

BRITANNIA

ELEGANTNÍ VESMÍR

SUPERSTRUNY, SKRYTÉ ROZMĚRY
A HLEDÁNÍ FINÁLNÍ TEORIE

NAKLADATELSTVÍ PASEKA

ELEGANTNÍ VESMÍR

SUPERSTRUNY,
SKRYTÉ ROZMĚRY
A HLEDÁNÍ FINÁLNÍ
TEORIE

NAKLADATELSTVÍ PASEKA

PŘELOŽIL LUBOŠ MOTL

Copyright © 2003, 1999 by Brian R. Greene
All rights reserved
Translation © Luboš Motl, 2001, 2013

ISBN 978-80-7432-461-1 (PDF)

Matce a památce otce, s láskou a vděčností

Předmluva k druhému vydání

Když jsem psal *Elegantní vesmír*, byl jsem si vědom toho, že se nemusí dočkat početného čtenářstva. Koneckonců kniha o nástrahách a triumfálních vítězstvích moderní výpravy po stopách nejhlubších přírodních zákonů není jistě tím, po čem sáhnou lidé na pláži nebo před usnutím. A u knihy, která k takovému abstraktnímu tématu přistoupí se záměrem zdůraznit vědu samotnou, a nikoli vědecké osobnosti nebo historické anekdoty, lze očekávat publikum ještě méně početné. Ale z toho jsem si moc hlavu nedělal, protože jsem si často říkal (připouštím, že poněkud melodramaticky), že i kdybych oslovil osobu jedinou a představil jí nové spektrum myšlenek a nový způsob, jak uvažovat o nás samotných a o našem místě ve vesmíru, už by to stálo za to. Mohlo by jít o mladého studenta, který se rozhoduje, co bude studovat, o profesionála, který si chce odpočinout od každodenní rutiny, nebo o důchodce, který si konečně našel čas, aby si přečetl o pokrocích vědy. Kdybych jim mohl pomoci na jejich cestě za novým pohledem na vesmír vynořující se z moderní fyziky, pak by úsilí věnované psaní *Elegantního vesmíru* nepřišlo vniveč. Tohle uvažování mi přinejmenším pomohlo překonat obtížná období, s nimiž se ne jeden autor musí vypořádat při práci na rozsáhlejší díle.

Opakovaně mně dodávali sílu i posluchači různých mých veřejných přednášek o relativitě, kvantové mechanice a o mém vlastním specializovaném oboru – teorii superstrun –, kteří byli uchváteni podivnými, možná až strašidelnými představami vynořujícími se na samé hladině nejnovějšího výzkumu. Vesmír, v němž je prostor a čas tvárný a poddajný, vesmír s dodatečnými rozměry, které nevidíme, vesmír, jehož tkanina se může roztrhnout, vesmír, v němž se všechno může skládat z vibrací ultramikroskopických smyček energie nazývaných strunami, to všechno byl vesmír, který naplňoval posluchače vzrušením a mnohé i touhou porozumět všemu hlouběji. *Elegantní vesmír* z těchto přednášek vyklíčil, poněvadž jsem si předsevzal napsat knihu, která pocit intimní znalosti vesmíru nabídne čtenářům bez formálního vzdělání v matematice a fyzice. Ani to, že první zástupce nakladatelství, jemuž jsem svůj plán představil, můj nápad hned odmítl – celkem pochopitelně se obával, není-li předmět knihy příliš specializovaný a nevhodný pro široký okruh

čtenářů –, nemohlo oslabit můj pocit jistoty, že v každé přednáškové místnosti, kde jsem o fyzice mluvil, byla atmosféra nabita nadšením. Téměř jsem ji viděl jiskřit.

Elegantní vesmír na tomto nadšení stavěl a odezva na knihu, která mi udělala velkou radost, byla důkazem, jak velké množství lidí touží poznat místo, jež je naším domovem. Utvrdila mě i ve víře, že fyzika autorům nabízí jedno z nejbáječnějších témat, jaká si lze představit. Všichni máme rádi dobrý příběh. Všichni se rádi necháme dráždit tajemstvím. Všichni fandíme outsiderovi, který se nevzdává tváří tvář mizivým nadějím, že uspěje. Tak či onak se každý z nás snaží, aby nám svět kolem dával smysl. A všechny tyto prvky lze v srdci moderní fyziky najít. Její příběh patří mezi ty nejmajestátnější – jde nakonec o vývoj celého vesmíru. Její tajemství patří mezi ta nejlépe strážovaná – chceme zjistit, jak se vesmír zrodil. Pravděpodobnost, že v pátrání uspějeme, patří mezi ty nejnižší – protože my dvounožci, kteří jsme na scénu vstoupili z kosmického hlediska před pouhým okamžikem, se snažíme odhalit záhady, které svět skrývá dlouhé věky. A hledáme taje, které patří k těm nejhlubším – chceme nalézt fundamentální zákony ovládající vše, co vidíme, i to, co nevidíme, od nejdrobnějších částic až k nejvzdálenějším galaxiím. Těžko si lze představit pro autora bohatší východisko.

Laici občas přehlížejí rozdíl mezi odrazujícím jazykem – matematikou –, v němž se fyzika vypracovává, a poutavými myšlenkami, s nimiž fyzika zápolí. Dopouštějí se však stejné chyby, jako kdybych se já sám snažil hodnotit *Dobrodružství Huckleberryho Finna* podle jeho řeckého překladu. Řeckou abecedu sice používám každý den, ale řecky neumím ani slovo, takže bych román jen stěží mohl pochopit a docenit. Analogicky je žádoucí z výkladu odstranit matematické překážky a představit moderní fyziku v jazyce nám všem dobře známém. A pak nejednoho čtenáře, který si myslel, že o vědu nemá zájem, náhle fyzika okouzlí. Svléknou-li se témata moderní fyziky z jejich technicky náročného krunýře, ukáže se naplno jejich univerzální hodnota, a to doslova.

Poslední dobou se toto tvrzení stává stále zřejmějším spolu s tím, jak se fyzika častěji objevuje v kulturním dění – existuje rostoucí počet divadelních, hudebních a výtvarných děl, která se moderní vědou inspirovala. Dokážu vyjmenovat téměř tucet čerstvých divadelních her, plnohodnotnou skladbu pro smyčcové kvarteto, celé spektrum filmů a filmových scénářů, operu a sérii obrazů a soch, které do různé míry vyjadřují, interpretují a rozpracovávají lidské drama, které cesta za vědeckým poznáním představuje. Tyto ozvěny vědy jsou báječné, ale nijak mě nepřekvapují. Vždycky mě oslovovalo výtvarné, divadelní i filmové umění a literatura, které zásadně ovlivnily mé vnímání toho, co je skutečné a důležité, a řada lidí, s nimiž jsem se setkal, se mnou tuto zálibu sdílí. A přesně tohle nejdalekosáhlejší objevy vědy z posledního století dokázaly. Nijak nepřeháníme, když říkáme, že relativita a kvantová mechanika přepsaly dříve vymyšlená pravidla reality a – zaspekulujeme-li si

o něco více – že teorie superstrun dnes znovu provádí podobnou revizi. Není divu, že umělci, spisovatelé, skladatelé a filmoví tvůrci zjišťují, že jejich vlastní práce může být v dokonalé harmonii s vědeckými objevy, které útočí na stávající obraz vesmíru.

V tomto vztahu mezi uměním a moderní fyzikou není umění pouhým příjemcem. Fyzikální objevy se do našeho kolektivního světového názoru včleňují pomalu. Ba i dnes, téměř po celém století, stále ještě většina lidí plně nedoceňuje experimentálně ověřená poučení, kterými nás obohatil Einstein nebo svět kvant. Tím, že umění odvážně uchopuje vědu a zužitkovává její vnitřní kouzlo v zábavných i dramatických dílech, stává se dokonalým médiem pro úplné začlenění vědy do rozmluvy, jíž se účastní celé lidstvo. Nacházíme dokonce vědou inspirovaná umělecká díla, která nabízejí nové podněty vědecké představivosti samotné a nějakým způsobem, nesnadno osvětlitelným, nás možná připravují na další krok v prohlubování našeho porozumění vesmíru. Je jisté, že přesměřují-li se světla reflektorů, která vědu osvětlují, z čistě rigorózního a číselně vyjádřeného výzkumu usilujícího o poznání na lidskou vnímavost a city, které nás obohacují a oslovují humánnějším, byť méně jednoznačným způsobem, získáváme nový a nesmírně mocný nástroj. Je-li věda široce vnímána jako neoddelitelná součást toho, co z nás činí lidské bytosti, posiluje se tak značně naše vlastní spojení s vesmírem; věda je doopravdy nití, kterou jsme všiti do tkaniny reality.

Léta uplynulá od prvního vydání *Elegantního vesmíru* byla, pokud jde o teorii superstrun, extrémně plodná, ale zatím nedošlo k oné revoluci, jež, jak očekávají mnozí, nás čeká za rohem. Z toho plynou důsledky dobré i špatné. Tím dobrým je fakt, že žádná část textu nezestárla ani neztratila význam. Kdybych knihu o strunové teorii psal dnes, pokryl bych stejné otázky, byť bych někde přidal a jinde zase ubral na důrazu, ale výsledek by se od textu *Elegantního vesmíru* z velké části příliš nelišil. Dvěma nejvýraznějšími změnami by byla nová kapitola o tom, že podle některých nových myšlenek jsou možná struny a dodatečné rozměry o něco větší, než se předpokládalo (o této možnosti se v době psaní *Elegantního vesmíru* pouze začínalo mluvit; zmínky o ní naleznete v několika poznámkách na konci knihy), a pojednání o geniální nové práci, která přináší přesnější (tzv. neporuchovou) formulaci strunové teorie. Až se začtete do 6., 8. a 12. kapitoly, nezapomeňte na to, že struny a dodatečné rozměry mohou být větší, než můj výklad naznačuje, a že se značně pokročilo ve formulaci přesných rovnic teorie strun (ačkoli se fyzikům zatím nepodařilo z těchto rovnic vytěžit rozřešení klíčových otázek, které si tyto kapitoly kladou).

To, že kniha nevyžaduje zásadní aktualizaci, je na druhé straně špatnou zprávou; to proto, že mnohé překážky, na něž kniha upozorňuje, ještě stále nebyly zdohány. Upřímně řečeno, ačkoli bychom si všichni přáli co nejrychlejší pokrok, pomalejší změny jsou spíše pravidlem než výjimkou. Strunová teorie

zápolí s těmi nejzákladnějšími otázkami teoretické fyziky, z nichž velká část se nachází za hranicemi toho, co mohou odhalit experimenty. Její úspěch by byl obrovským přínosem, protože některé z nejhlubších otázek by se mohly dočkat odpovědí. Pokrok však není myslitelný bez lopotné práce, trpělivosti, trochy štěstí a značného množství inspirace – a právě u těchto ingrediencí je nesmírně těžké být jen zhruba odhadnout, kolik času zaberou.

Možná kýžené hlubší úrovně poznání dosáhne už naše generace, možná nikoli. Možná se to poštěstí až pokolení našich vzdálených praprotomků. Jedno však víme jistě. Že se pravdu nedozvíme, pokud se o to nepokusíme. Vzhledem k tomu, že postgraduální studenti, kteří začínají s výzkumem, jsou stále talentovanější, bude mít věda k dispozici mnoho nadšených badatelů, kteří převezmou pochodeň a budou s ní mířit stále kupředu. Všichni se budeme i v nadcházejících letech snažit, a to usilovně, záhady vesmíru odkrýt.

Brian Greene, 2003

Předmluva

V posledních třiceti letech svého života hledal Albert Einstein neúnavně takzvanou jednotnou teorii pole – teorii schopnou popsat síly přírody v jediném, všezahrnujícím a koherentním rámci. Einsteina nemotivovaly věci, které často spojujeme s vědeckou aktivitou, jako je třeba objasňování toho či onoho dílu experimentálních údajů. Byl hnán vášnivou vírou, že nejhlubší pochopení vesmíru by odkrylo nejopravdovější div kosmu: jednoduchost a sílu principů, na nichž stojí. Chtěl osvětlit fungování vesmíru s jasností předtím nikdy nedosaženou a umožnit nám tak stanout v bázni před jeho čirou krásou a elegancí.

Einsteinovi se tento sen uskutečnit nepodařilo hlavně proto, že mu to nedopřály okolnosti. V jeho době bylo mnoho podstatných rysů hmoty neznámých nebo v nejlepším případě nedostatečně známých. Ale za poslední půlstoletí fyzici každé nové generace – metodou pokusu, omylu a občasného zabloudění ve slepých uličkách – vytrvale a na základě objevů svých předchůdců sestavovali stále úplnější obraz toho, jak funguje vesmír. A dnes, dlouho poté, co Einstein vyhlásil program hledání jednotné teorie a nakonec vyšel s prázdnýma rukama, fyzici věří, že konečně našli rámec pro sešití těchto střípků poznání do bezešvého celku – jediné teorie, která je v principu schopna popsat veškeré fyzikální jevy. A tato teorie, *teorie superstrun*, je tématem naší knihy.

Pokusil jsem se v *Elegantním vesmíru* zpřístupnit pozoruhodné poznatky z předních linií fyzikálního výzkumu širokému spektru čtenářů, zvláště těm bez hlubšího matematického a fyzikálního základu. Když jsem v posledních letech přednášel o teorii superstrun, přesvědčil jsem se o tom, jak mnoho lidí touží pochopit, co současný výzkum říká o fundamentálních zákonech vesmíru, jak tyto zákony žádají monumentální přestavbu našich představ o kosmu a které úkoly nás čekají na další cestě k finální teorii. Doufám, že vysvětlením velkých výsledků fyziky, sahajících zpět až k Albertu Einsteinovi a Werneru Heisenbergovi, a vylíčením toho, jak tyto objevy významně rozkvetly a zkošatěly po průlomových objevech naší doby, má kniha čtenáře obohatit a uspokojí jejich zvědavost.

Také doufám, že *Elegantní vesmír* přinese mnoho nového i čtenářům do jisté míry poučeným. Studentům a učitelům přírodních věd, jak alespoň věřím,

přinese krystalizaci jejich znalostí základního materiálu moderní fyziky, jako je speciální relativita, obecná relativita a kvantová mechanika, a nakazí je vzrušením těch, kdo hledají sjednocenou teorii. Lačnému čtenáři populárně-vědeckých knih jsem se pokusil vysvětlit mnohé pokroky v porozumění kosmu, které vyšly na světlo za poslední desetiletí a které vzbuzují naději. A kolegům z jiných vědeckých disciplín tato kniha, jak doufám, poctivě a vyváženě řekne, proč jsou strunoví teoretici z pokroku při hledání finální teorie přírody tolik nadšeni.

Teorie superstrun rozprostírá širokou síť v moři vědění. Je to předmět rozsáhlý a hluboký, který má co říct k mnoha základním objevům ve fyzice. A protože tato teorie sjednocuje zákony velkého a malého, zákony řídící fyziku těch nejvzdálenějších oblastí kosmu i titěrného smítka hmoty, nabízí mnoho cest, kterými k ní lze přistoupit. Ve své knize jsem se zaměřil na naše vyvíjející se chápání času a prostoru. Zjistil jsem, že tímto přístupem lze mnohé otázky dobře uchopit a sklidit tak bohatou úrodu fascinujících plodů v sadu klíčových nových objevů. Einstein ukázal, že se prostor a čas chovají neobyčejným a ohromujícím způsobem. Nynější výzkum v prvních liniích fyziky začlenil jeho objevy do obrazu kvantového vesmíru s několika skrytými rozměry svnutými do struktury kosmu – s dimenzemi, jejichž marnotratně propletená geometrie v sobě pravděpodobně skrývá klíč k některým z nehlubších otázek, jež kdy byly nastoleny. Ačkoli jde často o otázky nesmírně složité, lze je, jak uvidíme, uchopit za pomoci obyčejných analogií. A jakmile tyto myšlenky pochopíme, poskytnou nám překvapivý a revoluční pohled na vesmír.

V celé knize jsem se snažil stát blízko vědě, ale přesto poskytovat čtenáři – často právě prostřednictvím analogií a metafor – intuitivní pochopení toho, jak vědci k dnešní představě o kosmu dospěli. Přestože jsem se vyhnul technickému jazyku a rovnicím, bude se možná čtenář muset tam a onde zastavit a přemítat o té či oné kapitole nebo vysvětlení, aby tok myšlenek pochopil, neboť jde často o představy, které radikálně mění náš pohled na svět. Několik kapitolěk čtvrté části (zaměřených na nejnovější vývoj) je trochu abstraktnějších než zbytek knihy. Snažil jsem se čtenáře na tyto pasáže předem připravit, ale přesto jsem strukturoval text tak, že je lze přeletět nebo i vynechat s minimálními důsledky na logický tok knihy. Zařadil jsem i slovníček vědeckých výrazů pro rychlé a dostupné zopakování myšlenek uvedených v hlavním textu. Byť možná některý z čtenářů poznámky na konci rád vynechá, jeho hloubavější kolega tam najde rozvedení myšlenek, ujasnění idejí v textu zjednodušených a ten s matematickým výcvikem i pár technických exkurzů.

