

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 neúprosně 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 otrásat, 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, jediné 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 uspokojující 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 vychýlovat 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.

Jestě jednou se příběh v nejhlubších 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 šhubavým 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

Starí Řekové vytušili, že hmota vesmíru je tvořena z drobných „nedělitelných“ částic, 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 předvídatost. 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, *neutrino*, předpovězené už začátkem třicátých let Wolfgangem Paulim. Ukázalo se, že *neutrino* 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 olovenou zdí, aniž by to sebeméně ovlivnilo jeho pohyb nebo zed' 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 Zemí 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 nepřilíš 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 antimoty.

Fyzici varovali 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 neutrina. 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 letném 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 vnucuje 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 rozestý? 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, třese se 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. Gravitate 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 kotelný 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.)

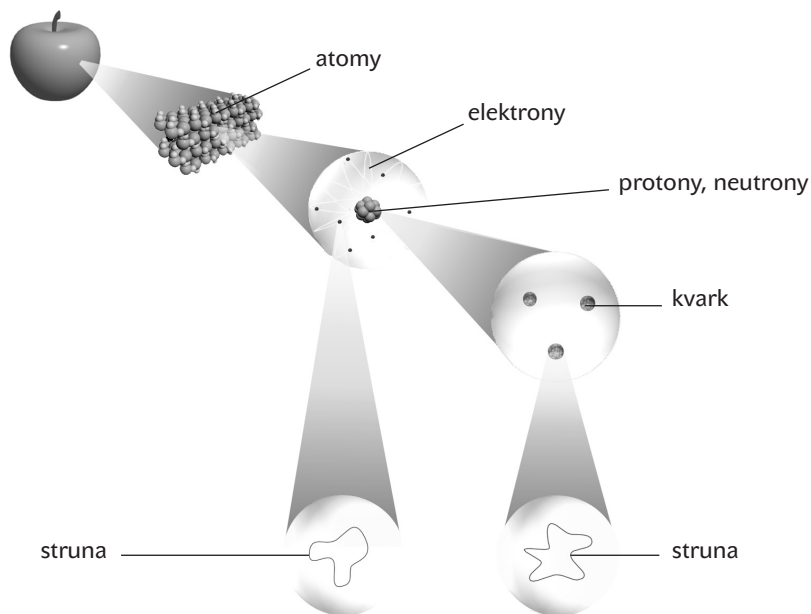
jako oslnivě plápolající plamen spálí topivo rychleji než pomalu hořící svíčka, způsobil by vzrůst rychlosti jaderných reakcí to, že by hvězdy jako Slunce shořely mnohem rychleji, což by mělo ničivé účinky na život, jaký známe. Na druhé straně by zeslabená gravitace hmotě vůbec neumožnila se shlukovat 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 *smyčku*. 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 smyčkami 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 roztíná 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 nejmikroskopičtější úrovni skládá z kombinací vibrujících pramínek – 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 projevy stále téže 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 řeči 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 samoúčelného 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 mikrosopičtějším 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 štavnatou 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 neznamenal, 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 neodzvnil 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 nejjednoduššími 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 nekočně kroutit, vibrovat a rytmicky vybuchovat 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 skrývající 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 Bekensteino-ovou-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 Amatem.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.