KAPITOLA 2.

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 všetečnýma 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 pesimističtějším, 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 zvídavostí, 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.

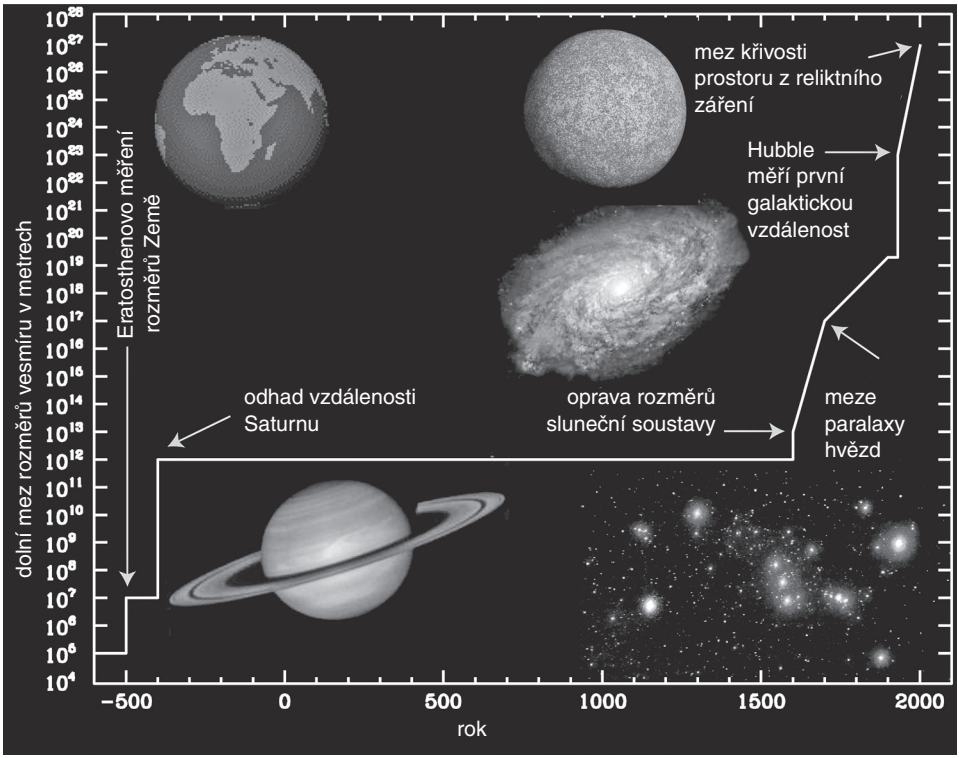
Zbožňuji otázky. Hlavně ty zásadní. Mám vážně štěstí, že mohu trávit takovou spoustu času potýkáním se se zajímavými otázkami. Pokládám za ohromné štěstí, jež předčilo všechna moje očekávání, že tahle aktivita se stala mojí profesí a že se jí dokonce mohu živit. Zde je můj seznam šestnácti hlavních otázek,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

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 inflací 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?

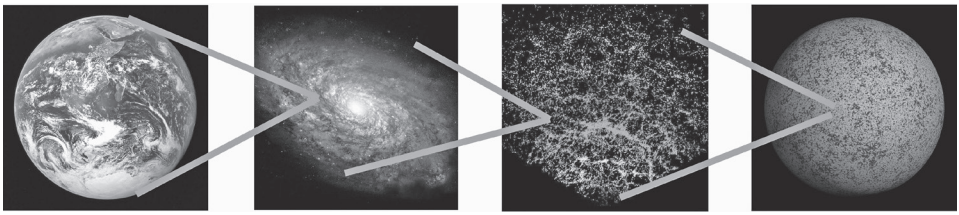
Táta mi kdysi dal tuto radu: „Dostaneš-li těžkou otázku, na kterou neumíš odpovědět, pusť se nejdřív do lehčí otázky, na kterou odpovědět umíš.“ Začněme tedy v tomto duchu a položme si lehčí otázku: jaký je nejmenší možný rozměr prostoru kolem nás, který není v rozporu s žádným pozorováním? Obrázek 2.1 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.



Obrázek 2.1: Jak popíšeme v této kapitole, náš dolní odhad rozměrů vesmíru stále rostl. Povšimněte 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 nahoře 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



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 zem 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 předkrm před hlavním chodem, jímž budou nejnovější 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.

