

Úvodem

V roce 2005 fyzici na celém světě oslavovali stoleté výročí revolučních objevů Alberta Einsteina z roku 1905 – speciální teorie relativity a kvantové povahy světla. Tyto objevy rychle vedly k dramaticky novým a účinným fyzikálním teoriím. Během 20. století nám tyto objevy pomohly porozumět základní povaze hmoty a fyzikálních sil a vedly k nepřetržitému pokroku. Roku 1973 jsme už měli mimořádně úspěšnou teorii elementárních částic a jejich interakcí, teorii, která brzy dostala jméno „standardní model“.

Po roce 1973 se život částicových fyziků velice ztížil, protože se ukázalo, že oblasti jejich výzkumu hrozí stát se obětí vlastních úspěchů. Standardní model ponechával stále otevřenou řadu otázek z fundamentální fyziky, ale nová generace experimentů přinášela výsledky, které přesně souhlasily s modelem a nezavdávaly příčinu hledat něco lepšího. Částicová fyzika vstoupila do období nepodobného ničemu v její předchozí historii a toto období pokračuje dodnes. Za několik let budou dostupné výsledky z vysokoenergetického urychlovače částic, který byl vybudován nedaleko Ženevy. Máme jisté důvody k naději, že konečně naznačí, jak postoupit za standardní model, ale není to zdaleka jisté.

Na sklonku sedmdesátých a na začátku let osmdesátých se částicovní teoretici věnovali širokému okruhu nových myšlenek, jak standardnímu modelu lépe porozumět a jak jej rozšířit. Jedna z těchto myšlenek, zvláště radikální, zahrnovala nahrazení celého pojetí bodových elementárních částic jednorozměrnými objekty, jež dostaly název „struny“. V této „strunové teorii“ se předpokládalo, že struny jsou tak malé,

že ve všech proveditelných experimentech vypadají jako body. Aby struny po každé stránce vypadaly jako známé částice, byla potřebná komplikovanější verze strunové teorie; stala se jí „teorie superstrun“.

Hlavní motivací pro přijetí superstrunové teorie bylo, že poskytuje naději vyrovnat se s jednou z otázek, již standardní model nechal nezodpovězenou: jak si poradit s gravitační silou. Einsteinova obecná teorie relativity nabídla prostou a krásnou geometrickou teorii gravitace, ale když jsme se jí snažili kombinovat s principy kvantové teorie, na nichž byl založen standardní model, vyvstaly problémy technického rázu. Superstrunová teorie zpočátku nepřitáhla větší pozornost a zabývala se jí jen hrstka fyziků. To se dramaticky změnilo v létě roku 1984 od chvíle, kterou dnes supestrunoví teoretici nazývají „první superstrunovou revolucí“.

V té době upoutal pozornost Edwarda Wittena, vůdčí osobnosti teorie částic, výpočet ukazující, že jisté potenciální problémy mohou být ve velmi speciálních případech odstraněny tak, že se vzájemně vyruší. Začal intenzivně pracovat na superstrunách, myšlenku nadšeně prosazoval a zasloužil se o to, aby vzbudila širokou pozornost. Za nějaký rok ho už následovalo mnoho teoretiků a superstrunová teorie se rychle stávala dominantním polem výzkumu v dané oblasti.

Fyzika částic se po dlouhou dobu úspěšně rozvíjela poněkud ztřeštěným způsobem, zčásti jako důsledek neočekávaných experimentálních výsledků. Některé z nových myšlenek přitáhly značnou pozornost a vedly v krátké době buď k významnému pokroku, anebo – a to častěji – byly zavrženy a zájem fyzikálního společenství se obrátil jinam. Superstrunová teorie tento obvyklý běh věcí dramaticky změnila a vedla k období, které nemá žádnou srovnatelnou historickou paralelu. Od samého počátku chyběly pro superstruny experimentální doklady a zároveň různé zřejmé problémy bránily tomu, aby teorie mohla posloužit k předpovědím výsledků experimentů. Teorie si žádala postulování existence mnoha nadbytečných

nepozorovaných dimenzí prostoru a pomocí různých voleb těchto dimenzí bylo možné dostat, cokoli si kdo přál.

Je pozoruhodné, že absence jakéhokoli pokroku v dosažení prediktivní verze teorie, která by mohla být testována experimenty, nevedla teoretiky k opuštění ideje superstrun. Namísto toho došlo k něčemu, co bychom mohli přirovnat k dosažení kritické hmotnosti v různých fyzikálních procesech. Vyrostlo celé nové pole výzkumu, podstatně odtržené od zbytku fyziky. Velká složitost a nedostatečné pochopení podstaty teorie superstrun skýtaly mnohá témata pro práci teoretiků, když byla zároveň přehlížena každá možnost ukázat, že sama myšlenka je špatná. Celá řada populárních vědeckých článků, knih, dokonce i televizních programů doporučovala superstruny veřejnosti. Od roku 2004 je o nich k dispozici i vysokoškolská učebnice.