Dlužím mnoha lidem poděkování za jejich pomoc při psaní této knihy. David Steinhardt četl rukopis velmi pozorně, štědře mě zahrnoval návrhy na vylepšení a neocenitelně mě při psaní knihy povzbuzoval. David Morrison, Ken Vineberg, Raphael Kasper, Nicholas Boles, Steven Carlip, Arthur Green-

spoon, David Mermin, Michael Popowits a Shami Offen četli důkladně mé zápisky a nabídli podrobné připomínky a návrhy, které významně rozšířily moje podání. Celý rukopis nebo jeho část dále přečetli a poskytli radu a povzbuzení Paul Aspinwall, Persis Drelllová, Michael Duff, Kurt Gottfried, Joshua Greene, Teddy Jefferson, Marc Kamionkowski, Yakov Kanter, Andras Kovacs, David Lee, Megan McEwenová, Nari Mistry, Luboš Motl, Hasan Padamsee, Ronen Plesser, Massimo Poratti, Fred Sherry, Lars Straeter, Steven Strogatz, Andrew Strominger, Henry Tye, Cumrun Vafa a Gabriele Veneziano. Zvlášť bych chtěl poděkovat Raphaelu Gunnerovi, mimo jiné za kvalifikovanou kritiku v raném stadiu psaní, která pomohla knize jako celku, a Robertu Malleymu za jeho jemné, ale vytrvalé hecování, abych už přestal o knize přemýšlet a položil konečně „tužku na papír“. Steven Weinberg a Sidney Coleman poskytli hodnotné rady a pomoc a je pro mě radostí ocenit i mnohá užitečná setkání a diskuse s Carol Archerovou, Vicky Carstensovou, Davidem Casselem, Anne Coyleovou, Michaelem Duncanem, Jane Formanovou, Wendy Greeneovou, Susan Greeneovou, Erikem Jendresenem, Garym Kassem, Shivou Kumarem, Robertem Mawhinneym, Pam Morehousovou, Pierrem Ramondem, Amandou Sallesovou a Eero Simoncellim. Costasi Efthimiouovi jsem zavázán za pomoc s ověřováním faktů a hledání referencí a za proměnu mých původních náčrtků v kresby, z nichž Tom Rockwell stvořil – s trpělivostí svatého a s mistrovstvím oka umělcova – obrázky ilustrující text. Můj dík patří i Andrewu Hansonovi a Jimu Sethnaovi za pomoc při přípravě několika speciálních obrázků.

Za osobní rozhovor a za poskytnutí osobních pohledů na různá diskutovaná témata děkuji Howardu Georgimu, Sheldonu Glashowovi, Michaelu Greenovi, Johnu Schwarzovi, Johnu Wheelerovi, Edwardu Wittenovi a opět Andrewu Stromingerovi, Cumrunu Vafovi a Gabrielu Venezianovi.

Angele von der Lippeové jsem vděčen za její neocenitelné návrhy a Traci Nagleové za její smysl pro detail. Obě tyto redaktorky nakladatelství W. W. Norton značným dílem přispěly k jasnosti podání. Děkuji též svým literárním zprostředkovatelům, Johnu Brockmanovi a Katince Matsonové, za jejich odborné vedení od prvopočátků až k publikaci knihy.

Za štědrou podporu mého víc než patnáct let trvajícího výzkumu v teoretické fyzice děkuji Národní vědecké nadaci (NSF), Nadaci Alfreda P. Sloana a Ministerstvu energetiky USA (DOE). Snad nepřekvapí, že se můj vlastní výzkum soustředil na vliv teorie superstrun na naše představy o času a prostoru. V několika následujících kapitolách bych rád přiblížil část objevů, jichž jsem měl to štěstí se účastnit. Jakkoli věřím, že čtenář tyto „pohledy zevnitř“ ocení, uvědomuji si, že v něm mohou zanechat přehnaný dojem z úlohy, kterou jsem při vývoji teorie superstrun hrál. Chtěl bych proto využít této příležitosti a poděkovat více než tisícovce fyziků celého světa, oddaným

účastníkům úsilí o zformování finální teorie vesmíru. Zároveň se omlouvám všem, na jejichž práci se v mé knize nedostalo; tento fakt jen odráží tematickou perspektivu, kterou jsem vybral, a omezení délky obecné prezentace.

Nakonec z celého srdce děkuji Ellen Archerové za její neutuchající lásku a podporu, bez nichž by tato kniha nikdy nespátřila světlo světa.

Brian Greene

Pár slov překladatele

Kdosi řekl, že akt bádání není ani tak hledání nových pevnin, jako spíše formování nových pohledů. Čtenáři, kteří pohlédnou na svět očima formovanýma teorií strun, zjistí, že tento pohled na svět člověku vyrazí dech.

Dnes pracují fyzici a matematici celého světa horečnatě na jedné z nejambicióznějších kdy navržených teorií: na teorii superstrun. Strunová teorie, jak se často nazývá, je klíčem k jednotné teorii pole, která Einsteinovi unikala více než třicet let. Věda konečně překonala téměř století trvající nevraživost mezi zákony velkého – obecnou teorií relativity – a zákony malinkého – kvantovou mechanikou. Strunová teorie obratně sjednocuje tyto pilíře moderní fyziky do jediného a harmonického celku na základě představy, že všechny úžasné události ve vesmíru jsou projevem chvění jediného objektu: mikroskopicky tenkých smyček energie „žijících“ hluboko v srdci hmoty. A pro schopnost sjednotit všechny síly přírody a poskytnout takřikajíc hlavní rovnici řídící širokou sféru platnosti fyzikálních zákonů od kvarků až po vesmír mluví mnozí o teorii superstrun jako o „teorii všeho“.

V této brilantně psané, průzračné a osvěžující knize dává Brian Greene, jeden z předních strunových teoretiků, do souvislosti vědecký příběh s lidským bojem v pozadí hledání finální teorie. Teorie strun, jak autor živě popisuje, odhaluje obraz vesmíru, který šokovými vlnami otrásá světem fyziky. Uchvacující a revoluční myšlenky, jako například nové rozměry skryté v struktuře prostoru, černé díry přeměňující se v elementární částice, trhliny a díry v časoprostorovém kontinuu, gigantické vesmíry zaměnitelné s miniaturními a hromada dalších, hrají ústřední roli při tom, jak se fyzici se strunovou teorií po ruce utkávají s některými z nejhlubších otázek věků.

S autoritou a šarmem nás *Elegantní vesmír* seznamuje s objevy i dosud nerozlousknutými tajemstvími, s veselím i smutkem těch, kdo neúnavně zkoumají finální povahu prostoru, času a hmoty. S užitím rafinovaných metafor a analogií Greene úspěšně učinil z konceptů, řadících se k nejpromyšlenějším, čtení na dotyk přístupné a veskrze zábavné a přivedl nás tak blíže k porozumění, jak funguje vesmír.

Mezi kulturní jazyky, do kterých byl bestseller Briana Greenea přeložen, se zařadila i čeština. Snažil jsem se maximálně zachovat srozumitelnost a jasnost anglického originálu. Proto jsem také například všechny našinci poněkud cizí jednotky, jako jsou palce, stopy, míle, Fahrenheitovy stupně, ale třeba i dolary, čtvrtáky a centy, přepočítal na jejich české ekvivalenty, přičemž jsem určité údaje pozměnil tak, aby čísla nezněla krkolomně, ale aby bylo poselství autorem zamýšlené uchováno beze změn. Tam, kde kontext vyžadoval českému čtenáři cosi vysvětlit, jsem tak učinil bez zvláštního značení, které by narušovalo plynulost výkladu. Slovníček fyzikálních výrazů na konci knihy jsem přetřídil a obohatil o některá slůvka v našich končinách světa méně užívaná. Dlužím poděkování Martě Bednářové, Michalu Fabingerovi, Vojtěchu Hálovi a Daliboru Šmídovi za pečlivé pročtení textu a za cenné připomínky a Mirku Beláňovi navíc za účinnou pomoc při převádění textu do formátu MS-WORD. Brian Greene ochotně poskytl pomoc při organizaci české verze a rady zkušenějšího. Jiří Langer stál u kolébky projektu a vděčím mu za povzbuzení i důvěru. Závěrem děkuji i redaktorce paní Věře Amelové, která svým dílem přispěla k tomu, že kniha nakonec vyšla.

20. února 2001

Luboš Motl

Adresa na internetu: <http://lumo.blogspot.cz/2013/03/elegantni-vesmir.html>

Část první

Hranice vědění

Kapitola první

Svázání strunou

Nazývat to zastíráním problémů by bylo jistě příliš nadsazené. Ale více než půl století – dokonce uprostřed největších vědeckých revolucí – si byli fyzici v skrytu duše vědomi temného mraku nejasně se rýsujícího nad vzdáleným obzorem. Celý problém tkví v tom, že moderní fyzika stojí na dvou základních pilířích. Jedním je obecná relativita Alberta Einsteina, která poskytuje teoretický rámec pro chápání vesmíru v těch největších měřítkách: hvězd, galaxií, kup galaxií a dále až k obrovskému rozpínání vesmíru samotného. Tím druhým pilířem, na němž fyzika stojí, je kvantová mechanika, která nabízí teoretický rámec pro pochopení vesmíru nejmenších měřítek: molekul, atomů a dále až k subatomárním částicím, jako jsou elektrony nebo kvarky. V průběhu let potvrdili experimentální fyzici s téměř nepředstavitelnou přesností prakticky všechny předpovědi obou zmíněných teorií. Ovšem tytéž teoretické nástroje neúprosň vedou k jinému, znepokojivému závěru: tak jak jsou obecná relativita a kvantová mechanika dnes formulovány, nemohou být pravdivé současně. Tyto dvě teorie, které podnítily fantastický pokrok fyziky za poslední století, pokrok, který objasnil rozpínání nebes i fundamentální strukturu hmoty, jsou totiž vzájemně neslučitelné.

Pokud jste o tomto zuřivém antagonismu ještě neslyšeli, ptáte se asi po důvodu. Nalézt odpověď není těžké. Všude kromě extrémních situací studují fyzici věci, které jsou buď malé a lehké (jako atomy nebo jejich části), nebo naopak obrovské a těžké (jako hvězdy a galaxie), ale nikdy oboje najednou. To znamená, že potřebují buď jen kvantovou mechaniku, nebo jen obecnou relativitu a mohou se, s nenápadným zábleskem v očích, otočit zády k chrchlavému varování druhé z teorií. Po padesát let nebyl tento přístup tak blažený jako nevědomost, ale neměl k tomu daleko.

Vesmír ale *umí* být extrémní. V hlubinách u středu černé díry je stlačena obrovitá hmota do malinkého prostoru. V momentu velkého třesku celý vesmír vyšlehl z mikroskopického zrnka, vůči němuž vyhlíží zrnko písku jako nějaký obrovský kolos. Existují oblasti malinké, a přesto neuvěřitelně masivní, vyžadující zapojit jak kvantovou mechaniku, tak obecnou relativitu. Z důvodů, jež vám budou při čtení této knihy stále jasnější, se rovnice obecné relativity a kvantové

mechaniky, pokud je zkombinujeme, začnou otřásat, chrastit a funět jako vyřazený automobil. Prozaičtěji řečeno, nešťastná slitina těchto teorií dává nesmyslné odpovědi na dobře položené otázky. Dokonce i kdybyste chtěli udržet vnitřek černé díry a začátek vesmíru přikrytý rubášem nevědomosti, neubráníte se pocitu, že nepřátelství mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou volá po hlubší úrovni porozumění. Mohl by snad vesmír být opravdu na fundamentální rovině rozpolcen a vyžadovat jednu sadu zákonů pro velké objekty a jinou, s tou první neslučitelnou sadu zákonů v případě objektů malých?

Teorie superstrun, mladá dcerka z bohaté rodiny, mladá alespoň ve srovnání se starými a ctihodnými matronami obecné relativity a kvantové mechaniky, odpovídá na otázku z konce minulého odstavce široko daleko se rozléhajícím „ne“. Intenzivní výzkum fyziků a matematiků celého světa odhalil v posledním desetiletí, že tento nový přístup k popisu hmoty na nejzákladnější úrovni řeší napětí mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou. Teorie superstrun ve skutečnosti v sobě skrývá daleko více; v jejím rámci obecná relativita a kvantová mechanika dokonce *vyžadují jedna druhou*, aby celá teorie dávala smysl. Podle teorie superstrun je tedy manželství uzavřené mezi zákony velkého a zákony malého nejen šťastné, ale dokonce nevyhnutelné.

To je jen část dobrých zpráv. Teorie superstrun – krátce teorie strun – totiž posouvá sjednocení těchto zákonů o jeden obří krok kupředu. Po tři desetiletí hledal Albert Einstein jednotnou teorii fyziky, takovou, která by vetkala veškeré síly přírody a částice hmoty do jediného teoretického gobelínu. Neuspěl. Dnes, v rozbřesku nového tisíciletí, tvrdí zastánci strunové teorie, že nitě tohoto prchavého sjednoceného gobelínu byly konečně nalezeny. Teorie strun má moc ukázat, že všechny báječné události ve vesmíru – od šíleného tance subatomárních kvarků k okázalému valčíku navzájem se obíhajících dvojhvězd, od počátečního ohnivého záblesku velkého třesku až k majestátnímu tanci nebeských galaxií – jsou ztělesněním jednoho velkého fyzikálního principu, jedině mistrovské rovnice.

Tyto rysy strunové teorie po nás žádají radikální změnu chápání času, prostoru a hmoty, proto chvíli potrvá, než si na ni zvykneme a přijmeme ji. Ale jak se vyjasní, ve správném kontextu lze vidět, že se tato teorie vynořuje jako dramatický, a přesto přirozený výhonek revolučních objevů fyziky několika posledních staletí. Uvidíme, že konflikt mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou není prvním, ale už třetím v posloupnosti zásadních konfliktů, které za poslední století propukly, a že řešení každého z nich vyústilo v ohromující revizi našeho náhledu na vesmír.

Tři konflikty

První konflikt, odhalený někdy na sklonku 19. století, se týká podivných vlastností pohybu světla. Stručně řečeno, běžíte-li dostatečně rychle, můžete podle

zákonů pohybu Isaaca Newtona dohonit vzdalující se svazek paprsků světla, zatímco podle zákonů elektromagnetismu Jamese Clerka Maxwella se vám to nepodaří. Jak se dozvíte v 2. kapitole, Einstein rozřešil tento konflikt ve své speciální teorii relativity, čímž převrátil naruby naše chápání času a prostoru. Podle speciální teorie relativity už prostor a čas nelze chápat jako univerzální pojmy jednou provždy vytesané do kamene a vnímané všemi stejně. Čas a prostor se z Einsteinovy reformy fyziky vynořují spíše jako proměnlivé konstrukce, jejichž tvar a vzhled závisí na našem stavu pohybu.

Rozvoj speciální relativity připravil hned scénu pro konflikt další. Jeden ze závěrů Einsteinovy práce zněl, že žádný objekt – dokonce ani žádný signál či vzruch libovolného druhu – nemůže letět rychleji než světlo ve vakuu. Ale jak uvidíme ve 3. kapitole, Newtonova experimentálně úspěšná a intuitivně uspokojivá univerzální teorie gravitace předpokládá, že tělesa na sebe gravitačně působí i na velké vzdálenosti *okamžitě*. Byl to opět Einstein, kdo zakročil a vyřešil konflikt tak, že ve své obecné teorii relativity z roku 1915 nabídl novou představu gravitace. I relativita obecná – stejně jako speciální relativita – otřásla představami o čase a prostoru. Podle ní jsou prostor a čas nejen ovlivněny naším stavem pohybu, ale mohou se dokonce zakřivovat a vychylovat v závislosti na přítomnosti hmoty nebo energie. Takové deformace struktury času a prostoru, jak uvidíme, přenášejí gravitační sílu z místa na místo. Čas a prostor tedy už nelze chápat jako netečné jeviště, na němž se odehrávají vesmírné události; podle speciální a poté obecné relativity jsou spíše samy přímými účastníky všech těchto událostí.

Ještě jednou se příběh v nehlubších rysech opakuje. Objev obecné relativity sice jeden konflikt vyřešil, ale jiný zažehl. V průběhu prvních tří desetiletí 20. století vyvinuli fyzici kvantovou mechaniku (jíž je věnována 4. kapitola) jako odezvu na řadu oslňujících otázek, které přinesla aplikace fyzikálních představ 19. století na mikroskopický svět. A jak jsme už uvedli, třetí a nejhlubší konflikt vyvolala neslučitelnost kvantové mechaniky a obecné relativity. Jak zjistíte v 5. kapitole, jemně se zakřivující geometrický tvar prostoru podle obecné relativity je na ostří nože s šíleným a škubavým mikroskopickým chováním vesmíru, které je dílem kvantové mechaniky. Jelikož do půli osmdesátých let nebylo známo, že teorie strun tento rozpor řeší, je právem nazýván ústředním problémem moderní fyziky. A co víc, aniž by popírala principy speciální a obecné relativity, vyžaduje od nás teorie strun bouřlivé přezáplatování představ o čase a prostoru. Většina z nás například považuje za fakt, že prostor má tři rozměry. Podle strunové teorie je tomu jinak, vesmír má rozměrů mnohem více, než jsme schopni vnímat – přebytečné rozměry jsou pevně svinuty do zahalené struktury kosmu. Tyto vhledy do povahy prostoru a času jsou natolik základní, že nám budou průvodcem v následujících dobrodružstvích. Teorie strun je v určitém smyslu opravdu příběhem času a prostoru po Einsteinovi.

Abychom pochopili, čím vlastně tato teorie opravdu je, musíme se vrátit do minulosti a stručně vylíčit, co nás poslední století naučilo o mikroskopické struktuře vesmíru.