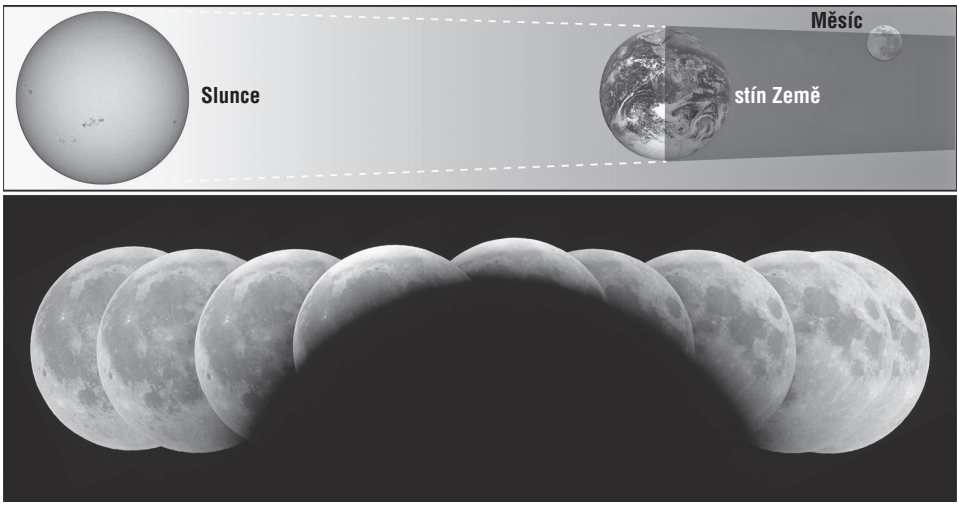
* Poloměr Země je přibližně $d^2/2h$, kde d je největší vzdálenost, na kterou ještě můžete vidět plachtu výšky h nad úrovní moře.

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 km × 360°/7,2° ≈ 39 700 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 poskytují 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 několikanásobně 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 velikosti zemského stínu během zatmění Měsíce a dospěl ke správnému závěru, že Měsíc je zhruba čtyřikrát menší než Země. *(Fotografickou sekvenci pořídil Scott Ewart.)*

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.

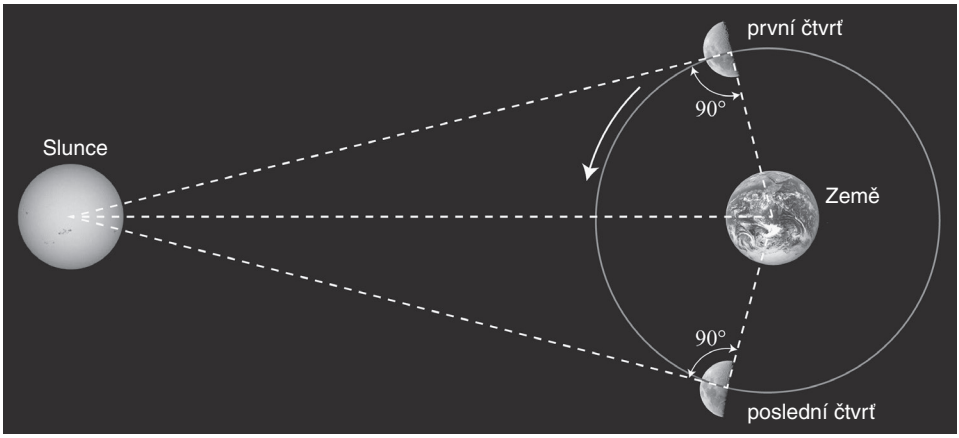
Jeden vědecký průlom často přináší další. V tomto případě určení velikosti Měsíce ihned umožnilo stanovit jeho vzdálenost. Natáhněte před sebe paži a podívejte se, jaké věci ve vašem okolí dokáže zakrýt malíček. Váš nejmenší prst pokrývá úhel zhruba jeden stupeň, což je přibližně dvojnásobek toho, co 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 × 50 m = 6 km. A úplně stejným způsobem Aristarchos spočítal, že vzdálenost k Měsíci je 115krát větší než jeho rozměr, což odpovídá asi třicetinásobku 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 chytře 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 pravoúhlého 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 pětkrát 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



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 tahle 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.

