningradě nebyl nikdo jiný nežli Alexander Friedmann, a třebaže Friedmann záhy zemřel, jeho myšlenky i intelektuální odvaha přežily právě v Gamowovi.

ODKUD SE VZALO ZÁHADNÉ MIKROVLNNÉ ZÁŘENÍ?

KOSMICKÁ PLAZMOVÁ OBRAZOVKA

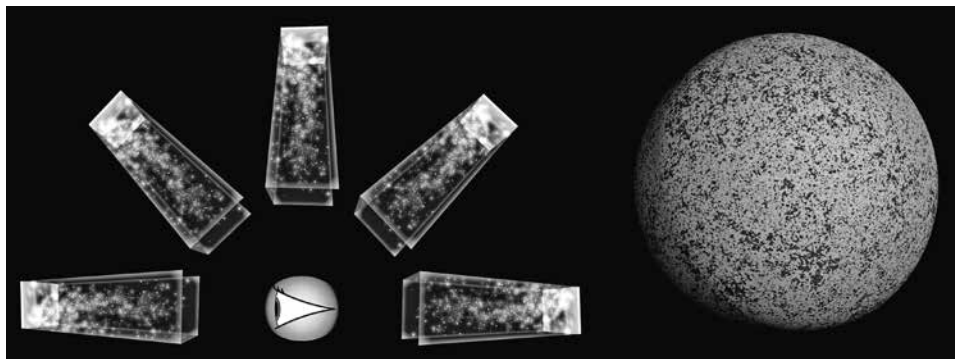
Jestliže se nyní náš vesmír rozpíná, pak v minulosti musel být mnohem hustší a zaplněnější. Expandoval však vždycky? Třeba ne: Friedmannova práce v principu připouštěla i možnost, že náš vesmír se kdysi zmenšoval a veškerá k sobě se blížící hmota plynule zpomalovala kolaps, zastavila ho a potom začala vše naopak urychlovat směrem od sebe. Takovýto „kosmický odraz“ by však mohl nastat jen v případě, kdyby hustota hmoty byla neporovnatelně menší, než kolem sebe opravdu pozorujeme. Gamow se rozhodl systematicky prozkoumat jinou možnost, která je ještě obecnější a také mnohem radikálnější: neustálá expanze již od samého začátku. Jak vysvětlil ve své knize z roku 1946, z takového předpokladu plyne následující obraz: Představíme-li si kosmické drama jako film a začneme ho přetáčet pozpátku, spatříme, že hustota hmoty v našem vesmíru poroste nade všechny meze. Protože mezigalaktický prostor je vyplněn vodíkem, bude se tento plyn při pohledu do minulosti stále více stlačovat a bude čím dál žhavější. Budete-li zahřívat kostku ledu, rozpustí se. Budete-li zahřívat tekutou vodu, přemění se v plynnou páru. A podobně, budete-li zahřívat plynný vodík, přemění se ve čtvrté skupenství hmoty zvané plazma. Proč? Inu, vodíkový atom je složený z elektronu obíhajícího kolem protonu a vodíkový plyn je jen velký soubor takovýchto atomů, které do sebe neustále narážejí. S rostoucí teplotou se atomy pohybují stále rychleji a narážejí do sebe s větší razancí. Vzroste-li teplota nad určitou mez, nárazy budou už tak divoké, že se atomy rozpadnou a elektrony i protony se vydají každý svou cestou – vodíkové plazma je prostě taková žhavá polévka volných elektronů a protonů.

Jinak řečeno, Gamow předpověděl, že náš vesmír začal žhavým velkým třeskem a že plazma kdysi vyplňovalo veškerý prostor. Obzvláště zajímavé na tom je, že jeho



Obrázek 3.3: Protože vzdálenému světlu trvá určitou dobu, než k nám doletí, je pohled do velké vzdálenosti vesmíru současně pohledem do jeho minulosti. Za nejdálenějšími galaxiemi vidíme neprůhlednou stěnu žhnoucího vodíkového plazmatu, jehož záři trvalo téměř 14 miliard let, než k nám doletěla. Je to stejný vodík, který i dnes vyplňuje kosmický prostor, ale před 14 miliardami let, když byl vesmír starý jen zhruba 400 000 let, byl vodík velmi horký, takže tvořil plazmatické skupenství. (Modifikace obrázku převzatého z NASA/WMAP team.)