Vesmír v nejlepším mikroskopu aneb Co víme o hmotě

Staří Řekové vytušili, že hmota vesmíru je tvořena z drobných „nedělitelných“ částecek, které nazvali *atomy*. Stejně jako lze velké množství slov vytvořit kombinacemi několika hlásek, v Řecku správně uhodli, že široká řada hmotných objektů by také mohla být výsledkem skládání malého množství rozdílných elementárních stavebních kamenů. Projevili tím velkou předvídavost. O více než dvě tisíciletí později stále věříme, že měli pravdu, ačkoli představa nejzákladnějších stavebních jednotek doznala za tu dobu mnoha změn a revizí. V 19. století vědci ukázali, že mnoho známých látek, jako například kyslík nebo uhlík, je tvořeno malými a dále nedělitelnými stavebními jednotkami; podle tradice založené Řeky je nazvali *atomy*. Jméno se udrželo, ale historie ukázala, že šlo o ošidné pojmenování, vždyť *atomy* nesporně „dělitelné“ jsou. Do začátku třicátých let 20. století ustavily kolektivní práce Josepha Johna Thomsona, Ernesta Rutherforda, Nielse Bohra a Jamese Chadwicka model atomu podobného sluneční soustavě, většinu z nás známého. Atomy mají daleko k základním stavebním jednotkám, skládají se z jádra, obsahujícího neutrony a protony, které je obklopeno rojem obíhajících elektronů.

Na okamžik považovali fyzici protony, neutrony a elektrony za „atomy“ starých Řeků. Ovšem v roce 1968 využili experimentátoři vzrůstající kapacity techniky stanfordského lineárního urychlovače (SLAC) ke zkoumání mikroskopických hlubin hmoty a ukázali, že ani protony a neutrony nejsou těmi nejzákladnějšími jednotkami. Zjistili, že každý z nich se skládá ze tří menších částic, z *kvarků*. Tohle zvláštní označení přejal teoretický fyzik Murray Gell-Mann, který už dříve existenci těchto částic předpověděl, z verše knihy Jamese Joyce *Plačky nad Finneganem*.¹ Experimentátoři potvrdili, že existují dva druhy kvarků, a s mnohem menší tvořivostí je pojmenovali *up* a *down*, „nahoru“ a „dolů“. Proton obsahuje dva *up*-kvarky a jeden *down*-kvark; neutron jeden *up*-kvark a dva *down*-kvarky.

Všechno, co můžete spatřit v světě pozemském i na nebi, je zdá se kombinací elektronů, *up*-kvarků a *down*-kvarků. Neznáme žádný experiment, který by naznačoval, že se kterákoli z těchto tří částic skládá z něčeho menšího. Zato velké množství pozorování ukazuje, že vesmír samotný obsahuje další druhy částic. V polovině padesátých let našli Frederick Reines a Clyde Cowan nezvratné důkazy existence čtvrté elementární částice, *neutrína*, předpovězené už začátkem třicátých let Wolfgangem Paulim. Ukázalo se, že *neutrína* se velmi těžko hledají, neboť procházejí ostatní hmotou téměř jako duchové a jen zřídkakdy s ní interagují; *neutrino* s průměrnou energií lehce projde biliony

kilometrů tlustou olověnou zdí, aniž by to seabeměně ovlivnilo jeho pohyb nebo zeď samotnou. Po této zprávě bychom si měli oddychnout, jelikož při čtení této věty neškodně prolétávají miliardy neutrin vychrlených Sluncem naším tělem i Zemí na své samotářské cestě vesmírem. Na konci třicátých let objevili fyzici studující kosmické záření (spršky částic bombardujících Zemi z okolního prostoru) další částici – mion; má téměř stejné vlastnosti jako elektron až na to, že je asi 207krát těžší. Poněvadž v tehdy známém řádu kosmu nebylo nic, žádná nevyřešená záhada ani na míru ušité zákoutí, které by vyžadovaly existenci mionu, přivítal laureát Nobelovy ceny a částicový fyzik Isidor Isaac Rabi objev mionu nepřítis nadšeným: „Tedy kdo si tohle objednal?“ Nicméně bylo to venku. A čekalo nás více podobných objevů.

S ještě silnější technikou pokračovali fyzici v stloukání kousků hmoty o stále větší energii a na okamžik tak obnovovali podmínky od velkého třesku nevídané. V troskách hledali nové fundamentální ingredience, aby je přidali do bytnějšího seznamu elementárních částic. Co našli? Čtyři nové kvarky *strange*, *charm*, *bottom* a *top*, česky „podivnost“, „půvab“, „spodek“ a „svršek“, a navíc dalšího, ještě těžšího bratříčka elektronu, zvaného *tauon*, a dva sourozence neutrina (pojmenované *mionové neutrino* a *tauonové neutrino*, abychom je rozlišili od původního neutrina, dnes nazývaného *elektronové neutrino*). Tyto částice se rodí při vysokoenergetických srážkách a mají přímo jepičí život; nejsou součástí ničeho, s čím se běžně setkáváme. Stále nejsme na konci příběhu. Každá z částic má partnera v *antičástici*, částici s totožnou hmotností, ale opačnou velikostí různých veličin, takzvaných nábojů vůči různým silám (o nichž půjde řeč níže), jejichž nejdůležitějším příkladem je elektrický náboj. Tak například antičásticí elektronu je *pozitron*, který má přesně stejnou hmotnost jako elektron, ale elektrický náboj +1 ho odlišuje od elektronu s nábojem –1. (V celé knize vyjadřujeme, v souladu se zvyky částicových fyziků, elektrický náboj v násobcích náboje protonu.) Pokud přijdou hmota s antihmotou do styku, *anihilují*, vzájemně se „zničí“ a přemění na čistou energii ve formě

1. generace		2. generace		3. generace	
částice	hmotnost	částice	hmotnost	částice	hmotnost
elektron	0,000 54	mion	0,11	tauon	1,9
elektronové neutrino	$<10^{-8}$	mionové neutrino	$<0,000\ 3$	tauonové neutrino	$<0,033$
up-kvark	0,004 7	půvabný kvark	1,6	top-kvark	189
down-kvark	0,007 4	podivný kvark	0,16	bottom-kvark	5,2

Tři generace fundamentálních částic a jejich hmotnosti v jednotkách hmotnosti protonu. Hmotnosti neutrin zatím unikají měření.²

záblesků světla – proto se ve světě kolem nás přirozeně vyskytuje jen nepatrně antihmoty.

Fyzici vypožadovali mezi těmito částicemi jistou pravidelnost (zachycenou v tabulce na předchozí straně). Částice hmoty tvoří tři skupiny, někdy nazývané *rodiny* a jindy *generace* (pokolení). Každá generace obsahuje dva kvarky, elektron nebo nějakého jeho bratříčka a jeden druh neutrína. Odpovídající druhy částic mají napříč generacemi totožné vlastnosti, jen jejich hmotnost od generace ke generaci roste. Fyzici tedy prozkoumali strukturu hmoty až do měřítka řádu miliardtin miliardtiny metru a vědí, že *všechno* to, co do dnešního dne pozorovali – ať už to existuje v přírodě, nebo to bylo vyrobeno na gigantických drtičích atomů –, se skládá z nějaké kombinace částic těchto tří generací a z jejich antičástic.

Po letmém pohledu na tabulku budete mít jistě větší pochopení pro Rabiho rozčarování z objevu mionu. Uspořádání do rodin nám sice dává určité zdání řádu, ale zároveň vnučuje řadu otázek. Proč je tolik elementárních částic, zvláště když se zdá, že na velkou většinu věcí kolem nás bychom vystačili s elektrony, up-kvarky a down-kvarky? Proč jsou tři rodiny, a ne třeba jedna, čtyři nebo jiný počet? Proč jsou hmotnosti částic napohled tak náhodně rozestety? Proč je třeba tauon asi 3 520krát těžší než elektron? Proč váží top-kvark asi 40 200krát více než up-kvark? Jsou to podivná, velká a jakoby náhodná čísla. Objevila se náhodou, zvolil je tak Bůh, nebo existuje srozumitelné vědecké vysvětlení těchto fundamentálních vlastností našeho vesmíru?

Síly aneb Kde je foton?

Vše začíná být ještě složitější, začneme-li uvažovat o silách přírody. Svět kolem nás je plný sil, jimiž objekty působí na jiné objekty. Do tenisového míčku lze udeřit raketou, nadšenci pro bungee jumping své tělo nechají padat z vysokého mostu, magnety udrží superrychlé vlaky těsně nad kovovou tratí, Geigerovy počítače umějí pípnout v odezvě na radioaktivní materiál a jaderné bomby jsou schopny vybuchnout. Předměty můžeme ovlivňovat tím, že do nich tlačíme, taháme je, třeseme s nimi; můžeme je házet nebo do nich střílet; natahovat, kroutit nebo drtit; mrazit, ohřívat nebo pálit. V posledních staletích nashromáždili fyzici doklady toho, že všechny tyto interakce mezi různými objekty a materiály, stejně jako kterékoli z milionů dalších, s nimiž se denně setkáváme, lze redukovat na kombinaci čtyř základních sil. Jednou z nich je *gravitační síla*, dalšími třemi pak *elektromagnetická*, *slabá* a *silná síla*.

Nejznámější z těchto sil je patrně gravitace. To ona způsobuje, že zůstáváme na oběžné dráze kolem Slunce, stejně jako to, že stojíme pevně nohama na zemi. Hmotnost tělesa vyjadřuje, jak velkou gravitační sílu těleso cítí i kolik jí samo vyvolává. Další známou silou je elektromagnetismus. Ten pohání veškeré vymoženosti moderního života: světla, televizory, telefony i počítače.

Hromům a bleskům dodává hrozivou sílu a lidské ruce jemnost jejího dotyku. Z mikroskopického hlediska hraje elektrický náboj v elektromagnetismu stejnou roli jako hmotnost v gravitaci; určuje, jak silně může objekt působit elektromagneticky, ale i jak silně reaguje.

Silnou a slabou sílu už tak neznáme, protože jejich velikost rychle klesá, překračují-li vzdálenosti mezi částicemi subatomární délky; jsou to jaderné síly. Proto byly také obě objeveny mnohem později. Silná síla zodpovídá za „slepení“ kvarků uvnitř protonů a neutronů a za pevné nahuštění protonů a neutronů uvnitř atomového jádra. Slabá síla je nejznámější tím, že způsobuje radioaktivní rozpad (beta-rozpad) látek jako uran nebo kobalt.

V posledním století přišli fyzici na to, že všechny tyto interakce mají společné dva rysy. Zaprvé, jak si řekneme v 5. kapitole, ke každé síle je na mikroskopické úrovni přiřazena částice, kterou lze považovat za nejmenší balík nebo svazek oné síly. Pokud vyšlete paprsek z laseru – z „pistole na elektromagnetické záření“ –, vystřelujete proud *fotonů*, nejmenších balíčků elektromagnetické síly. Podobně jsou nejmenšími stavebními jednotkami slabé síly a silné síly částice nazývané *slabé kalibrační bosony* a *gluony*. (Název *gluon* je obzvláště trefný: jeho nositele můžete totiž považovat za mikroskopickou cihlu silného lepidla – anglicky *glue* –, které drží pohromadě jádro.) V roce 1984 uzavřeli experimentátoři definitivně pokusy, z nichž plyne existence a podrobné vlastnosti těchto tří druhů částic síly (výsledky shrnuje tabulka na straně 25). Fyzici věří, že i gravitace má svoji částici – graviton –, ale experimentální potvrzení její existence je hudbou budoucnosti.

Druhým společným rysem všech sil je to, že stejně jako gravitace má svoji hmotnost a elektromagnetismus svůj elektrický náboj, má i silná a slabá síla svůj „silný náboj“ a „slabý náboj“; ty obdobně určují, nakolik je částice ovlivněna silnou a slabou silou. (Podrobněji se o těchto vlastnostech dočtete v tabulce v poznámkách na konci knihy.³⁾ Ovšem stejně jako v případě hmotností částic, kromě faktu, že experimentální fyzici pečlivě tyto vlastnosti změřili, nikdo zatím nenašel vysvětlení, *proč* je vesmír složen právě z částic s těmito hmotnostmi a náboji.

Přestože mají společné rysy, přináší zkoumání fundamentálních sil samotných stále nové a nové otázky. Proč jsou například právě čtyři fundamentální síly, a nikoli pět, tři, nebo jen jedna? Proč mají jednotlivé síly tak odlišné vlastnosti? Proč jsou silná a slabá síla uvězněny a účinkují jen na mikroskopických vzdálenostech, zatímco dosah gravitace a elektromagnetismu omezen není? A proč se typické číselné velikosti jednotlivých sil tolik liší?

Abychom docenili význam poslední otázky, představme si, že do každé ruky uchopíme jeden elektron a obě tyto stejně nabitě částice přibližujeme. Gravitace působící mezi nimi je bude přitahovat, zatímco elektrostatická síla je bude odpuzovat. Která ze sil zvítězí? Soutěž není třeba konat, elektromagnetické odpuzování je přibližně milion miliard miliard miliard miliardkrát

(10^{42}) silnější! Jestliže bychom délku vašeho pravého bicepsu považovali za sílu gravitace, potom by se levý biceps musel rozprostírat po celém známém vesmíru, aby znázornil velikost elektromagnetické síly. Jediným důvodem, proč ve světě kolem nás není gravitace zcela zastíněna elektromagnetismem, je to, že většina těles obsahuje stejné množství kladných a záporných nábojů, jejichž síly se vzájemně ruší. Ovšem gravitace je vždy přitažlivá, a tak kompenzace nemůže nastat – více materiálu způsobuje silnější gravitaci. Ale na fundamentální úrovni fyziky je třeba gravitaci označit za mdlou sílu. (Tento fakt se podílí na obtížích s pozorováním gravitonu; najít nejmenší balíček nejslabší síly je opravdu těžký úkol.) Experimenty také ukazují, že silná síla je asi stokrát silnější než elektromagnetická a ta je zase asi tisíckrát silnější než slabá síla. Ale kde je rozumové zdůvodnění – *raison d'être* – toho, že má vesmír tyto vlastnosti?

Tato otázka není výplodem nějakého planého filozofování, proč se nějaká drobnost udála tak a ne jinak; vesmír by měl podstatně odlišnou tvář, kdyby vlastnosti částic hmoty a sil byly byt' jen mírně jiné. Kupříkladu existence stabilních jader, tvořících přibližně sto prvků periodické tabulky, křehce závisí na poměru velikostí silné a elektromagnetické síly. Protony nahuštěné v jádrech se navzájem elektricky odpuzují; silná síla mezi kvarky, z nichž se protony skládají, naštěstí tuto odpudivou sílu překonává a svazuje protony těsně k sobě. Ale i malá změna poměru velikostí těchto sil by snadno narušila rovnováhu mezi nimi a způsobila by rozpad většiny jader. Kdyby byl navíc elektron několikrát těžší, než je, elektrony a protony by se samovolně spojovaly a vytvářely by neutrony namísto atomů vodíku (nejjednoduššího prvku ve vesmíru, obsahujícího jediný proton v jádře), což by opět zabránilo vzniku složitějších prvků. Pro hvězdy je spojování lehkých stabilních jader otázkou života a smrti a s takto pozměněnými zákony fundamentální fyziky by se hvězdy vůbec nerodily. I síla gravitace hraje v jejich životě jistou tvůrčí roli. Způsobuje v nitru hvězdy velkou hustotu hmoty, která pohání jaderný kotol, zdroj světelné záře hvězdy. Kdybychom zesílili gravitaci, chomáč hvězdné hmoty by se ještě více stlačil, čímž by se urychlily jaderné reakce. Ale stejně

síla	částice síly	hmota
silná	gluon	0
elektromagnetická	foton	0
slabá	slabý kalibrační boson	86 a 97
gravitační	graviton	0

Čtyři síly (interakce) přírody spolu s příslušnou zprostředkující částicí a její hmotností v jednotkách hmotnosti protonu. (Částice slabé síly má dva druhy, tzv. W a Z bosony, lišící se svými hmotnostmi. Teoretické úvahy ukazují, že graviton by měl být nehmotný.)

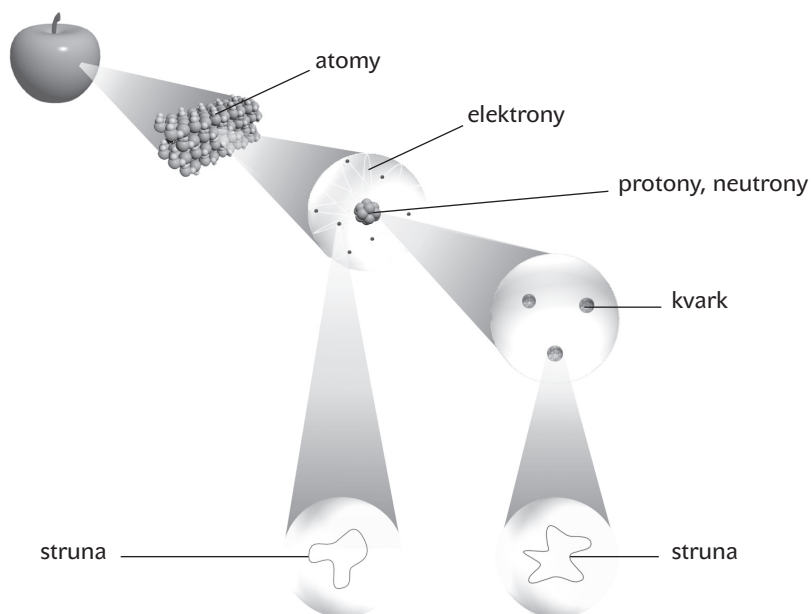
jako oslnivě plápolající plamen spálí topivo rychleji než pomalu hořící svíčka, způsobil by vzrůst rychlosti jaderných reakcí to, že by hvězdy jako Slunce shořely mnohem rychleji, což by mělo ničivé účinky na život, jaký známe. Na druhé straně by zeslabená gravitace hmotě vůbec neumožnila se shlukovat a zabránila by tak formování hvězd a galaxií.