Zatímco nezdár superstrunové teorie v roli sjednocené teorie elementárních částic bylo stále těžší ignorovat, byl do přelomu století učiněn rozumný pokrok směrem k lepšímu pochopení některých důsledků ideje superstrun. Tento druh vnitřního pokroku se dramaticky zpomalil a v posledních letech nastal ve snahách spojit superstruny s realitou poněkud bizarní obrat. Mnozí strunoví teoretici nabyli přesvědčení, že superstrunová teorie musí ze své podstaty dovolit astronomicky mnoho fyzikálních možností, tolik, že je nesnadné vidět, jak by vůbec mohla být testována. Za normálních okolností by podobné závěry vedly fyziky k zavržení teorie, ale někteří teoretici v tom naopak spatřují přednost. V existenci „krajiny“ možností vidí ospravedlnění k užívání něčeho, čemu říkají „antropický princip“. Snad opravdu existuje „multiverzum“ různých možných vesmírů a v tom, v němž žijeme, panují zvláštní zákony fyziky, které pozorujeme právě proto, že dávají jednu z mála možností příznivou životu. Takovýto způsob uvažování o fyzice patrně nevede k nějakým vyvratitelným předpovědím, a proto jej fyzici tradičně považovali za nevědecký.

Ochota některých fyziků opustit to, v čem většina vědců spatřuje podstatu vědecké metody, vyústila v trpký spor, který obec superstrunových teoretiků rozdělil. Jedni si zachovali naději, že lepší pochopení teorie problému s krajinou odstraní. Jiní argumentovali, že fyzici nemají jinou volbu než opustit dlouho sdílené sny o nalezení prediktivní teorie, a dál krajinu probádávali, v naději, že narazí na něco, co umožní ideu experimentálně testovat. Oba tábory se shodují jen v jednom – v tvrdošijném odmítání lekce, kterou by nám za takovýchto okolností mohla nabídnout konvenční věda: jestliže teorie není schopna nic předpovědět, je prostě špatná a měli bychom se poohlédnout po něčem jiném.

Fyzik Wolfgang Pauli, známý svou často více než nezdvořilou kritikou práce některých svých kolegů, vyjadřoval svůj nesouhlas někdy slovy „špatně“ (falsch) či „úplně špatně“ (ganz falsch). Na sklonku života, když měl posoudit článek jistého mladého fyzika, smutně prohodil: „To není dokonce ani špatně“ (Das is nicht einmal falsch).¹ Výraz „dokonce ani ne špatně“, mezi fyziky oblíbený, v sobě nese dva možné výklady, přičemž Pauli měl patrně na mysli oba. Teorie může být „dokonce ani ne špatná“, neboť je tak neúplná a špatně definovaná, že nemůže být užita k jednoznačným předpovědím, jejichž nepotvrzení (falzifikace) by ukázalo, že je špatná. A v takovém stavu se nachází superstrunová teorie od svých počátků.

Výraz „dokonce ani ne špatně“ nemusí nutně znamenat něco špatného. Většina nových teoretických myšlenek začíná v tomto stavu, a žádá si pěkný kousek práce, než jsou důsledky teorie dostatečně pochopeny a badatelé mohou říct, zda myšlenka je dobrá, nebo špatná. Ale výraz „dokonce ani ne špatně“ v sobě skrývá i další význam: znamená něco ještě horšího než špatnou myšlenku. V tomto významu se fráze často užívá jako obecně použitelné vyjádření odporu. V případě superstrunové teorie je něčím takovým rozhodnutí některých fyziků raději opustit základní vědecké principy než připustit, že teorie je špatná: odmítnout uznat, že něco je špatné, je horší než špatné.

Jedním z témat této knihy je uvedená kontroverzní situace teorie strun. Kniha však vypráví i mnohem pozitivnější příběh. Ačkoli posledních dvacet let bylo pro fyziku částic o vysokých energiích těžkou zkouškou, byla to zároveň velmi příznivá doba pro interakci matematiky a fyziky. Matematika užívaná ve standardním modelu je neuvěřitelně bohatá a to vedlo k mnoha novým plodným otázkám a myšlenkám, jež měly obrovský vliv na matematiku. Zatímco strunová teorie se možná ukáže být neštěstím fyziky, vedla v mnoha ohledech k zázračné nové matematice. Je to spletitý příběh, zahrnující mnohé pokročilé oblasti matematiky a fyziky, a není tudíž snadné jej přiblížit široké veřejnosti. Ale právě tyto nové a nesnadné ideje se mohou nakonec ukázat jako důležitý pokrok posledních třiceti let, a to mnohem spíše než superstruny, extradimenze a zmnožené vesmíry, které přitáhly tak mnoho veřejné pozornosti.