3. NAŠE MÍSTO V ČASE



Obrázek 3.4: Vypadá to, jako bychom byli uprostřed gigantické plazmové sféry, protože plazmovou stěnu z předchozího obrázku vidíme, ať se podíváme kterýmkoli směrem.

předpověď lze otestovat: zatímco chladný vodíkový plyn je průhledný a neviditelný, žhavé vodíkové plazma je neprůhledné a zářivě žhne jako povrch Slunce. To znamená, že zahledíme-li se hluboko do vesmírného prostoru, jak je znázorněno na obrázku 3.3, měli bychom nejprve spatřit staré blízké galaxie, za nimi pak mladé galaxie, potom průhledný vodíkový plyn a nakonec zářící stěnu vodíkového plazmatu. Za touto žhnoucí stěnou nemůžeme spatřit už nic, protože je neprůhledná a jako velký kosmický cenzor nám brání spatřit, co bylo předtím. Jak navíc ukazuje obrázek 3.4, toto bychom měli spatřit *v každém* směru, neboť podíváme-li se kamkoli, hledíme vždy stejným způsobem nazpět v čase. Vypadá to, jako bychom byli obklopeni gigantickou plazmovou obrazovkou sférického tvaru.

Ve své knize z roku 1946 Gamow svou teorií velkého třesku také předpověděl, že onu plazmovou sféru bychom měli být schopni pozorovat. Svým studentům Ralphu Alpherovi a Robertu Hermanovi zadal, aby problém detailněji prostudovali. O pár let později pak publikovali společný článek, ve kterém předpověděli, že záře by měla mít teplotu 5 stupňů nad absolutní nulou. To znamená, že by mělo jít spíše o mikrovlnné záření, nikoli o viditelné světlo. Bohužel se jim ale nepodařilo přesvědčit žádného astronoma, aby po tomto kosmickém mikrovlnném záření z pozadí celé oblohy začal pátrat. Jejich práce tak postupně upadla v zapomnění, podobně jako kdysi Friedmannův objev expandujícího vesmíru.

DOSVIT VELKÉHO TŘESKU SPATŘEN

Kolem roku 1964 si skupina vědců na Princetonské univerzitě uvědomila, že tento pozorovatelný mikrovlnný signál z počátku vesmíru by měl opravdu existovat, a naplánovali observační pátrání po něm. Prohráli však souboj s časem. Ve stejném roce totiž Arno Penzias a Robert Wilson testovali zbrusu novou mikrovlnnou anténu v Bellových laboratořích v New Jersey a objevili cosi podivného: jejich teleskop zaznamenával signál, který nedokázali vysvětlit, přičemž signál byl stále stejný, ať se podívali na kterékoli místo oblohy. To bylo opravdu divné! Čekali, že naměří nějaký signál jen tehdy, když zamíří radioteleskop na určitý objekt na obloze, třeba na Slunce

anebo na uměléou družici vysílající či odrážející mikrovlny. Místo toho však zjistili, že rovnoměrnou mikrovlnnou záři vydává celá obloha a že teplota tohoto záření je 3 stupně nad absolutní nulou, tedy hodně blízko hodnotě 5 stupňů, kterou předpověděla Gamowova skupina. Velmi pečlivě zkontrolovali všechny možné lokální zdroje rušení, chvíli dokonce podezírali holuby, kteří se usídlili v teleskopu a zanechali v něm svůj trus. Před nějakou dobou jsem obědval s Arnem, a ten mi při té příležitosti vyprávěl, že holuby i s krmením dali do dřevěné bedny a odeslali ji na hodně vzdálené pracoviště Bellových laboratoří, s pokynem, že tam mají holuby vypustit. Naneštěstí se jednalo o holuby poštovní, kteří dokázali najít cestu zpět. Arnova kniha jen lakonicky konstatuje, že po tomto návratu holuby „eliminováli“. Po několika skleničkách vína jsem ho donutil odhalit chmurnou pravdu: byla k tomu použita brokovnice. Holubi sice byli pryč, ale záhadný signál zůstal: podařilo se jim objevit reliktní mikrovlnné záření, slabý dosvit velkého třesku.

Objev způsobil doslova senzaci a vynesl jim v roce 1978 Nobelovu cenu za fyziku. Z výpočtů Gamowa a jeho studentů plynulo, že plazmatická sféra na obrázku 3.4 musela mít teplotu zhruba poloviční nežli povrch našeho Slunce a že záření muselo cestovat prostorem asi 14 miliard let, než nás dostihlo. Během oné doby zchladlo na tisícinu výchozí teploty, na dnes pozorované 3 stupně Kelvina, protože prostor se mezitím tisíckrát zvětšil. Jinak řečeno: kdysi dávno byl náš celý vesmír žhavý jako hvězda, a odvážná extrapolace Gamowovy teorie velkého třesku do tisícínásobné hodnoty byla tak otestována a potvrzena.