Mohli bychom v příkladech ještě pokračovat, ale myšlenka je jasná. Vesmír vypadá tak, jak vypadá, proto, že částice hmoty a síly mají dané vlastnosti. Existuje ale nějaké vědecké vysvětlení, proč takové vlastnosti mají?

Podstata teorie strun

Strunová teorie nabízí nový pohled, v němž se poprvé objevil rámec pro zodpovězení těchto otázek. Přibližme si její základní myšlenku.

Částice v tabulce na straně 22 jsou „písmeny“ veškeré hmoty. Zdá se, že nemají žádnou další vnitřní strukturu – stejně jako jejich grafické protějšky. Teorie strun ale tvrdí něco jiného. Kdybychom podle ní mohli částice pozorovat s ještě větším rozlišením, s rozlišením o mnoho řádů jemnějším, než dovolují dnešní technologie, tehdy bychom uviděli, že žádná z částic není bodová, že jde o drobnou a tenkou jednorozměrnou *smýčku*. Každá částice je vlastně chvějící se, kmitající a tancující vlákno, jakási nekonečně tenká gumička na vlasy, kterou fyzici postrádající Gell-Mannovo zalíbení v literárních hříčkách



Hmota je složena z atomů a ty zase z elektronů a kvarků. Podle strunové teorie jsou všechny tyto částice ve skutečnosti tenkými smýčkami vibrující struny.

pojmenovali *strunou*. Na obrázku na předchozí stránce ilustrujeme tuto základní myšlenku teorie strun na obyčejném kousku hmoty, na jablku, jehož strukturu opakovaně zvětšujeme, takže odhalujeme jeho „součástky“ na stále kratších vzdálenostech. Teorie strun přidává k už dříve známé posloupnosti od atomů přes protony a neutrony k elektronům a kvarkům další, mikroskopickou vrstvu vibrující smyčky.⁴

Ačkoli to určitě není na první pohled patrné, řeší tato náhrada bodových složek hmoty strunami – jak uvidíme v 6. kapitole – neslučitelnost kvantové mechaniky a obecné relativity. Strunová teorie tak rozťíná gordický uzel současné teoretické fyziky. To samo o sobě je výsledek přímo fantastický, ale je to jen část důvodů, proč tato teorie vyvolala takové vzrušení.

Teorie strun jako sjednocená teorie všeho

Za Einsteinových dob ještě nebyly slabé a silné síly známy, ale i existence dvou různých sil – gravitace a elektromagnetismu – byla pro Einsteina něčím hluboce frustrujícím. Einstein nikdy nepřijal myšlenku, že by příroda byla vystavěna s takovýmto extravagantním designem. A tak začal svoji třicetiletou pouť za takzvanou *jednotnou teorií pole*, jež by, jak alespoň doufal, ukázala, že tyto dvě síly jsou jen projevem jediného velkého principu, na kterém obě stojí. Tímto donkichotským hledáním se Einstein izoloval od hlavního proudu fyziky, jež pochopitelně mnohem více přitahovalo pátrání v nově se vynořujících pevninách kvantové mechaniky. Svému příteli začátkem čtyřicátých let napsal: „Stal se ze mne osamělý stařec, jehož znají hlavně proto, že nenosí ponožky, a jehož ukazují jako kuriozitu při zvláštních příležitostech.“⁵

Einstein zkrátka předběhl dobu. Po více než půlstoletí se jeho sen o jednotné teorii stal svatým grálem moderní fyziky. A značná část rodiny fyziků a matematiků se stále více utvrzuje v tom, že strunová teorie by mohla poskytnout řešení. Z jednoho prostého důvodu – že totiž všechno se na nej-mikroskopičtější úrovni skládá z kombinací vibrujících pramínků – poskytuje teorie strun jednotnou vysvětlovací základnu schopnou zahrnout všechny síly a veškerou hmotu.

Podle teorie strun jsou například pozorované vlastnosti částic (údaje shrnuté v tabulkách na stranách 22 a 25) odrazem různých způsobů, kterými může struna vibrovat. Podobně jako má struna na houslích či v klavíru kmitočty rezonance, na nichž ráda vibruje – aby tyto záchvěvy naše uši vnímaly jako různé tóny nebo jejich vyšší tóny alikvotní –, tak i smyčky v teorii strun mají své „mody (způsoby) vibrace“. Uvidíme však, že každý způsob vibrace struny se spíše než jako tón projevuje jako částice, jejíž hmotnost a náboje jsou dány charakterem vibrace. Elektron je struna vibrující jedním způsobem, up-kvark je struna vibrující jinak a podobně. Ze sbírky chaotických experimentálních dat se vlastnosti částic ve strunové teorii stávají projevem stále těžší fyzikální

vlastnosti – struktury možných rezonancí při vibraci struny –, stávají se tedy, abychom tak řekli, hudbou fundamentálních smyček struny. Stejná idea se uplatňuje i pro síly přírody. Uvidíme, že i každá síla je spojena s konkrétním druhem vibrace struny, a tudíž všechno, veškerá hmota i všechny síly, je sjednoceno ve stejné rubrice mikroskopických oscilací strun – „not“, které struny umějí zahrát.

Poprvé v historii fyziky tedy máme rámec s kapacitou vysvětlit každou fundamentální vlastnost, na níž je vesmír postaven. Z tohoto důvodu je teorie strun někdy považována za kandidáta na „teorii všeho“ (často se užívá anglické zkratky TOE z „theory of everything“) neboli finální teorii. Tato grandiózní pojmenování mají za cíl označit nejhlubší možnou teorii fyziky – teorii, z níž se odvíjejí všechny ostatní a která nevyžaduje, nebo dokonce neumožňuje hlubší vysvětlení. V praxi volí mnozí strunoví teoretici méně nadnesený postoj a teorie všeho pro ně znamená v omezenějším smyslu slova teorii, jež umí popsat vlastnosti všech elementárních částic a fundamentálních sil, kterými na sebe mohou působit. Zapřisáhlý redukcionista by jistě dodal, že žádné omezení neexistuje a že v principu všechno, od velkého třesku až k snovým vidinám, lze popsat v řeci mikroskopických fyzikálních procesů mezi fundamentálními složkami hmoty. Pokud porozumíte všemu o stavebních kamelech, tvrdí redukcionista, porozumíte všemu.

Redukcionistická filozofie lehce zažehne jiskrnou debatu. Mnozí považují za pošetilé a vysloveně odporné tvrzení, že divy života a vesmíru jsou pouhými odrazy mikroskopických částic účastnících se samoučelného tance, jehož jediným choreografem jsou fyzikální zákony. Opravdu mohou být pocity radosti, smutku či nudy pouhými chemickými reakcemi v mozku – reakcemi mezi molekulami a atomy, které jsou v ještě mikroskopičtějším pohledu reakcemi částic z tabulky na straně 22, částic, které jsou v podstatě opravdu jen vibrujícími strunami? Nositel Nobelovy ceny Steven Weinberg na tento řetěz kritiky dává ve svém *Snění o finální teorii* tuto odpověď:

Na druhé straně spektra stojí odpůrci redukcionismu, kteří jsou zděšeni tím, čemu říkají ponurost či drsnost moderní vědy. Nehledě na to, do jaké míry mohou být oni a jejich svět zredukováni na hmotu složenou z částic či polí a jejich interakcí, cítí se být každým takovým poznáním oslabeni... Těmto kritikům bych se nesnažil odpovědět šťavnatou přednáškou o krásách moderní vědy. Redukcionistický pohled na svět je chladný a neosobní. Musí ale být přijat tak, jak stojí, a to nikoli proto, že se nám líbí, ale proto, že právě takto svět funguje.⁶

Někteří s takovým pohledem souhlasí, jiní nikoli.

Ti druzí se pokusí argumentovat tím, že rozvoj věd jako teorie chaosu nám říká, že když úroveň složitosti systému vzroste, začínají se vlády ujímat nové

druhy zákonů. Pochopit chování elektronu nebo kvarku je jedna věc, užít těchto znalostí pro porozumění tornádu věc jiná. V tomto bodě se ještě většina shodne. Názory se začnou rozcházet u otázky, zda rozmanité a mnohdy nečekané jevy, které se mohou objevit v soustavách složitějších než jednotlivé částice, opravdu představují nové fyzikální principy v akci, nebo jestli jsou příslušné principy závislé a odvozené, byť nesmírně složitým způsobem, z fyzikálních principů ovládajících enormně velké soubory elementárních stavebních kamenů. Já osobně si myslím, že nové a nezávislé zákony fyziky nepředstavují. Popsat tornádo v řeči fyziky elektronů a kvarků by nebylo nijak lehké, podle mého názoru jen proto, že složitost výpočtů se stává neúnosnou, nikoli proto, že jsou nutné nové fyzikální zákony. Ale znovu opakuji, že ne všichni s takovým pohledem souhlasí. Co je zcela bez diskuse a má pro cestu popsanou v této knize prvořadou důležitost, je to, že i když akceptujeme diskutabilní postoj oddaného redukcionisty, princip je jedna věc a praxe věc jiná. Prakticky všichni souhlasí, že nalezení teorie všeho by v žádném smyslu neznamenovalo, že psychologie, biologie, geologie, chemie, nebo dokonce fyzika byly vyřešeny nebo jaksi zahrnuty. Vesmír je tak úžasně bohaté a komplexní místo, že objev finální teorie, tak jak ji zde chápeme, by vědě neodzvonił umíráčkem. Právě naopak, objev teorie všeho – finálního vysvětlení vesmíru na nejmikroskopičtější úrovni, teorie, která nestojí na žádném hlubším vysvětlení – by poskytl nejpevnější základnu, na níž lze stavět naše chápání světa. Takový objev by označil začátek, nikoli konec. Finální teorie by navždy přinesla neotřesitelný pilíř koherence a zaručila by nám, že vesmír je pochopitelné místo.

Teorie strun dnes

Tato kniha si klade za cíl objasnit fungování vesmíru podle teorie strun s důrazem na důsledky těchto představ pro naše chápání prostoru a času. Na rozdíl od prezentací pokroku v jiných oblastech vědy se téma této knihy nestaví do role teorie, která byla kompletně vypracována, podrobena důkladným experimentálním zkouškám a plně akceptována vědeckou veřejností. To proto, jak uvidíme v dalších kapitolách, že strunová teorie je natolik hlubokou a rafinovanou teoretickou strukturou, že dokonce i po působivém pokroku posledních dvaceti let nás ještě čeká dlouhá cesta, než budeme moci prohlásit, že jsme dosáhli opravdového mistrovství.

A tak by měla být teorie strun nahlížena jako práce v chodu, která už přinesla udivující poznatky o povaze prostoru, času a hmoty. Harmonické sjednocení obecné relativity a kvantové mechaniky je obrovským úspěchem. Navíc na rozdíl od předchozích teorií je teorie strun schopna zodpovědět prvotní otázky související s nejfundamentálnějšími částicemi a silami přírody. Stejně důležitá je elegance odpovědí, jakož i rámce pro ně, který teorie strun

nabízí, ačkoli tato elegance se trochu hůře vysvětluje slovy. Tak například v teorii strun se mnoho rysů přírody, které by se mohly jevit jako libovolné technické drobnosti – jako třeba počet typů částic a jejich jednotlivé vlastnosti –, dá odvodit z podstatných a hmatatelných rysů geometrie vesmíru. Pokud je teorie strun pravdivá, mikroskopická struktura vesmíru je bohatě propletené mnohorozměrné bludiště, v němž se struny vesmíru mohou nekonečně kroutit, vibrovat a rytmicky vybubnovávat zákony kosmu. Vlastnosti základních stavebních kamenů zdaleka nejsou náhodnými detaily, složitými vazbami totiž souvisejí se strukturou prostoru a času.

V závěrečné analýze ale nelze ničím nahradit definitivní a ověřitelné předpovědi, které jako jediné mohou rozhodnout, zda strunová teorie opravdu sňala závoj tajemství skrývajících nejhlubší pravdy o našem vesmíru. Může nějakou dobu trvat, než nám stupeň našeho porozumění umožní tohoto cíle dosáhnout, třebaže – jak uvidíme v 9. kapitole – by experimenty mohly pro teorii strun poskytnout silné nepřímé důkazy už někdy v následujícím desetiletí. Navíc nám 13. kapitola ukáže, že teorie strun nedávno vyřešila ústřední záhadu týkající se černých děr, záhadu související s takzvanou Bekensteinovou-Hawkingovou entropií, která více než čtvrt století tvrdošijně odolávala řešení běžnějšími nástroji. Tento úspěch mnohé přesvědčil, že je strunová teorie na cestě, která nám přinese (a už přináší) nejhlubší porozumění tomu, jak funguje všehomír.

Edward Witten, jeden z průkopníků a předních teoretiků strunové teorie, shrnuje situaci výrokem, že „teorie strun je částí fyziky 21. století, která náhodou zabloudila do 20. století“, což je pochvala poprvé vyslovená proslulým italským fyzikem Danielem Amatiem.⁷ V jistém smyslu je to podobné, jako kdyby byl našim předkům na konci 19. století předveden moderní superpočítač, a to bez výčtu instrukcí. Metodou pokusu a omylu by stopy síly tohoto superpočítače vyšly jasně najevo, ale k získání opravdového mistrovství by bylo třeba dlouhého a důkladného úsilí. Stopy potenciálu počítače, stejně jako třpyt vysvětlovací síly teorie strun, by přinesly velmi silnou motivaci pro získání úplné zručnosti. Podobný motiv dnes posiluje generaci teoretických fyziků v jejich úsilí o úplné a přesné analytické porozumění teorii strun.

Wittenova poznámka a názory dalších odborníků v oboru naznačují, že by mohlo trvat desetiletí, či dokonce staletí, než lidstvo tuto teorii zcela rozvine a pochopí. Její matematika je fakticky tak komplikovaná, že do dnešního dne nikdo neobjevil ani její přesné rovnice. Fyzici znají jen jejich aproximace, a i ty jsou tak složité, že byly vyřešeny jen částečně. Nicméně inspirující množina průlomů v druhé polovině 19. století – průlomů, které zodpověděly teoretické otázky do té doby nepředstavitelné obtížnosti – může také třeba naznačovat, že úplné kvantitativní porozumění teorii strun je mnohem blíže, než se zdálo na počátku. Fyzici celého světa vyvíjejí nové výkonné techniky, aby překonali

dnešní četné přibližné metody, a kolektivně dávají dohromady různorodé části skládanky teorie strun rychlostí, která nás naplňuje optimismem.

Tyto pokroky překvapivě poskytují výhodnou pozici pro novou prezentaci některých základních otázek této teorie, které se vkrádaly na mysl už určitou dobu předtím. Například otázky, která vás možná napadla při pohledu na obrázek na straně 26: „Proč struny? Proč ne disky nebo kapkovité valounky? Nebo kombinace všech těchto možností?“ Jak se dočtete v 12. kapitole, nejnovější poznatky naznačují, že všechny tyto druhy objektů *hrají* v teorii strun důležitou roli, a odhalily, že tato teorie je ve skutečnosti částí ještě větší syntézy, syntézy nedávno mysticky pojmenované M-teorie. Tyto nejnovější pokroky budou předmětem závěrečných kapitol knihy.

Pokrok ve vědě se odehrává ve vlnách. Některá období jsou přímo nabita revolučními činy, jindy vyjde usilování vědců naprázdno. Vědci předkládají výsledky, teoretické i experimentální. O výsledcích pak navzájem debatují; někdy jsou odmítnuty, někdy pozměněny a jindy poskytnou inspiraci pro nové a přesnější způsoby uchopení fyzikálního vesmíru. Zkrátka, věda se vydává po klikaté cestě vstříc tomu, o čem věříme, že je finální pravda, po cestě, která začala pradávnými pokusy lidstva dostat se vesmíru na kloub a jejíž konec předpovědět neumíme. Nevíme, zda je strunová teorie nepodstatnou zastávkou na této cestě, rozcestím, nebo cílovou stanicí. Ale poslední dvě desetiletí výzkumu stovek horlivých fyziků a matematiků z mnoha zemí nám dodávají odůvodněnou víru, že jsme na správné a možná i závěrečné stezce.

Je živým svědectvím bohaté a dalekosáhlé povahy teorie strun, že dokonce i současná úroveň našeho chápání nám umožnila získat pozoruhodné nové poznatky o fungování vesmíru. Hlavní nití v následujícím vyprávění budou pokroky, které navazují na revoluci v našem náhledu na prostor a čas, revoluci odstartovanou Einsteinovou speciální a obecnou teorií relativity. Odpovídá-li teorie strun skutečnosti, má struktura našeho vesmíru vlastnosti, které by patrně oslnily i samotného Alberta Einsteina.