V dějinách fyziky by se našlo jen málo příkladů, kdy úspěšný teoretický pokrok nastal díky sledování matematické krásy a bezesporosti, a nikoli díky experimentálním datům. Jedním z nejslavnějších příkladů je Einsteinova obecná relativita, teorie gravitace založená na rafinovaných matematických myšlenkách o geometrii. Je snadnější dosáhnout pokroku, když nám experiment napovídá, kterým směrem se máme dát, pokud však takové nápovědi nejsou, znamená to prostě, že se musíme dát nesnadnější cestou. V posledních letech teoretická fyzika velmi přispěla k matematickému výzkumu; snad jí to v budoucnosti matematika oplátí.

Něco o knize

Většina příběhu, který vyprávím, není kontroverzní a většina expertů bude s mým podáním víceméně souhlasit. Na druhé straně by si čtenář měl být vědom, že závěrečné části této knihy poněkud kontroverzní jsou a že v nich zastávám sta-

novisko, které většina v žádném případě nesdílí. Čtenáři at sami posoudí, kolik váhy dát mým argumentům. Proto jsem zahrnul i jistý neobvyklý odborný materiál spolu s větším rozsahem detailů o vlastních kořenech a zkušenostech.

V těchto odbornějších kapitolách jsem neužíval rovnic a snažil jsem se vyhnout, jak jen to bylo možné, i technickému slovníku. A kde to možné nebylo, pokusil jsem se smysl slov aspoň do jisté míry vysvětlit. Taková rozhodnutí vedla k určitému nedostatku přesnosti, který může expertům vadit. Ačkoli doufám, že většina nespécialistů přece jen převážnou část kapitol pochopí, větší počet nesnadných a abstraktních pojmů v knize zahrnutých bude patrně pro ně problémem.

Takové kapitoly začínají oddílem sumarizujícím v obecných výrazech, co je podstatné a jak to zapadá do rámce knihy. Profesionální fyzici a matematici jsou na to, že někdy je beznadějně snažit se sledovat odbornou diskusi a nezbývá než přeskočit do míst, kde se výklad opět stává méně náročným, docela zvyklí. Všichni čtenáři se asi budou muset tam či onde k takové taktice uchýlit. Pro ty, kdo si přejí plně porozumět něčemu z náročnějších kapitol, následuje na konci knihy komentovaný soupis textů navržených k dalšímu čtení. Aby čtenář opravdu pochopil většinu těchto témat, nemůže mu stačit přečtení několika stránek, vyžaduje to od něj poněkud delší cestu. Doufám, že alespoň popíšu krajinu, již se cesta ubírá, a ukážu čtenářům její počátek. Sami pak mohou rozhodnout, zda se po ní chtějí vydat.

Většina této knihy je věnována historii, a lze-li tuto historii vůbec přesně podat, vyžádalo by si to ovšem jinou, mnohem objemnější knihu. Zde historii víceméně jen zběžně načrtávám a ignoruji jemné detaily, kdo, co a kdy vskutku objevil. A často jen krátce připomínám fyziky a matematiky, jejichž jména se ze zvyku k různým objevům přiřazují. Rozhodně by se to nemělo chápat tak, že jde vždy nutně o skutečné objevitele. Když mi na Harvardu přednášel částicovou fyziku španělský fyzik Alvaro de Rujula, téměř vždy po uvedení pojmu

spojeného s nějakým jménem připojil něco jako: „To je takzvaný Weinbergův úhel, který ovšem neobjevil Weinberg, ale Glashow.“ Když však jednou uvedl se jménem spojený pojem, na chvíli se odmlčel, jako by se hluboce zamyslel. Nakonec podotkl, že i když je to divné, má dojem, že objev opravdu učinila osoba, podle níž se jmenuje.

Tato kniha se zabývá historií i současným stavem částicové fyziky z poněkud neobvyklého hlediska, a proto začnu s trochou osobní historie. Mé nejstarší vzpomínky spojené s tematikou této knihy sahají do počátku sedmdesátých let, k hodinám, kdy jsem hlтал každou knihu o astronomii, jež byla dostupná v místní veřejné knihovně. Tak jsem se dostal až k astrofyzice, zejména k té její části, která studuje stavbu hvězd sestavováním a poté řešením rovnic pro teplotu, tlak a složení nitra hvězdy. Fascinovala mě naděje, že tak lze detailně a přesně pochopit, co se děje v nepředstavitelném nitru hvězd, ale zároveň jsem byl zmaten. Rovnice v mých knihách byly vyjádřeny matematickým jazykem, pro mě těžko pochopitelným, a vyplývaly z fyzikálních zákonů, o nichž jsem nevěděl nic. Začal jsem studovat potřebnou matematiku a fyziku, abych pochopil smysl rovnic.