OBRÁZKY Z RANÉHO DĚTSTVÍ NAŠEHO VESMÍRU

Když byla tímto způsobem detekována vzdálená sféra raného plazmatu, úsilí se soustředilo na to, kdo jako první pořídí její snímek. Protože teplota záření byla prakticky stejná ve všech směrech, snímky Penziase a Willsona vypadaly jako ony humorné pohlednice s nápisem „San Francisco v mlze“, kde není nic jiného než bílá plocha. Abychom získali opravdu zajímavé snímky čerstvě zrozeného vesmíru, bylo nutné zvýšit kontrast, tedy schopnost detekovat nepatrné odchylky teploty záření v různých směrech. Anizotropie musely existovat, protože kdyby v minulosti panovaly ve vesmíru úplně stejné podmínky, fyzikální zákony by je udržely stejné i do dnešní doby. To je však v příkrém rozporu s naším dnešním pozorováním: vesmír je plný galaxií a dalších nerovnoměrností v rozložení hmoty.

Pořídít ale snímky čerstvě zrozeného vesmíru nebylo vůbec jednoduché. Trvalo téměř třicet let, než se podařilo vyvinout příslušné technologie. Aby Penzias s Wilsonem potlačili šum detekční aparatury, museli svůj detektor chladit kapalným heliem, jež má teplotu srovnatelnou s teplotou reliktních mikrovln. Fluktuace záření, tedy odchylky jeho teploty na různých místech oblohy, jsou však ještě nepatrnější, zhruba jen tisícina procenta. K pořízení snímku raného vesmíru je tedy zapotřebí stotisíckrát větší citlivosti, nežli měla Penziasova a Wilsonova aparatura. Experimentátoři z různých koutů světa to zkoušeli, ale neuspěli. Mnozí tvrdili, že jde o nezvládnutelný úkol, ale někteří se nevzdali. Dne 1. května 1992, když jsem

3. NAŠE MÍSTO V ČASE

byl zhruba v půlce svých studií na univerzitě, se internetem, který byl tehdy ještě v plenkách, začaly šířit zvěsti, že se George Smoot chystá oznámit výsledky svého zatím nejmambicióznějšího experimentu: pomocí satelitu COBE, který vypustila NASA, pátral v mrazivé pustině kosmického prostoru po odchylkách v reliktním mikrovlnném záření. Vedoucí mé doktorské práce Joe Silk měl uvést Georgeovu přednášku. Než odletěl do Washingtonu, D. C., zeptal jsem se ho, jaké jsou podle něj šance na úspěch. Joe tipoval, že se žádné fluktuace objevit nepodařilo a že znamenali jenom rádiový šum naší Galaxie.

Jenže namísto nudné přednášky oznamující neúspěšné pátrání George Smoot doslova odpálil bombu, která totálně změnila nejen moji budoucí profesionální kariéru, ale doslova celou kosmologii! Se svým týmem objevil teplotní fluktuace reliktního mikrovlnného záření! Stephen Hawking jim vzdal hold slovy, že jde o „nejdůležitější objev století, a možná všech dob“. Neboť, jak záhy uvidíme, pořízený snímek mladičkého vesmíru, když mu bylo jen 400 000 let, v sobě skrývá zásadní klíče k poznání našeho kosmického původu.

ZLATÁ HOREČKA

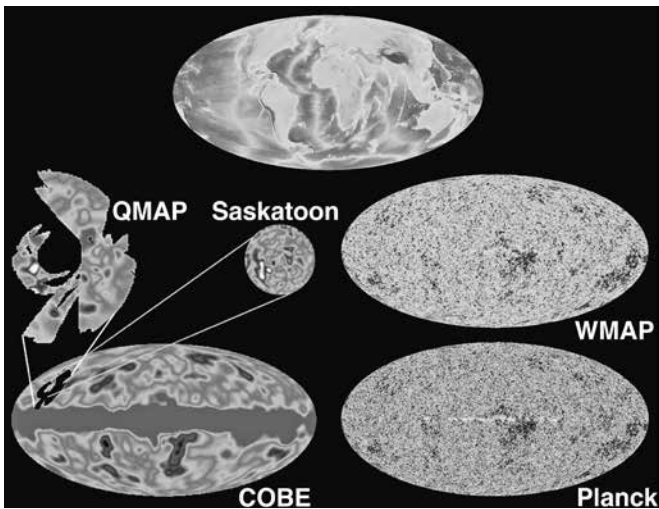
Když COBE nyní narazilo na zlatou žílu, vypukla divoká zlatá horečka ve snaze vydolovat z ní co nejvíce. Jak můžete vidět na obrázku 3.5, mapa oblohy pořízená COBE je dost rozmazaná, protože nízké rozlišení měřicí aparatury rozmylo vše, co je menší než zhruba 7 úhlových stupňů. Dalším přirozeným krokem tedy bylo podívat se podrobněji v daleko větším rozlišení a s menším šumem na menší části oblohy. Jak vysvětlím později, takové mapy s větším rozlišením v sobě skrývají odpovědi na základní kosmologické otázky. Už od doby, kdy jsem si ve dvanácti letech roznášením reklam po Stockholmu našetřil na svůj první fotoaparát, miluji fotografování, takže pořizování snímků našeho raného vesmíru mě instinktivně vzalo za srdce. Také si moc rád hraju s obrázky a počítačovou grafikou, ať už šlo zprvu o školní časopis *Curare* anebo o sharewarovou počítačovou hru FRAC, trojrozměrný klon známého Tetrisu, jímž jsem si vydělal na svou cestu kolem světa v roce 1991. Byl jsem proto opravdu šťastný, když mě různí experimentátoři postupně přibrali do svých týmů, abych pomohl převádět jejich data do přehledné podoby map oblohy.