Část druhá

Dilema prostoru, času a kvant

Kapitola druhá

Prostor, čas a pozorovatelovo oko

V červnu 1905 zaslal šestadvacetiletý Albert Einstein do německých *Annalen der Physik* odborný článek, v němž vyrukoval s paradoxem, který ho poprvé zaujal už jako mladíka někdy o deset let dříve. Při obracení poslední stránky Einsteinova rukopisu si editor časopisu Max Planck uvědomil, že obecně přijímaný vědecký řád byl svržen. Bez povyku a fanfár pohřbil patentový úředník ze švýcarského Bernu tradiční náhled na prostor a čas a nahradil jej novými představami s vlastnostmi, které se vymykají všemu, na co jsme z běžného života zvyklí.

Jaký že paradox to Einsteina celých deset let znepokojoval? V polovině 19. století, po detailním studiu výsledků anglického fyzika Michaela Faradaye, uspěl skotský fyzik James Clerk Maxwell ve sjednocování elektrických a magnetických jevů v rámci *elektromagnetického pole*. Pokud jste už někdy stali na vrcholku hory těsně před velkou bouřkou nebo stáli blízko van de Graafova generátoru, víte jistě, co to elektromagnetické pole je, protože jste ho už pocítili na vlastní kůži. Ale jestliže podobnou zkušenost nemáte, pak vezte, že je to něco jako příliv elektrických a magnetických siločar, které prostupují oblastí prostoru, do níž mají namířeno. Když třeba nasypete železné piliny k magnetu, z uspořádaného vzorku, který vytvoří, lze vystopovat některé neviditelné magnetické siločáry. Svlékáte-li za velmi suchého dne vlněný svetr a slyšíte praskot a snad i na chvíli dostanete jednu nebo dvě rány, jste svědkem důkazu elektrických sil buzených elektrickým nábojem, který uvolnila vlákna vašeho svetr. Kromě toho, že tyto a všechny ostatní elektrické a magnetické jevy sjednotila do jediného matematického jazyka, ukázala Maxwellova teorie – celkem neočekávaně –, že se elektromagnetické vzruchy pohybují pevnou a neměnnou rychlostí, rychlostí rovnou rychlosti světla. Díky tomu si Maxwell uvědomil, že viditelné světlo samotné není nic jiného než zvláštní druh elektromagnetické vlny, která – jak dnes víme – působí na chemické látky sítnice a dává nám schopnost vidět. Navíc (a to je rozhodující) ukázala Maxwellova teorie, že elektromagnetické vlny včetně viditelného světla jsou věčnými poutníky. Nikdy se nezastaví. Nikdy nezpomalí. Světlo se vždycky pohybuje rychlostí světla.

Vše je v pořádku, dokud si nepoložíme stejnou otázku jako šestnáctiletý Einstein. Co se stane, pronásledujeme-li rychlostí světla světlo samotné? Intuitivní myšlení, zakořeněné v Newtonových pohybových zákonech, nám říká, že světelné vlny dohoníme, a tudíž se nám budou jevit nehybné; že světlo bude stát na místě. Ale podle Maxwellovy teorie a všech spolehlivých pozorování nic takového jako nehybné světlo neexistuje. Nikdo ještě v dlani nedržel nehybný chomáč světla. A proto ten problém. Naštěstí Einstein nevěděl, že s tímto problémem zápasili (a vylámali si na něm zuby) mnozí přední fyzici, a přemítal o tomto Newtonově a Maxwellově paradoxu převážně v soukromí.

Jak Einstein konflikt vyřešil svou speciální teorií relativity a jak tím navždy změnil naši představu o prostoru a času, se dočtete v této kapitole. Možná vás překvapí, že teorie relativity chce ukázat, jak se svět jeví jednotlivcům, často zvaným „pozorovatelé“ či „pozorovatelky“, kteří jsou vůči sobě v pohybu. Na první pohled to vypadá jen jako nějaké intelektuální cvičení pramalé důležitosti. Pravda je však zcela jiná. V rukou Einsteina, představujícího si pozorovatelky honící světelné paprsky, najdeme hluboký klíč ke správnému chápání toho, jak se i každodenní situace jeví jednotlivcům vzájemně se pohybujícím.

Když intuice selhává

Běžný život staví do popředí jisté aspekty, v nichž se vjemy takových jednotlivců liší. Podle šoféra se třeba stromy podél silnice pohybují, ale z hlediska stopařky sedící na krajnici jsou zcela nehybné. Podobně se podvozek automobilu (alespoň doufáme!) nejeví pohyblivý řidiči, ale stejně jako zbytek auta se pohybuje z hlediska stopařky. Jsou to natolik základní a intuitivní rysy fungování světa, že si jich skoro ani nevšimneme.

Speciální teorie relativity ovšem prohlašuje, že rozdíly vjemů těchto dvou pozorovatelů jsou složitější a hlubší. Tvrdí onu prapodivnou věc, že vzájemně se pohybující pozorovatelé budou vnímat odlišně čas i vzdálenosti. Jak uvidíme, znamená to, že totožné náramkové hodinky na rukou dvou vzájemně se pohybujících jedinců budou tikat *odlišným tempem*, a naměří tedy různý čas, který odděluje dvě zvolené události. Speciální teorie relativity ukazuje, že tento výrok není kritikou na adresu přesnosti hodinek, nýbrž je pravdivým výrokem o čase samotném.

Podobně se vzájemně se pohybující pozorovatelé s totožnými pravítky neshodnou ani na naměřených vzdálenostech. Znovu zdůrazňujeme, že tu nejde o nepřesnosti měřicích zařízení nebo o jejich nesprávné používání. Nejpresnější měřicí přístroje světa potvrzují, že čas a prostor – měřené jako doby trvání a vzdálenosti – jsou různými pozorovateli prožívány různě. V určitém přesném smyslu, narysovaném Einsteinem, řeší speciální teorie relativity

konflikt mezi naší intuicí o pohybu a vlastnostmi světla, ale za určitou cenu: jedinci, kteří se vůči sobě pohybují, nebudou zajedno, pokud půjde o jejich pozorování prostoru nebo času.

Uplynulo už téměř století od chvíle, kdy Einstein informoval svět o svém převratném objevu, a přesto většina z nás stále nahlíží prostor a čas jako absolutní a univerzální pojmy. Speciální relativitu nemáme zkrátka v krvi – necítíme ji. Její důsledky nejsou podstatnou částí naší intuice. Efekty speciální relativity závisejí na rychlosti pohybu a při rychlosti aut, letadel nebo i raketoplánů jsou tyto efekty titěrné. Rozdíly ve vnímání prostoru a času mezi lidmi na židli a těmi v autech nebo v letadlech *existují*, ale jsou tak nepatrné, že je lidé ani nezaregistrují. Ovšem kdybychom vyrazili na výlet kosmickou lodí z vědecko-fantastických povídek rychlostí srovnatelnou s rychlostí světla, efekty relativity by se staly rázem očividnými. Zatím takové úvahy patří do říše science fiction. Nicméně později uvidíme, že i dnešní chytré experimenty nám umožňují jasná a přesná pozorování relativistických vlastností prostoru a času předpovězených Einsteinem.

Abychom získali alespoň nějakou představu o velikosti relativistických jevů, představme si, že je rok 1970 a kolem jsou samá rychlá a velká auta. Petr, který právě utratil úspory za nové auto značky Trans Am, chce s bratrem Pavlem za městem kvality auta vyzkoušet, přestože prodejce jízdu příliš velkou rychlostí nedovoluje. Petr zahřeje auto a hned poté sjede kilometrový svah rychlostí 180 kilometrů za hodinu, zatímco Pavel mu u silnice výkon stopuje. Petr si pro jistotu zjišťuje na vlastních hodinkách, jak dlouho to jeho novému miláčkovi trvá. Před Einsteinem by nikdo nezapochoyboval, že pokud oba správně užijí fungujících stopek, naměří stejný čas. Ale podle speciální teorie relativity zatímco Pavel naměří 20 sekund, Petrovy stopky ukážou *trošku méně*, totiž 19,999 999 999 999 72 sekundy. Samozřejmě že tenhle malý rozdíl nenaměříme ručními stopkami ovládanými prstem, ale ani časovacími systémy olympijské kvality, a dokonce ani nejpresnějšími atomovými hodinami. Není tedy divu, že každodenní zkušenost nás nenutí odhalit, že plynutí času závisí na našem pohybu.

Podobná neshoda bude panovat i ohledně naměřených délek. Například Pavla napadne chytrý trik, jak změřit délku Petrova nového auta. Odstartuje stopky, když kolem něho projede předek auta, stopne je přesně v okamžiku, kdy projede zadek auta, a výsledný čas pohotově vynásobí známou rychlostí Petra 50 metrů za sekundu, aby dostal délku. Před Einsteinem by ani v tomto případě nikdo nezapochoyboval, že délka změřená Pavlem bude zcela souhlasit s délkou, kterou Petr přesně naměřil v prodejně, kde auto stálo na podstavci. Podle speciální teorie relativity ovšem, pokud oba vykonají přesná měření a Petr zjistí řekněme 5 metrů, potom Pavlův výsledek bude 4,999 999 999 999 929 metru, opět *trochu odlišný*. I v tomto případě jde o odchylku tak nepatrnou, že ji žádné obyčejné měřidlo není schopno vůbec zaznamenat.

Ačkoli jsou rozdíly malé, ukazují závažnou trhlinu v obvyklých představách o univerzálním a pevném prostoru a čase. Když zvětšujeme vzájemnou rychlost Petra a Pavla, trhlina začne být zřetelnější. Na docílení viditelných výsledků musí být rychlosti nezanedbatelným zlomkem maximální možné rychlosti – rychlosti světla –, která je podle Maxwellovy teorie i podle experimentálního měření téměř 300 000 kilometrů za sekundu neboli 1,08 miliardy kilometrů za hodinu. Touto rychlostí můžeme obletět zeměkouli více než sedmkrát za sekundu. Kdyby například Petr uháněl rychlostí ne 180 kilometrů za hodinu, ale třeba 240 000 kilometrů za sekundu, asi 80% rychlostí světla, podle matematiky teorie relativity by Pavel naměřil délku asi 3 metrů, což je mnohem méně (60 %) než Petrův výsledek (i než údaj z příručky). Stejně tak v případě kilometrového svahu by Petr naměřil asi jen 60 % času, který by odměřil Pavel.

Takové ohromné rychlosti daleko přesahují cokoli dnes dosažitelného, takže efekty „dilatace času“ a „Lorentzovy kontrakce délky“, jak jim odborně říkáme, jsou v každodenním životě naprosto zanedbatelné. Kdybychom žili ve světě, kde se objekty běžně pohybují rychlostmi blízkými rychlosti světla, byly by tyto vlastnosti času a prostoru tak intuitivní – poněvadž bychom je neustále zažívali –, že by nevyžadovaly o nic delší výklad než zdánlivý pohyb stromů, o němž jsme mluvili na začátku této kapitoly. Ale protože v takovém světě nežijeme, nemáme tyto jevy v krvi. Jak uvidíme, porozumět jim a přijmout je můžeme jen tehdy, když svůj pohled na svět podrobíme důkladné revizi.

Princip relativity

Speciální teorie relativity stojí na dvou jednoduchých, ale přesto hlubokých myšlenkách. Jak jsme už řekli, jedna z nich se týká vlastností světla (a budeme se jí víc věnovat v následující kapitole). Druhá je abstraktnější. Netýká se žádného konkrétního fyzikálního zákona, ale *všech* fyzikálních zákonů a je známa jako *princip relativity*. Princip relativity je postaven na jedné prosté skutečnosti. Kdykoli totiž mluvíme o rychlosti nebo vektoru rychlosti (což je velikost rychlosti spolu se šipkou udávající směr), musíme upřesnit, kdo provádí měření. Význam a důležitost tohoto výroku lehce pochopíme z následující situace.

Představte si Macha, oblečeného do skafandru s malým blikajícím červeným světlem, který se vznášá v naprosté temnotě úplně prázdného kosmického prostoru, daleko od všech planet, hvězd a galaxií. Mach, pohlcen černotou vesmírných končin, je ze své perspektivy nehybný. Kdesi v dáli zahlédne zeleň blikající světlo, které se k němu přibližuje. V jednom okamžiku je už tak blízko, že Mach rozezná, že to bliká světlo na skafandru další obyvatelky kosmu, Šebestové, která Macha pomalu obeplouvá. Oba si zamávají a brzy

nato Šebestová mizí v dálce. Tento romantický příběh lze podobně líčit i z hlediska Šebestové. Začíná stejně. Šebestová se sama ve skafandru vznáší kdesi v obrovitých končinách prázdného prostoru. Zahlédne přibližující se červené blikající světlo a nakonec pozná Macha ve skafandru. Oba si zamávají a Mach zase zmizí v temném vesmíru.

Tato dvě vyprávění zachycují stejnou situaci z dvou odlišných, ale rovnoprávných pohledů. Každý z pozorovatelů se cítí nehybný a vnímá druhého jako pohybujícího se. Obě perspektivy jsou pochopitelné a ospravedlnitelné. Jelikož mezi oběma dítky vesmíru panuje symetrie, na fundamentální úrovni nám nic neumožňuje prohlásit jeden z pohledů je „správný“ a druhý „špatný“. Každá z perspektiv má stejný nárok být nazývána pravdivou.

Tento příklad zachycuje smysl principu relativity, to, že pojem pohybu je relativní. Lze mluvit o pohybu objektu, ale jen vůči jinému objektu. Výrok „Mach se pohybuje rychlostí 15 kilometrů za hodinu“ tedy nedává smysl, protože jsme neuvedli další objekt pro srovnání. Zato výrok „Mach se pohybuje rychlostí 15 kilometrů za hodinu vůči Šebestové“ smysl dává, neboť jsme teď určili, že pohyb se má měřit z hlediska Šebestové. Jak náš příklad ukazuje, takový výrok je naprosto ekvivalentní výroku: „Šebestová se pohybuje rychlostí 15 kilometrů za hodinu vůči Machovi (v opačném směru).“ Jinak řečeno, neexistuje žádný absolutní pojem pohybu. Pohyb je vždy relativní.

Klíčovým bodem je, že Šebestová ani Mach nebyli tlačeni ani taženi a ani žádná jiná síla nebo vliv nenarušily jejich poklidný pohyb konstantní rychlostí, jinak řečeno rovnoměrný přímočarý pohyb. Přesněji bychom tedy měli říct, že pohyb *bez působení vnějších sil* má smysl jen při srovnání s jinými objekty. Tohle je důležité upřesnění, protože když síly působí, mají za následek změny vektorů rychlosti pozorovatelů – tedy změny rychlosti nebo směru pohybu nebo obou – a tyto změny lze pocítit. Kdyby třeba měl Mach na zádech raketové motory, určitě by cítil, jestli jsou zapnuty. Tento vnitřní pocit je skutečný. Když plyny tryskají pryč, Mach *ví*, že se pohybuje, a uvědomuje si to i tehdy, má-li zavřené oči a s žádnými cizími tělesy se neporovnává. Dokonce i bez takových srovnání by si asi netroufl říct, že on byl nehybný, zatímco „zbytek vesmíru se pohyboval vůči němu“. Rovnoměrný přímočarý pohyb je relativní; tohle neplatí pro pohyb s proměnnou rychlostí nebo směrem, stručně *zrychlený pohyb*. (K tomuto výroku se ještě vrátíme v další kapitole, kde se ujmeme zrychleného pohybu a podíváme se blíže na Einsteinovu obecnou teorii relativity.)

Příběh jsme zasadili do temnot prázdného prostoru, čímž jsme se zbavili ulic, domů a podobných objektů, které se obvykle, ačkoli na fundamentální úrovni neospravedlnitelně, honosí zvláštním statutem „nehybných“. Nicméně stejný princip platí i pro pozemské podmínky a fakticky jsme ho všichni mnohokrát zažili.¹ Představte si kupříkladu, že jste usnuli ve vlaku a vzbudíte se právě v okamžiku, kdy se mýjíte s vlakem na sousední koleji. Vyhlédnete

z okna, ale protože skrze druhý vlak jiné objekty nevidíte, nedokážete určit, zda se pohybuje váš vlak, druhý vlak, nebo vlaky oba. Samozřejmě že když se váš vlak otřásá nebo právě zatáčí, jeho pohyb ucítíte. Ale je-li trať dokonale hladká a vlak rychlost ani směr nemění, budete pozorovat jen vzájemný pohyb vlaků, aniž byste určili, který z nich se pohybuje.

Pojďme ještě o krok dál. Představte si, že jste v takovém vlaku a zatáhnete roletu, abyste zcela zakryli okna. Bez možnosti vidět ven a za předpokladu naprosto konstantní rychlosti vlaku nebudete schopni určit svůj stav pohybu. Kupé kolem vás bude vypadat stále stejně bez ohledu na to, že vlak jede rychle po kolejích. Einstein tuto myšlenku, kterou ve skutečnosti pochopil už Galileo Galilei, převedl do fyzikálního jazyka, když řekl, že vy ani váš společenství nemůžete uvnitř uzavřeného kupé provést žádný fyzikální experiment, z něhož byste zjistili, zda se pohybujete. Tohle opět zachycuje princip relativity. Jelikož je jakýkoli pohyb bez účinku vnějších sil relativní, má smysl jen při srovnání s jinými objekty pohybujícími se také bez účinku vnějších sil. Neexistuje žádný způsob, jak určit váš stav pohybu bez nějakého přímého nebo nepřímého srovnání s objekty „venku“. Zkrátka žádný „absolutní“ rovnoměrný pohyb neexistuje; jen srovnání má fyzikální smysl. Einstein si uvědomil, že princip relativity obsahuje ještě velkolepější tvrzení. Že zákony fyziky – ať jsou jakékoli – musí platit stejně pro všechny pozorovatele, kteří se vůči sobě rovnoměrně a přímočaře pohybují. Kdyby Mach a Šebestová jen nepluli vesmírem, ale na svých kosmických lodích dělali i fyzikální experimenty, dojdou k totožným výsledkům. Ještě jednou – oba si mohou naprosto oprávněně myslet, že je jejich vlastní loď v klidu, a to i přesto, že se loď vzájemně pohybují. Pokud jsou jejich aparatury totožné, nic je nemůže odlišit – jejich pozice jsou naprosto symetrické. Fyzikální zákony, které odvodí ze svých experimentů, budou také identické. Oni sami nemohou rovnoměrný přímočarý pohyb cítit – a jejich experimenty tedy na něm nemohou nijak záviset. Právě tato prostá představa uzakoňuje naprostou symetrii mezi takovými pozorovateli; a právě tato představa je obsažena v principu relativity. Brzy z tohoto principu odvodíme hluboké důsledky.