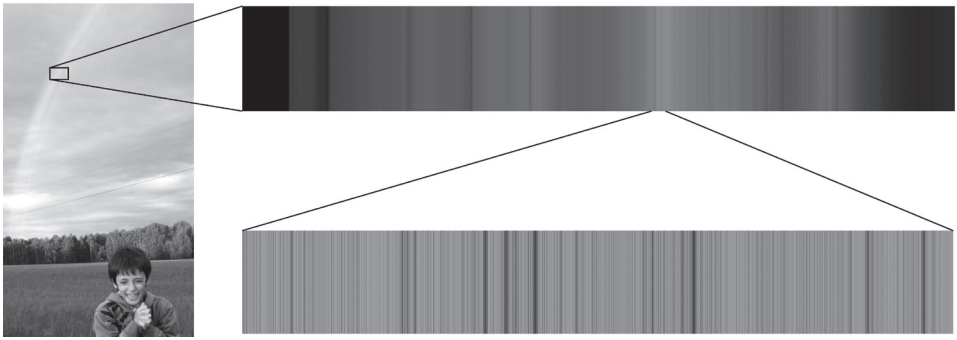
Kdybyste měli oči víc od sebe, mohli byste lépe vnímat vzdálenost objektů, které jsou mnohem dál. Stejný trik s paralaxou proto využíváme v astronomii. Chováme se jako obři, jejichž oči jsou od sebe vzdáleny 300 miliard metrů, což je dvojnásobek poloměru dráhy Země kolem Slunce. Prakticky to provádíme 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

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 bíle 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.

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) *vrrruuum* 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 hrdi 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

z těch nejvzdálenějších. 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 jevily 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.

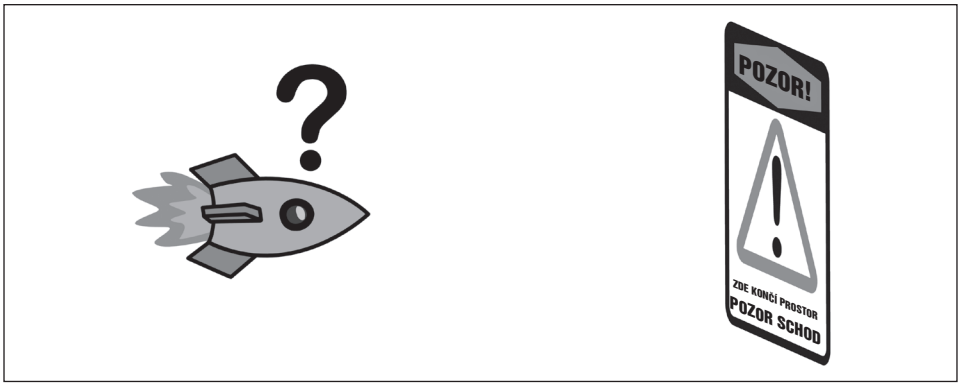
Cefeidy mají navíc tu výhodu, že jsou hodně jasné, takže je můžeme spatřit i na velké vzdálenosti (některé z nich jsou 100 000krát jasnější než Slunce). Americký astronom Edwin Hubble jich několik objevil v takzvané mlhovině v Andromedě, což je obláček o úhlové velikosti Měsíce, který můžete spatřit 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.

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

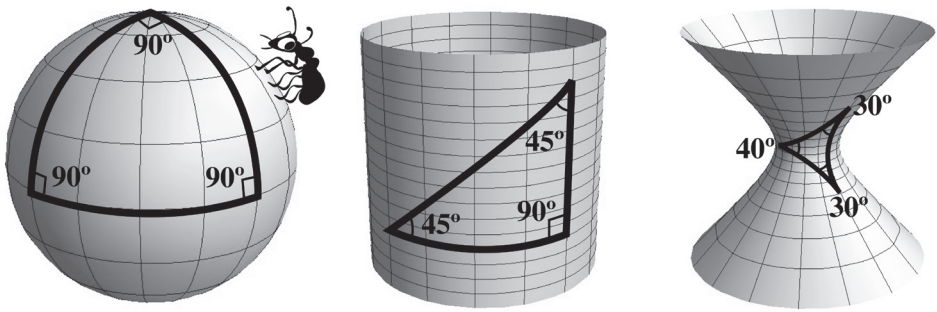


Obrázek 2.6: Je těžké představit si konec prostoru. Kdyby opravdu končil, co by leželo za ním?

nemusí činit 180 stupňů a tak dále. Představte si trojúhelníky nakreslené na dvourozměrných zakřivených plochách, jak je znázorněno na obrázku 2.7. Suma vnitřních 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 eukleidovské 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 prostě 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 definovat 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.

Většině 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 vystřihněte 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 potrhat 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,

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. Nestačí 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.