První šťastnou náhodou bylo moje setkání s Lymanem Pagem, mladým profesorem z Princetonu. Oblíbil jsem si jeho klukovský úsměv, díky němuž jsem překonal ostych a po jedné jeho konferenční přednášce se ho zeptal, jestli bych s ním nemohl spolupracovat. A oblíbil jsem si ho ještě víc, když jsem se dozvěděl, že než začal studovat na univerzitě, strávil několik let plavením se na plachetnici po Atlantiku. Nakonec mi svěřil data pořízená mikrovlnným teleskopem v kanadském městě Saskatoon. On a jeho skupina tímto přístrojem tři roky proměřovali oblohu přímo nad severním pólem.

Ukázalo se, že převést naměřená data do podoby mapy vůbec není jednoduché, protože nejde o snímky oblohy, ale o dlouhé tabulky čísel udávajících, kolik voltů bylo naměřeno sčítáním a odčítáním různých částí oblohy, a to poměrně složitým

ODKUD SE VZALO ZÁHADNÉ MIKROVLNNÉ ZÁŘENÍ?

způsobem. Zjistil jsem ale, že je to i překvapivě zajímavý úkol vyžadující, abych použil všechny své znalosti z informatiky a počítačového zpracování dat. Po mnoha večerech strávených v mé mnichovské pracovně, kde jsem byl postdoktorandem, jsa poháněn dávkami müsli, se mi podařilo dokončit mapu uvedenou na obrázku 3.5, a to právě včas, abych stihl svou přednášku na velké kosmologické konferenci ve Francouzských Alpách. Přestože jsem od té doby absolvoval již stovky různých přednášek, tato patří mezi nemnoho z nich, jež mi utkvěly v paměti jako magický moment, který potěší, kdykoli si na něj vzpomenu. Když jsem vstoupil na pódium a rozhlédl se, srdce se mi rozbušilo. Místnost byla přeplněná lidmi. Mnohé z nich jsem znal podle jmen z článků a většina jich neměla nejmenší tušení, kdo jsem. Na konferenci přijeli spíš proto, aby si skvěle zalyžovali, než aby poslouchali úplně zelenáče, jako jsem byl já. Ale nevnímám jsem jen tlukot svého srdce: v místnosti bylo cítit i napětí a vzrušení. Přítomní dychtili po všem, co se týkalo nových objevů kolem reliktního mikrovlnného záření, a já se cítil poctěn a dojat, že mohu být malou částí toho všeho. Byl rok 1996, éra pravěku, kdy jsme přednášky ještě psali na průhledné fólie do zpětného projektoru. Na konci přednášky jsem pak z rukávu vytáhl své eso: fólii s obrázkem saskatoonské mapy, stejnou, jako je na obrázku 3.5 ve výřezu mapy COBE. Cítil jsem, jak sálem proběhla vlna vzrušení, a o přestávce se kolem mne a projektoru shromáždila početná skupinka lidí, kteří si chtěli obrázek



Obrázek 3.5: Vytváříme-li mapu celé oblohy, je užitečné ji promítnout do roviny, jako když kreslíme mapu kulaté zeměkoule (nahore), jenom místo koukání dolů na Zem se díváme vzhůru na oblohu. „Obrázek z raného dětství našeho vesmíru“, který pořídila družice COBE (vlevo dole), byl dost rozmazaný, což motivovalo řadu dalších experimentů, aby se soustředily na menší části oblohy s vyšším rozlišením (vlevo uprostřed), než nám nakonec kosmické sondy WMAP a Planck poskytly podrobné snímky celé oblohy (vpravo), které mají rozlišení tři megapixely, respektive padesát megapixelů. Uvedené mapy oblohy jsou orientovány tak, že delší podélná osa odpovídá rovině naší Galaxie (šedý pruh dole vlevo), nikoli rovníku Země: severní pól Země míří zhruba do středu mapy ze Saskatoonu. (Mapa Země převzata od Patricka Dineena.)