Rychlost světla

Druhá klíčová složka speciální relativity má co do činění se světlem a vlastnostmi jeho pohybu. V protikladu k našemu tvrzení, že výrok „Mach se pohybuje rychlostí 15 kilometrů za hodinu“ postrádá smysl bez určení, vůči komu se pohybuje, ukázalo téměř stoleté úsilí mnoha horlivých experimentálních fyziků, že všichni pozorovatelé se naopak shodnou na tom, že světlo se šíří rychlostí 299 792 458 metrů za sekundu *bez ohledu na srovnávací objekt*.

Tento fakt si vyžádal revoluci v našem vidění vesmíru. Abychom si uvědomili jeho význam, podívejme se, jak se chovají běžná tělesa. Představte si,

že si za krásného a slunného dne pohazujete se svou kamarádkou míčkem. Míček mezi vámi přelétává rychlostí 10 metrů za sekundu, když tu se přižene bouřka. Běžíte se tedy schovat. Jakmile bouřka ustoupí, vrátíte se ke hře, ale všimnete si jistě změny. Kamarádce stojí vlasy na hlavě a v očích má krutý a šílený výraz. Podíváte se jí do ruky a ohromeně zjistíte, že v ní nedrží míč, ale ruční granát. Vaše nadšení pro hru s míčem pochopitelně vyprchá a berete do zaječích. Když společnice hodí granát, pořád letí k vám, ale jelikož utíkáte, blíží se k vám pomaleji než rychlostí 10 metrů za sekundu. Zdravý rozum nám říká, že pokud utíkáme rychlostí řekněme 6 metrů za sekundu, granát se k nám přibližuje rychlostí $(10 - 6 =) 4$ metry za sekundu. A další příklad. Když se na vás v horách řítí sněhová lavina, instinktivně se dáte na útěk; lavina se pak k vám přibližuje pomaleji – což je pro vás dobré. Nehybný jedinec i zde vnímá oproti tomu, kdo utíká, vyšší rychlost přibližování sněhu.

A teď porovnejme tyto základní postřehy o míčích, granátech a lavínách se světlem. Aby srovnání bylo názornější, považujme světlo za tok malých „báličků“ nebo „svazků“, známých jako fotony (tento rys světla ozřejmíme ve 4. kapitole). Spustíme-li blesk na fotoaparátu nebo laser, „střílíme“ proud fotonů tím směrem, do něhož je přístroj natočen. A teď – stejně jako jsme to udělali v případě granátů a laviny – se podívejme, jak se pohyb fotonu jeví tomu, kdo se pohybuje. Představte si, že vaše kamarádka vyměnila granát za silný laser. Když na vás laserem vystřelí, s dobrou aparaturou byste naměřili, že se k vám fotony ze svazku přibližují rychlostí asi 300 000 kilometrů za sekundu. Ale co když se dáte na úprk, stejně jako jste utíkali před granátem? Jakou rychlost přibližování fotonů naměříte? Abychom věci zvýraznili, řekněme, že si stihnete stopnout kosmickou loď *Enterprise* a svištíte od kamarádky rychlostí 50 000 kilometrů za sekundu. Běžná úvaha, vycházející z tradičního Newtonova pohledu na svět, by nás vedla k závěru, že světlo se k nám musí blížit *pomaleji*, vždyť přece před ním prcháme. Konkrétně bychom očekávali, že se fotony přibližují rychlostí $(300\,000 - 50\,000 =) 250\,000$ kilometrů za sekundu.

Nashromážděné důkazy z experimentů, které začaly už v osmdesátých letech 19. století, stejně jako pečlivé rozbor Maxwellovy elektromagnetické teorie světla, postupně přesvědčily vědeckou veřejnost, že nic takového se nestane. *Ba i na úprku stále naměříte rychlost světla rovnou 299 792 458 metrům za sekundu, ani o trochu méně.* Třebaže to v první chvíli zní směšně a absurdně, na rozdíl od míčku, granátu nebo laviny se světlo vždycky pohybuje touto rychlostí. A to i když fotony honíte nebo jim letíte vstříc – jejich rychlost přibližování nebo vzdalování je vždy zcela stejná; fotony se vždy budou pohybovat rychlostí oněch přibližně 300 000 kilometrů za sekundu. Ať je vzájemná rychlost zdroje světla a pozorovatele jakákoli, je rychlost světla vždycky stejná.²

Kvůli technickým omezením nemůžeme popsané „pokusy“ se světlem provádět. Můžeme si však vypomoci srovnatelnými pokusy. V roce 1913 napadlo holandského fyzika Willema de Sittera, že by šlo rychle se pohybující dvoj-

hvězdy (dvě hvězdy, které se vzájemně obíhají) využít ke zjišťování vlivu pohybu na rychlost světla. Různé experimenty tohoto druhu za posledních osmdesát let potvrdily, že světlo přicházející z pohybující se hvězdy má rychlost *stejnou* jako světlo z hvězdy nehybné, stále oněch přibližně 300 000 kilometrů za sekundu, třebaže neustále se zdokonalující aparatury měří tuto rychlost stále přesněji. Navíc byla v posledních sto letech provedena řada experimentů, které přímo měřily rychlost světla za různých podmínek nebo testovaly řadu důsledků vyplývajících z této vlastnosti světla – a všechny potvrdily konstantnost rychlosti světla.

Pokud je pro vás tato vlastnost světla nestavitelná, nejste sami. I fyzici na začátku 20. století vynaložili mnoho úsilí, aby ji popřeli. Nepovedlo se jim to. Einstein se naopak neměnnosti rychlosti světla chopil, neboť právě ona byla odpovědí na otázku, která ho trápila už v mládí: bez ohledu na to, jak rychle letíš za světlem, stále se od tebe vzdaluje rychlostí světla. Zdánlivou rychlost, kterou se světlo vzdaluje, nelze ani o píď snížit pod oněch 300 000 kilometrů za sekundu, a aby se světlo zdálo nehybné, není možné vůbec. Tečka. Ale toto vítězství nad konfliktem bylo triumfem nemalé velikosti. Einstein pochopil, že konstantnost rychlosti světla znamená pád Newtonovy fyziky.

Co plyne z podivného chování rychlosti

Rychlost je mírou toho, jak daleko se předmět dostane za zvolenou dobu. Jedeme-li v autě rychlostí 105 kilometrů za hodinu, znamená to samozřejmě, že ujedeme 105 kilometrů, pokud vydržíme hodinu ve stejném stavu pohybu. Takto formulován vypadá pojem rychlosti poměrně prozaicky a může nám připadat divné, proč jsme tropili takový povyk kolem rychlosti míčů, laviň a fotonů. Všimněme si ale, že *vzdálenost* vypovídá o prostoru – konkrétně měří, kolik prostoru je mezi dvěma body. A také si povšimněme, že *doba* je pojem týkající se času – konkrétně kolik ho uplyne mezi dvěma událostmi. Vyjádříme-li se takto, vidíme, že každý experimentální fakt, který se vzpírá našim běžným představám o rychlosti, jako například neměnnost rychlosti světla, má potenciál vzepřít se běžným představám o samotném čase a prostoru. Proto také podivné chování rychlosti světla volá po revizi fyziky – revizi, kterou poprvé provedl Einstein a došel díky ní k pozoruhodným závěrům.

Důsledky pro čas: první část aneb mírová dohoda

Bez větší námahy můžeme na základě konstantnosti rychlosti světla ukázat, že naše běžné představy o čase jsou jedním slovem špatné. Představte si vůdce dvou válčících národů, kteří zasedli za dlouhý jednací stůl na opačných stranách a právě dospěli ke shodě ohledně příměří, ale žádný z nich nechce dohodu podepsat dříve než druhý. Generální tajemník OSN přijde

s geniálním řešením. Dprostřed stolu mezi oba pohlaváry umístí vypnutou žárovku. Jakmile ji rozsvítí, světlo z ní přiletí k oběma prezidentům současně, protože jsou od ní stejně daleko. Oba prezidenti souhlasí, že podepíší dohodu v momentu, kdy světlo uvidí. Plán je nakonec uskutečněn ke spokojenosti obou stran.

Úspěchem zářící generální tajemník uplatní stejný trik i u dvou dalších znesvářených národů, které právě dospěly k dohodě o příměří. Jediným rozdílem je, že se tentokrát stůl s oběma vůdci nachází ve vlaku, který jede konstantní rychlostí. Čirou náhodou sedí prezident Dopředustánu v zadní části vlaku otočen po směru pohybu vlaku, zatímco prezident Dozadustánu je otočen směrem opačným. Obeznámeni s tím, že zákony fyziky mají přesně stejný tvar, nehledě na náš stav pohybu, pokud je tento pohyb rovnoměrný a přímočarý, rozdílů si vůbec nevšímají a celý obřad proběhne stejně jako minule. Oba prezidenti podepíší dohodu a spolu se svitou svých poradců oslavují konec nepřátelství.

Hned poté dospěje k obyvatelům obou zemí zpráva, že boje byly zastaveny. A mnozí z nich celý ceremoniál sledovali z nástupiště. Všichni ve vlaku s jednacím stolem jsou vzápětí vyděšeni zprávou o nových přestřelkách, které vyvolalo tvrzení dopředustánských občanů, že byli ošáleni, jelikož jejich prezident podepsal dohodu před dozadustánským prezidentem. Protože všichni ve vlaku dosvědčují, že oba smlouvu podepsali najednou, diví se, proč si ti, kdo přihlížejí z nástupiště, myslí něco jiného.

Podívejme se detailněji, jak věc vidí lidé na nástupišti. Žárovka je nejprve zhasnutá, v určité chvíli se rozsvítí a vyšle paprsky světla oběma prezidentům. Z perspektivy diváka na nástupišti se prezident Dopředustánu pohybuje vstříc světlu, zatímco prezident Dozadustánu před ním ujíždí. Pro diváka na nástupišti to znamená, že světlo, aby se dostalo k dopředustánskému prezidentovi, nemusí letět tak daleko, jako je dráha, kterou musí uletět k dozadustánskému prezidentovi, který se vzdaluje. Tento výrok se netýká *rychlosti* světla, které letí k oběma vůdcům – jak jsme už poznamenali, ať už je stav pohybu pozorovatele jakýkoli, je rychlost světla vždy tatáž. Spíše popisujeme, jak daleko z pohledu lidí na nástupišti musí paprsek letět, aby dorazil k tomu či onomu prezidentovi. Jelikož je vzdálenost k dopředustánskému prezidentovi menší a rychlost světla je vždy stejná, dorazí světlo k prezidentovi Dopředustánu dříve. A proto si jeho občané myslí, že byli podvedeni.

Když americká televizní stanice CNN vysílá rozhovor s očitými svědky, prezidenti, jejich poradci ani generální tajemník nemohou věřit svým uším. Všichni se shodují, že žárovka byla bezpečně připevněna ve středu úsečky mezi prezidenty, a tudíž – bez dalších řečí – vyslané světlo uletělo k oběma stejnou vzdálenost. Jelikož rychlost světla letícího na obě strany stolu je stejná, jak věří a fakticky i pozorují, muselo světlo evidentně dospět k oběma prezidentům zároveň.

Kdo má pravdu, lidé ve vlaku, nebo ti venku? Pozorování obou skupin i jejich argumentace jsou poctivé. Odpověď zní, že pravdu mají obě skupiny. Stejně jako u našich dvou obyvatel kosmu, Macha a Šebestové, i zde má každá perspektiva stejný nárok být nazvána pravdivou. Drobným rozdílem je to, že zde si ony pravdy zdánlivě protirečí. Všechny zajímá důležitá politická otázka: Podepsali prezidenti dohodu současně? Pozorování a úvahy výše nás nutně vedou k odpovědi, že *podle lidí ve vlaku ano*, zatímco *podle lidí na nástupišti ne*. Jinak řečeno, události současné z hlediska jednoho pozorovatele nebudou současné z hlediska pozorovatele, který se vůči prvnímu pohybuje.

To je překvapivý závěr. Je to jeden z nejhlubších kdy objevených poznatků o povaze reality. I když za nějakou dobu po přečtení této knihy zapomenete na všechno kromě tohoto pokusu o uvolnění mezinárodního napětí, který nakonec špatně skončil, uchováte v sobě podstatu Einsteinova objevu. Aniž bychom zabředli do komplikované matematiky nebo do propleteného řetězce logických úvah, tato naprosto neočekávaná vlastnost času přímo vyplynula z neměnnosti rychlosti světla, jak náš scénář ukázal. Všimněte si, že kdyby rychlost světla nebyla konstantní, ale chovala se podle naší zkušenosti s pomalými míčky, granáty a lavinami, lidé na nástupišti by souhlasili s politiky ve vlaku. Pozorovatel na nástupišti by sice stále tvrdil, že světlo muselo urazit delší vzdálenost k prezidentu Dozadustánu než k prezidentu Dopředustánu, ale obvyklá intuice nám napovídá, že se světlo k prezidentu Dozadustánu (sedícímu v přední části vlaku) pohybuje rychleji, jelikož dostalo „šťouchanec“ od vlaku jedoucího vpřed. Podobně by se světlo k prezidentu Dopředustánu pohybovalo pomaleji, pohyb vlaku by je totiž „táhl“ zpět. Když započteme tyto (klamné) jevy, pozorovatelé na nástupišti by měli vidět paprsky dorazit k oběma hlavám států v téže chvíli. Ovšem v reálném světě nemůže světlo zpomalit ani zrychlit, nemůže být postrčeno ani zbrzděno. Diváci na nástupišti tedy oprávněně tvrdí, že světlo k dopředustánskému prezidentovi doletělo dříve.

Neměnnost rychlosti světla tak vyžaduje, abychom se vzdali věkovitého názoru, že současnost je univerzálním pojmem pro všechny, ať už se pohybují jakkoli. Ideální hodiny, které podle představ našich předků každou sekundu svým tiknutím neúprosně ohlašují univerzální a přesný čas na Zemi, na Marsu, na Jupiteru i v galaxii v souhvězdí Andromedy, jakož i v každém koutku a skulince vesmíru, tedy neexistují. Naopak, pozorovatelé ve vzájemném pohybu se neshodnou na tom, které události se odehrály současně. Zopakujme ještě jednou, že tento závěr zní tak neobvykle proto, že efekty jsou v případě běžných rychlostí takřka nepostřehnutelné. Pokud by jednáci stůl měřil 30 metrů a vlak se pohyboval rychlostí 15 kilometrů za hodinu, pozorovatelé na nástupišti by „viděli“, že světlo k prezidentovi Dopředustánu doletělo asi o miliontinu miliardtiny sekundy dříve než k prezidentovi dozadustánskému. Rozdíl zde skutečně je, ale tak nepatrný, že ho lidské smysly nezaznamenají.

Kdyby se vlak pohyboval mnohokrát rychleji, řekněme rychlostí 270 000 kilometrů za sekundu, podle přihlížejících na nástupišti by světlo doletělo k prezidentovi Dozadustánu za dobu asi devatenáctkrát delší než k prezidentovi Dopředustánu. Při velkých rychlostech se překvapivé efekty speciální relativity stávají patrnějšími.

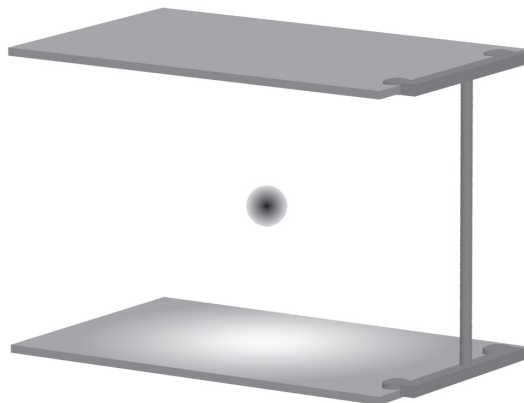
Důsledky pro čas: druhá část aneb světelné hodiny

Je těžké předložit abstraktní definici času – takové pokusy obvykle ztroskotávají na tom, že ti, kdo se o to pokoušejí, užijí samotného slova „čas“, nebo se alespoň uchylují ke krkolomným formulacím, aby se tomuto slovu vyhnuli. Abychom se těchto nástrah vyvarovali, zaujmeme pragmatictější postoj a budeme časem definovat to, co se měří hodinami. Tím samozřejmě tíhu definice přesouváme na slovo „hodiny“; v tomto případě lze hodinami trochu nepřesně mínit zařízení vykonávající dokonale pravidelné cyklické pohyby. Čas budeme měřit počtem cyklů, které hodiny vykonají. Dobře známé příklady hodin, například náramkové hodinky, do této definice zapadají. Mají ručičky, které v pravidelných intervalech obíhají, a čas skutečně měříme jako počet otáček (nebo jejich zlomků), které ručičky mezi dvěma událostmi vykonají.

Samozřejmě že výraz „dokonale pravidelné cyklické pohyby“ vskrytu k pojmu času odkazuje, jelikož „pravidelný“ vyjadřuje stejné trvání každého cyklu. Prakticky tento požadavek řešíme tím, že hodiny sestavíme z fyzikálních součástí, od nichž na fundamentálních základech očekáváme, že procházejí opakujícími se cyklickými změnami, které se od cyklu k cyklu nemění. Náзорným příkladem jsou dědečkovy hodiny s kyvadlem nebo atomové hodiny.

Naším cílem je pochopit, jak pohyb ovlivňuje plynutí času, a protože jsme čas definovali pragmaticky pomocí hodin, můžeme svou otázku nahradit otázkou, jak pohyb ovlivňuje „tikání“ hodin. Měli bychom zdůraznit hned na začátku, že diskuse se netýká toho, jak reagují mechanické součástky konkrétního druhu hodin na otřesy nebo šubání, které přináší kodrcavý pohyb; budeme totiž uvažovat jen o nejjednodušším pohybu – s absolutně konstantní rychlostí i směrem –, kdy vůbec žádné třesení nenastane. Místo toho hledáme odpověď na univerzální otázku, jak pohyb ovlivňuje plynutí času jako takového a tím i tikání *všech* hodin, ať už jsou jejich design a konstrukce jakékoli.

Pro tento účel zavedeme koncepčně nejjednodušší (byť nejméně praktické) hodiny na světě – „světelné hodiny“. Skládají se ze dvou malých zrcadel namontovaných na podpěru a namířených proti sobě a z jediného fotonu, který se od zrcadel odráží a létá tam a zpět (viz obrázek na straně 45 nahoře). Jsou-li zrcadla asi 15 centimetrů vzdálená, bude fotonu zpáteční cesta trvat miliardtinu sekundy. „Tiknutím“ můžeme myslet každý okamžik, kdy se foton odrazí od spodního zrcadla – miliarda tiknutí znamená, že uplynula sekunda.

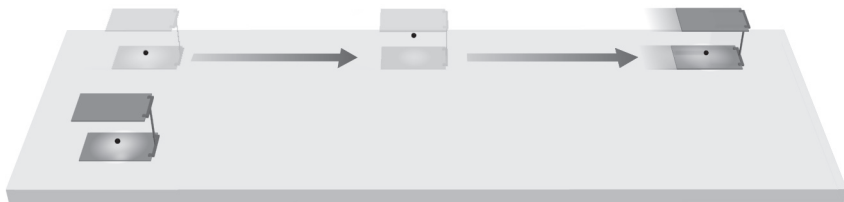


Světelné hodiny se skládají z dvou rovnoběžných zrcadel, mezi nimiž létá foton. Hodiny „tiknou“ pokaždé, když foton ukončí jednu cestu tam a zpět.

Světelných hodin můžeme užít k měření doby mezi dvěma událostmi: počet tiknutí jednoduše násobíme dobou trvání jednoho tiknutí. Pokud kupříkladu stopujeme koňské dostihy a napočítáme od startu k cíli 55 miliard letů fotonu sem a tam, usoudíme, že závod trval 55 sekund.

Světelné hodiny jsme zvolili proto, že nás jejich mechanická jednoduchost osvobodí od povrchních detailů a poskytne nám tak nejjasnější vhled do toho, jak pohyb ovlivňuje plynutí času. Pro lepší představu si myslíme, že nečinně sledujeme plynutí času pohledem na tikající světelné hodiny, položené na nedalekém stole. Druhé hodiny leží na stole s kolečky, který se pohybuje konstantní rychlostí (ilustrace dole). Budou pohybuující se hodiny tikat stejně rychle jako ty nehybné?

Abychom vznesenou otázku mohli zodpovědět, uvažujme z naší perspektivy o dráze, kterou foton v pohybuujících se hodinách v průběhu jednoho tiknutí zanechá. Foton začíná u spodního zrcadla, jako na obrázku dole, a nejprve letí k hornímu zrcadlu. Vzdálenost mezi oběma zrcadly (kolmá ke směru pohybu hodin) není pohybem ovlivněna – zrcadla leží ve stejných rovinách jako v případě nehybných hodin. Jelikož se z našeho pohledu hodiny pohybují, foton musí letět šikmo, jak je vidět z obrázku na další stránce. Kdyby



Stacionární světelné hodiny (vepředu) a světelné hodiny posouvající se neměnnou rychlostí.

foton letěl po jiné dráze, minul by horní zrcadlo a vylétl by do prostoru. Protože by měly pohybuující se hodiny právo tvrdit, že jsou nehybné a pohybuje se vše ostatní, víme, že foton horní zrcadlo *zasáhne*, a tedy námi nakreslená dráha je správná. Foton se odrazí od horního zrcadla a podobnou šikmou trasou se vrátí k dolnímu zrcadlu, díky čemuž pohybuující se hodiny tiknou. Prostým, ale podstatným faktem je, že dvojice šikmých drah, kterou z našeho hlediska foton prochází, je *delší* než dvojice svislých drah, po nichž letí foton v nepohybuujících se hodinách; kromě překonání vzdálenosti nahoru a dolů mezi zrcadly musel foton v pohybuujících se hodinách z našeho pohledu ještě letět doprava. Navíc v důsledku neměnnosti rychlosti světla letí fotony v obou hodinách stejně rychle. Ale jelikož v pohybuujících se hodinách uletí foton delší dráhu, budou tyto hodiny tikat *s menší frekvencí*. Tento prostý argument ukazuje, že pohybuující se hodiny tikají pomaleji než hodiny v klidu. A protože jsme se dohodli, že počet tiknutí je mírou času, vidíme, že plynutí času se pro pohybuující se hodiny zpomaluje.

Mohli byste namítnout, že tento fakt odráží jen zvláštní rysy světelných hodin a neplatil by pro dědečkovy hodiny nebo hodiny značky Rolex. Zpomalil by se i čas měřený těmito běžnějšími hodinami? Odpověď je hlasitě „ano“, jak lze vidět uplatněním principu relativity. Přišroubujme „rolexky“ k horní části všech světelných hodin a zopakujme předchozí experiment. Jak už víme, nehybné světelné hodiny i „rolexky“ naměří stejné časy, miliarda tiknutí světelných hodin připadá na jednu sekundu „rolexek“. Ale co se stane s pohybuujícími se světelnými hodinami s připojenými „rolexkami“? Zpomalí se rychlost tikání „rolexek“ tak, že zůstanou synchronizovány se světelnými hodinami, na které jsou připojeny? Aby byly naše argumenty přesvědčivější, představme si, že se dvojice hodin pohybuje proto, že je připevněna k podlaze kupé ve vlaku bez oken, který kolem hladce projíždí konstantní rychlostí. Podle principu relativity nemá cestující ve vlaku nástroj, jak poznat, zda se pohybuje. Ale kdyby se světelné hodiny a hodiny značky Rolex začaly rozcházet, jistě by si toho všiml a usoudil by, že vlak jede. A proto oboje hodiny *musí* měřit stále stejné doby; „rolexky“ se *musí* zpomalit v přesně stejném poměru jako světelné hodiny. Nehledě na druh, značku nebo jejich konstrukci, hodiny, které se vzájemně pohybují, zaznamenávají plynutí času různou rychlostí.

Z výkladu o světelných hodinách také vyplývá, jak závisí přesný časový rozdíl mezi nehybnými a pohybuujícími se hodinami na tom, o kolik delší dráhu



Z našeho pohledu letí foton v pohybuujících se hodinách po šikmé dráze.

musí uletět foton v pohyblivých hodinách. Tento rozdíl závisí na rychlosti pohybu hodin – čím rychleji se z pohledu stojícího pozorovatele hodiny pohybují, tím delší dráhu směrem doprava musí foton urazit. Dospíváme k závěru, že v porovnání s nehybnými hodinami se tempo tikání pohyblivých hodin zpomaluje, jak se hodiny pohybují rychleji a rychleji.³

Abychom získali představu o míře, všimněme si, že foton skuteční zpáteční cestu asi za miliardtinu sekundy. Aby se hodiny pohnuly o znatelnou vzdálenost během jednoho tiknutí, musí se pohybovat značně rychle – to znamená nezanedbatelným zlomkem rychlosti světla. Když se pohybují běžnou rychlostí, třeba rychlostí 18 kilometrů za hodinu (5 metrů za sekundu), vzdálenost, o kterou se posunou doprava, je přímo titěrná – asi 5 miliardtin metru. Vzdálenost, kterou foton musí urazit navíc, je malá, a tudíž jen nepatrně ovlivňuje tempo tikání pohybujících se hodin. A podle principu relativity tohle platí pro všechny hodiny, tedy i pro čas samotný. To je důvod skutečnosti, že bytosti jako my, které se vůči sobě pohybují tak pomalu, si obecně nejsou zkreslení v plynutí času vědomy. Příslušné efekty jsou sice jistě reálné, ale zcela miniaturní. Kdybychom se však mohli s hodinami pohybovat řekněme rychlostí tři čtvrtin rychlosti světla, z rovnic speciální teorie relativity plyne, že nehybným pozorovatelům by se zdálo tempo tikotu našich hodin asi jen dvoutřetinové ve srovnání s jejich vlastními. A to by už byl jev opravdu viditelný.

Život v pohybu

Viděli jsme, že konstantnost rychlosti světla má za následek, že pohybující se světelné hodiny tikají pomaleji než hodiny v klidu. A díky principu relativity to musí platit nejen pro světelné hodiny, ale pro každé hodiny, tedy i pro čas samotný. Čas plyne pomaleji pro osobu v pohybu než pro osobu v klidu. Jsou-li celkem jednoduché úvahy, které nás k tomuto závěru přivedly, správné, neměli bychom si prodloužit život tím, že bychom se pohybovali? Nakonec když čas plyne pro pohybující se objekty pomaleji, měla by se tato nestejnost vztahovat nejen na čas měřený hodinami, ale i na čas měřený údery srdce a chátráním lidských orgánů. To se opravdu *děje*, jak bylo přímo potvrzeno – nikoli měřením délky života lidských bytostí, ale jistých částic z mikrosvěta: mionů. Je tu ale jeden háček, který nám brání tvrdit, že jsme objevili elixír mládí.

V poklidné laboratoři se miony rozpadají procesem velmi příbuzným radioaktivnímu rozpadu, průměrně za dobu asi dvou miliontin sekundy. Tento rozpad je experimentálním faktem, podpořeným ohromnou řadou důkazů. Je to, jako když mion žije s pistolí u spánku. Jakmile dosáhne věku dvou miliontin sekundy, stiskne spoušť a rozletí se na neutrino a elektron. Vyberou-li si ale miony místo klidu laboratoře k životu zařízení známé jako urychlovač částic a to je roztlačí téměř až k rychlosti světla, očekávaná střední délka

jejich života, měřená vědci v laboratoři, dramaticky vzroste. Tohle se *opravdu* děje. Při 99,5 % rychlosti světla pozorujeme asi desetinásobnou dobu života mionu. Speciální teorie relativity vysvětluje tento jev tak, že „náramkové hodinky“ nesené mionem tikají pomaleji než hodiny v laboratoři, takže ještě dlouho poté, co laboratorní hodiny ukážou, že je čas stisknout spoušť, ukazují hodinky spojené s letícím mionem, že okamžik zkázy ještě nenastal. To je velmi přímá a zásadní ukázka vlivu pohybu na plynutí času. Kdyby kolem stejnou rychlostí jako miony svištěli lidé, vzrostla by i jejich doba života stejným poměrem. Místo aby žili 70 let, dožívali by se věku přímo metuzalémského – 700 let.⁴

Teď k tomu háčku. Pro pozorovatele v laboratoři žijí rychlé miony mnohem déle než jejich sourozenci v klidu – je tomu tak proto, že čas letícím mionům *ubíhá pomaleji*. Toto zpomalení se netýká jen hodiněk, které miony „nosí“, ale všeho, co tyto částice podnikají. Kupříkladu pokud je nehybný mion schopen přečíst za život 100 knih, tak i jeho letící bratr bude schopen přečíst 100 knih, protože – ačkoli se zdá, že se dožije vyššího věku – i jeho tempo čtení, stejně jako všeho ostatního v jeho životě, se zpomalí. Z pohledu laboratoře to vypadá, že mion žije svůj život v pomalém rytmu; z tohoto pohledu žije letící mion déle než mion v klidu, ale „množství života“, který oba miony prožijí, je přesně stejné. Stejný závěr samozřejmě platí i pro rychle letící dlouhověké lidi. Z *jejich* pohledu plyne život jako obvykle. Z naší perspektivy žijí život v superpomalém pohybu, a proto jeden z jejich normálních životních cyklů zabere ohromné množství *našeho* času.

Kdo se tedy pohybuje?

Relativita pohybu je jak klíčem k pochopení Einsteinovy teorie, tak potenciálním zdrojem nedorozumění a omylů. Možná jste si všimli, že změna perspektivy zamění úlohu „letících“ mionů, o jejichž hodinách jsme tvrdili, že jdou pomaleji, s úlohou jejich „stojících“ protějšků. Jako může Mach prohlásit, že byl v klidu a pohybovala se Šebestová, a Šebestová stejným právem tvrdit opak, miony, které jsme nazývali „letícími“, mají plné právo tvrdit, že ony jsou těmi v klidu a naopak že „stojící“ miony jsou těmi, které se pohybují (v opačném směru). Předvedené argumenty lze uplatnit i z pohledu „letících“ mionů, což nás přivádí ke zdánlivě opačnému závěru, tomu, že miony, které jsme označili za „stojící“, žijí pomaleji ve srovnání s těmi podle nás „letícími“.

Už jsme se setkali se situací (při podepisování smlouvy s pomocí žárovky), kdy různé pohledy vedly k výsledkům, které se zdály v naprostém rozporu. V onom případě nás základní úvahy speciální teorie relativity donutily vzdát se zakořeněné představy, že všichni, nehledě na svůj stav pohybu, se shodnou na tom, které události proběhly současně. Nynější nesrovnalost se zdá ještě horší. Jak mohou dva pozorovatelé říkat o sobě navzájem, že druhý žije

pomaleji? Řečeno ještě dramatičtěji, různé, ale stejně hodnotné pohledy mionů zdá se vedou k závěru, že každá skupina se smutkem v hlase, ale rozhodně tvrdí, že umře dříve než druhá. Učíme se, že svět se dokáže chovat neočekávaným způsobem, ale věříme, že to nepřekročí hranice logické absurdity. O co tedy jde?

Stejně jako u jiných zdánlivých paradoxů pramenících ze speciální relativity odhaluje bližší prošetření i tohoto dilematu nové poznatky o fungování vesmíru. Abychom nemuseli mionům přisuzovat stále komičtější lidské vlastnosti, vraťme se k Machovi a Šebestové, kteří si k blikajícím světélům na skafandru přikoupili zářivé digitální hodiny. Mach vidí situaci tak, že on sám je nehybný, zatímco Šebestová s blikajícím zeleným světlem a velkými digitálními hodinami letí z dále, přiblíží se, mine Macha a zase zmizí v temnotách. Mach si všimne, že hodiny Šebestové jdou pomaleji než jeho (s mírou zpomalení závislou na rychlosti, jakou se míjejí). Kdyby byl bystřejší, zaregistroval by, že nejen plynutí času na jejích hodinách, ale všechno – včetně tempa, jakým mává nebo mrká – se jeví zpomalené. Z pohledu Šebestové se naprosto stejná pozorování vztahují na Macha.

Byť to vypadá paradoxně, pokusme se vypreparovat přesný experiment, který by logickou absurditu odhalil. Nejjednodušší je požádat Macha i Šebestovou, aby si v momentu, kdy se budou míjet, nastavili hodiny na 12:00. Jak se začnou vzdalovat, oba se shodně začnou dušovat, že hodiny toho druhého jdou pomaleji. Aby tento rozdíl mohli srovnat, musí se k sobě Mach a Šebestová vrátit a přímo časy na hodinách porovnat. Jak toho docílit? Mach, aby Šebestovou dohonil, může zapnout raketové motory. Jakmile to ale udělá, symetrie mezi oběma se poruší, jelikož Mach prošel *zrychleným* pohybem pod vlivem vnějších sil. Když se k sobě tímto způsobem vrátí, Machovy hodiny budou opravdu o něco opožděny. On sám teď musí definitivně přiznat, že se pohyboval, protože to sám cítil. Pohledy Macha a Šebestové už nejsou rovnoprávné. Zapnutím trysek se Mach zřekl práva tvrdit, že je v klidu.

Pokud takto Mach dohoní Šebestovou, časový rozdíl mezi nimi bude záviset na rychlosti a na detailech toho, jak Mach zapráhl svoje motory. Jak už víme, pokud půjde o rychlosti malé, budou i tyto rozdíly titěrné. Jde-li ale o rychlosti alespoň vzdáleně srovnatelné s rychlostí světla, rozdíly se mohou počítat na minuty, dny, roky, staletí nebo i delší časové jednotky. Jako konkrétní příklad si představme, že vzájemná rychlost Macha a Šebestové v momentu míjení tvoří 99,5 % rychlosti světla. Dále uveďme, že Mach podle svých vlastních hodin počká 3 roky a pak naplno zapne motory; ty ve chvílce změní jeho směr a navedou ho zpět na dráhu k Šebestové – bude se k ní přibližovat stejnou rychlostí 99,5 % rychlosti světla. Když k ní dorazí, jeho hodiny budou ukazovat 6 let, protože aby se k ní vrátil, potřeboval další 3 roky. Ovšem podle matematiky speciální teorie relativity uplynulo na jejích hodinách do okamžiku návratu přibližně 60 let. To nejsou žádné kejkle: Šebestová bude muset

lovit hluboko ve své paměti Macha, který ji kdysi před 60 lety minul v prostoru. Zato podle Macha se potkali před pouhými 6 lety. V určitém smyslu udělal pohyb z Macha opravdového cestovatele v čase, byť jen v jednom přesném významu: cestoval do budoucnosti Šebestové.

Dostat oboje hodiny zpět k sobě za účelem srovnání se může zdát pouhou zásobovací nepříjemností, ale ve skutečnosti to skrývá podstatu věci. Lze si představit pestrou paletu triků, jak tuto nesnáz, bránící nás před skutečným paradoxem, obejít, ale nakonec žádný nebude účinný. Co kdybychom místo opětovného setkání umožnili Machovi s Šebestovou, aby si porovnali hodiny za pomoci mobilních telefonů? Kdyby takový telefonát fungoval bez zpoždění, čelili bychom nepřekonatelnému protimluvu. Z perspektivy Šebestové běží totiž Machovy hodiny pomaleji, a proto do telefonu ohlásí kratší dobu. Z Machova pohledu běží zase pomaleji hodinky Šebestové, a proto kratší dobu ohlásí ona. Oboje najednou nemůže být pravda, a tudíž by Einstein ležel na lopatkách. Klíč je v tom, že mobilní telefony, stejně jako jiné formy komunikace, nemohou fungovat okamžitě, tedy bez prodlev. Mobilní telefony vysílají a přijímají rádiové vlny, což je odrůda světla, jejich signál se tedy pohybuje rychlostí světla. To znamená, že chvíli trvá, než signál dorazí – fakticky dost dlouho na to, aby se perspektivy staly slučitelnými.

Podívejme se na to nejprve z Machova pohledu. Představte si, že každou celou hodinu Mach zarecituje do svého sluchátka: „Je dvanáct hodin a mám se dobře,“ „Je jedna hodina a mám se dobře“ atd. Protože z jeho hlediska jdou hodiny Šebestové pomaleji, nejprve si pomyslí, že Šebestová uslyší jeho hlášení dříve, než příslušnou hodinu ukážou její hodiny, a bude muset souhlasit, že její hodiny jdou pomaleji. Ale brzy vše přehodnotí: „Jelikož se Šebestová ode mě vzdaluje, signál z mého mobilu k ní musí letět stále delší dráhu. Možná tento dodatečný čas kompenzuje zpomalenost jejích hodin.“ Postřeh, že proti sobě stojí dva jevy – pomalost jejích hodin a čas šíření jeho signálu –, Macha inspiruje k tomu, že si sedne a číselně vyjádří jejich společný účinek. Spočítá, že čas šíření jeho signálu *více než kompenzuje* pomalost hodin Šebestové. Dospěje k překvapivému závěru, že Šebestová obdrží jeho signály ohlašující celou hodinu podle jeho časomíry *později*, než danou hodinu spatří na svých hodinách. Jelikož si je Mach vědom fyzikálního vzdělání své kamarádky, ví, že Šebestová dokáže započítat čas pro přenos signálu, když bude dělat závěry o *jeho* hodinách podle jeho telefonátu. I po započtení času pro přenos signálu dojde Šebestová k závěru, že Machovy hodiny tikají pomaleji než její vlastní.

Stejně úvahy lze užít i z pohledu Šebestové, která posílá hodinové telefonní signály Machovi. Nejdříve si kvůli Machovým zpomaleným hodinám myslí, že on její signály zaznamená dříve, než vyšle své vlastní. Ale když si uvědomí stále rostoucí vzdálenost, kterou signály musí urazit, aby zachytily Macha vzdalujícího se v temnotách, uvědomí si, že Mach fakticky její signály dostane

až *poté*, co odešle signály vlastní. Ještě jednou zopakujme: ona si uvědomuje, že i když Mach odečte čas potřebný na šíření signálu, stejně dojde podle jejích telefonátů k závěru, že její hodiny jdou pomaleji než jeho vlastní.

Dokud Mach ani Šebestová nezrychlují, jejich pohledy jsou zcela rovnoprávné. Ačkoli to zní paradoxně, oba si myslí, že hodiny toho druhého jdou pomaleji, a přitom si uvědomují, že na tom není vůbec nic nelogického.

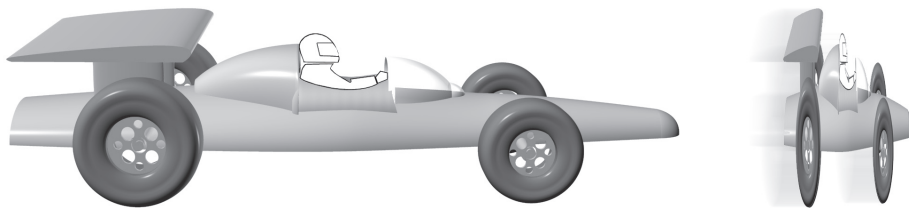
Vliv pohybu na prostor

Předchozí text odhaluje, že pozorovatelé vidí pohybující se hodiny tikat pomaleji než své vlastní – tedy že čas je ovlivněn pohybem. Nedá moc práce ukázat, že podobně dramatický vliv má pohyb i na prostor. Vraťme se k Pavlovi, Petrovi a jeho autu. V prodejně – jak víme – si Petr pečlivě změřil délku svého auta měřicím pásmem. Jelikož Petr uhání v autě, nemůže Pavel aplikovat stejnou metodu a musí délku auta měřit nepřímým způsobem. Jeden takový způsob jsme už zmínili: Pavel odstartuje hodinky právě v okamžiku, kdy ho mine přední nárazník, a zastaví je, když ho mine nárazník zadní. Násobením uběhlé doby a známé rychlosti automobilu získá délku auta.

Uplatníme-li náš nový poznatek o zvláštěnostech v chování času, není těžké si uvědomit, že z Petrova pohledu je on sám nehybný, zatímco Pavel se pohybuje, a tudíž Pavlovy hodiny jdou podle Petra pomaleji.

Díky tomu se Petr dovítí, že Pavlovo nepřímé měření délky auta povede ke *kratší* délce ve srovnání s délkou naměřenou v prodejně měřicím pásmem, protože Pavel do svého výpočtu (rychlost krát doba) dosadil čas měřený hodinami, které šly pomalu. Protože hodiny jdou pomalu, uběhne celkově kratší doba, a tudíž i vypočtená délka bude kratší.

Proto bude Pavel vnímat délku Petrova pohybujícího se auta jako kratší, než je délka naměřená v klidu. Tohle je příklad obecného jevu, že pozorovatelům se jeví pohybující se objekty zkrácené ve směru pohybu. Rovnice speciální teorie relativity kupříkladu ukazují, že objekt letící rychlostí rovnou 98 % rychlosti světla se bude nehybnému pozorovateli jevit asi pětinasobně (o 80 %) zkrácený. Tento jev ilustruje⁵ následující obrázek.

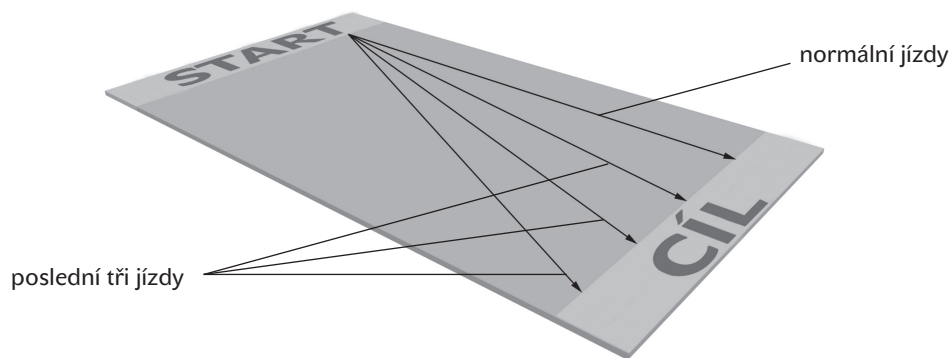


Pohybující se objekt se zkracuje ve směru pohybu.

Pohyb časoprostorem

Konstantnost rychlosti světla vyústila v nahrazení tradičních pohledů na čas a prostor jako na tuhé a objektivní struktury novou představou, v níž velmi záleží na vzájemném pohybu mezi pozorovatelem a pozorovaným. Tady bychom mohli výklad ukončit, protože si už uvědomujeme, že pohybující se objekty se vyvíjejí pomalu a jsou zkráceny zepředu dozadu. Speciální teorie relativity však nabízí hlubší a sjednocenou perspektivu, jež tyto jevy zahrnuje.

Abychom tuto perspektivu pochopili, představme si značně nepraktické vozidlo, které bleskově dosáhne rychlosti 150 kilometrů za hodinu a tuto rychlost si udrží – ani nezrychlí, ani nezpomalí –, dokud ho stiskem tlačítka nezastavíme. Také si představme, že díky své rostoucí pověsti zkušeného řidiče je Petr pověřen provést zkušební jízdu tohoto vozidla na dlouhé, široké a přímé trati uprostřed plochého území v poušti. Jelikož je vzdálenost mezi startem a cílem 15 kilometrů, mohlo by ji vozidlo urazit za desetinu hodiny, tj. za 6 minut. Pavel, jehož zaměstnali jako automobilového inženýra, dozírá na údaje; znepokojí ho, že ačkoli většina jízd trvala 6 minut, posledních pár trvalo o pěknou chvilku déle: 6 a půl, 7 a 7 a půl minuty. Nejprve pojme podezření, že za to může nějaký technický defekt, neboť tyto tři časy naznačují, že rychlost byla nižší než 150 kilometrů za hodinu. Znovu auto prohlédne a zjistí, že je v perfektním stavu. Jelikož mu nejde na rozum, že jde o tak dlouhé časy, požádá Petra o vysvětlení. A Petr Pavlovi prostě vysvětlí, že trať vede z východu na západ, a proto mu pozdě odpoledne slunce svítilo do očí. Při posledních třech jízdách se to nedalo vydržet, a proto jel od startovní čáry k cíli šikmo. A nakreslí mu následující obrázek, zachycující jeho dráhu při posledních třech jízdách. Vysvětlení tří delších časů je teď nasnadě. Šikmá dráha od startu k cílové čáře je delší než přímá, a proto při stejné rychlosti 150 kilometrů v hodině zabere více času. Jinými slovy, při jízdě našikmo se část rychlosti spotřebuje na pohyb z jihu na sever a zůstane nám trochu menší



Kvůli sluníčku, které mu svítilo v pozdním odpoledni do očí, jel Petr při třech posledních jízdách pod stále větším úhlem.

rychlost pro jízdu z východu na západ. Proto je třeba k projetí trasy trochu delšího času.

Jak jsme řekli, Petrovo vysvětlení je přijatelné; je však na místě přeformulovat je kvůli koncepčnímu skoku, na který se chystáme. Severo-jihní a východo-západní směry jsou dva nezávislé rozměry, ve kterých se auto může pohybovat. (Může se také pohybovat svisle, třeba při zájezdu do hor, ale tuhle schopnost zde nebudeme potřebovat.) Petrovo vysvětlení dokresluje, že ač jelo auto při každé jízdě rychlostí 150 kilometrů za hodinu, v posledních několika případech tuto rychlost sdílely pohyby do dvou směrů, a proto jelo auto zdánlivě pomaleji než rychlostí 150 kilometrů za hodinu ve východo-západním směru. Při předchozích jízdách byla celá rychlost 150 kilometrů v hodině věnována přesunu z východu na západ; při posledních jízdách byla část rychlosti spotřebována pro pohyb z jihu na sever.

Einstein zjistil, že přesně tato myšlenka – sdílení pohybu mezi různými rozměry – stojí v pozadí pozoruhodné fyziky speciální relativity, pokud si uvědomíme, že nejen prostorové rozměry sdílejí pohyb objektu, ale stejně tak ho může sdílet i rozměr *časový*. Fakticky jde ve většině případů o pohyb převážně časem, nikoli prostorem. Podívejme se, co to znamená.

Pohyb prostorem je něco, s čím se seznamujeme už jako děti. Ačkoli tímto způsobem většinou neuvažujeme, zjišťujeme, že naši přátelé, majetek a další věci se také *pohybují časem*. Když se díváme na hodiny nebo náramkové hodinky, dokonce i když jen jalově sledujeme z křesla televizi, údaj na hodinkách se neustále mění, nepřetržitě „cestuje dopředu v čase“. My a vše kolem nás stárne, nevyhnutelně plyne od jednoho okamžiku času k jinému. Ovšem matematik Hermann Minkowski, a nakonec i Einstein sám, obhajoval přemýšlení o čase jako o dalším – čtvrtém – rozměru vesmíru způsobem v jistém smyslu podobným jako o třech prostorových rozměrech, do nichž jsme uvrženi. Přestože to zní abstraktně, pojem časové dimenze je ve skutečnosti konkrétní. Když se chceme s někým setkat, sdělíme mu, kde „v prostoru“ ho očekáváme – například v 9. patře budovy na rohu 53. ulice a 7. avenue v New Yorku. Máme zde tři kousky informace (9. patro, 53. ulice, 7. avenue), odrážející konkrétní pozici ve třech prostorových dimenzích vesmíru. Stejně důležité je ale určit, *kdy* našeho hosta očekáváme – například v 15 hodin. Tato část informace říká, „kde v čase“ se naše setkání uskuteční. Události jsou tedy určeny čtyřmi díly informace: třemi o prostoru a jedním o čase. Takové údaje určují pozici události v prostoru i v čase, krátce v *prostoročase* neboli v *časoprostoru*. V tomto smyslu je čas dalším rozměrem.

Jestliže podle tohoto pohledu jsou čas a prostor jen různými příklady dimenzí, můžeme na pohyb objektu časoprostorem pohlížet podobně jako na pohyb prostorem? Můžeme.

Názorné vodítko, jak to udělat, plyne z jedné důležité informace, se kterou jsme se už setkali. Jestliže se objekt vůči nám pohybuje prostorem, jeho

hodiny ve srovnání s našimi zpomalí. To znamená, že rychlost *jeho pohybu časem poklesne*. Přichází klíčové místo. Einstein prohlásil, že všechny objekty se časoprostorem pohybují *vždycky* stejnou a pevnou rychlostí – rychlostí světla. To je podivná představa; jsme zvyklí, že se předměty pohybují značně nižšími rychlostmi, než je rychlost světla. Zdůrazňovali jsme to jako příčinu zanedbatelnosti relativistických jevů v každodenním životě. Teď ale mluvíme o kombinované rychlosti objektu *všemi čtyřmi* rozměry – třemi prostorovými a jedním časovým – a právě tato rychlost je v zobecněném smyslu rovna rychlosti světla. Abychom to lépe pochopili a odhalili důležitost tohoto výroku, všimněme si, že právě jako rychlost nepraktického jednorychlostního vozidla, zmiňovaného výše, i tato rychlost může být sdílena různými rozměry – tedy různými prostorovými a časovými rozměry. Je-li (vůči nám) předmět v klidu, nepohybuje se prostorem, a tedy v analogii s úvodními jízdami vozidla je veškerá rychlost spotřebována na cestu jedním rozměrem, v tomto případě časovým. Navíc se všechny objekty v klidu vůči nám, a tedy i vůči sobě navzájem pohybují časem – stárnou – přesně stejným tempem či rychlostí. Pokud se však objekt pohybuje prostorem, znamená to, že za to musí „utrátit“ část původního pohybu časem. Stejně jako u vozidla jedoucího šikmo po dráze v poušti má toto sdílení pohybu za následek, že se objekt bude pohybovat časem pomaleji než jeho nehybné protějšky, protože část pohybu teď padla na pohyb prostorem. To znamená, že jeho hodiny budou tikat pomaleji, pokud se bude pohybovat prostorem. Přesně tohle jsme zjistili už dříve. Vidíme teď, že čas se zpomaluje, pokud se vůči nám objekt pohybuje, protože ze svého pohybu časem vynakládá část na pohyb prostorem. Rychlost objektu je tedy pouze mírou toho, kolik pohybu se takto vynakládá.⁶

Jestliže takto uvažujeme, dojdeme k závěru, že existuje mez pro rychlost pohybu objektu prostorem; maximální rychlost pohybu prostorem nastává, pokud se *všechn* pohyb objektu časem vynakládá na pohyb prostorem. To se děje, pokud je celý pohyb časem světelnou rychlostí přeměněn na pohyb prostorem světelnou rychlostí. Protože jsme využili všechny pohyb časem, je to *nejvyšší* rychlost prostorem, jaké může objekt – jakýkoli objekt – vůbec docílit. Rychlost světla je analogií situace, kdy Petr při testovací jízdě jel přímo ze severu na jih. Stejně jako vozidlu nezbude žádná rychlost k přesunu z východu na západ, něčemu, co cestuje světelnou rychlostí, nezbude z rychlosti nic pro posun časem. Proto světlo nestárne; foton, který se vynořil z velkého třesku, je dnes stejně „mladý“, jako byl tehdy. Při světelné rychlosti není žádné plynutí času.

A co vzorec $E = mc^2$?

Třebaže Einstein nebyl zastáncem názvu „relativita“ pro svou teorii (a navrhoval místo toho teorii „invariance“ či „neměnnosti“ například podle kon-