Když jsem získal jisté základní představy o matematické analýze a o elementární fyzice, dospěl jsem k jednomu z nejvýraznějších poznatků: že matematika a fyzika jsou velmi složitě propleteny. Mechanika, část elementární fyziky zabývající se pohyby částic a silami, které je vyvolávají, je založena na Newtonových zákonech, jež pro své vyjádření vyžadují diferenciální a integrální počet. Isaac Newton objevil toto vyšší patro matematiky současně s mechanikou a tyto dvě věci jsou tak nerozlučně propleteny, že jedno nelze doopravdy pochopit bez druhého. Užijeme-li řeči matematické analýzy, jsou Newtonovy zákony mimořádně prostými a jasnými výroky o tom, jak funguje přinejmenším jistá část světa.

Jak jsem z knihovny vybíral stále víc a více fyzikálních knih, začal jsem se dozvídat i o jiných oblastech fyziky, než je me-

chanika, a brzy jsem poznal a zamiloval si to, co mě fascinuje do dnešních dnů: kvantovou mechaniku. Rovnice Newtonovy klasické mechaniky se vztahují k veličinám, které lze snadno zviditelnit, například k polohám a rychlostem částic. Naproti tomu základní rovnice kvantové mechaniky, Schrödingerova rovnice, zachází s matematickou entitou, která je zcela mimo říši běžné zkušenosti – s vlnovou funkcí. Ačkoli se zdá, že vlnová funkce a Schrödingerova rovnice nemají žádný vztah k něčemu, co by se dalo zviditelnit, dovolují fyzikům pochopit a přesně předvídat neuvěřitelné množství fyzikálních jevů, které nastávají na vzdálenostech o rozměru jednotlivého atomu.

Mezi knihy, které na mě udělaly velký dojem, patřily Heisenbergovy paměti *Přes hranice*², v nichž autor vypráví o svých zážitcích z dvacátých let, raných časů kvantové mechaniky. Líčí dlouhé debaty s přáteli o povaze fyzikální reality, jak je vedli při výstupech na okolní kopce. Jejich základní myšlenky brzy dovedly Wernera Heisenberga, Erwina Schrödingera a další fyziky k explozi nových idejí o fyzice, což roku 1925 vyústilo ve zrod kvantové mechaniky. Tento obraz Heisenberga a jeho mladých přátel stoupajících na vrcholky ve snaze najít silnou inspiraci se později, když jsem se dověděl víc o dění v Německu mezi válkami, poněkud zkalil. Kvantová mechanika na mě zapůsobila zčásti svou zvláštní povahou jistého druhu ezoterické praxe. Dávala nadějí, že dlouhým studiem a hlubokým uvažováním lze dospět k pochopení skryté podstaty vesmíru. Na rozdíl od jiných v té době oblíbených náboženských a duchovních snah se jevila jako mnohem solidnější cesta k osvícení a já jsem k ní měl opravdu jistý talent.

Když jsem roku 1975 začal studovat na Harvardově univerzitě, brzy jsem zpozoroval, že fyzikální ústav je ve stavu velkého vzrušení, v nejednom směru podobném tomu, jež panovalo ve fyzice krátce po zrození kvantové mechaniky o padesát let dříve. Nedávno byl formulován standardní model a začaly se pro něj hromadit experimentální důkazy. Pří-

slušnou teorií byla kvantová teorie pole, rafinovanější verze kvantové mechaniky, kterou jsem právě začal vážně studovat. Během studia mě vedl Sheldon Glashow a o dvě dveře dál měl pracovnu Steven Weinberg, s nímž se Glashow později podělil o Nobelovu cenu za nezávisle provedené práce o standardním modelu. Jedním z mladých postdoků byl David Politzer, spoluobjevitel další podstatné části teorie. Brzy ho vystřídal jiný postdok, Edward Witten z Princetonu. Tomu bylo souzeno stát se na daném poli příštím vůdcem. Děly se velké věci a od tohoto působivého seskupení talentů bylo možné čekat ještě víc.

Během studia jsem prožil tvořivé léto prací na experimentu z oblasti částicové fyziky na Stanfordském lineárním urychlovači (Stanford Linear Acceleration Center – SLAC) a po dlouhou dobu jsem se snažil pochopit, oč v kvantové teorii pole vůbec jde. Studium jsem dokončil roku 1979 s mlhavou představou o předmětu a jistých základních pojmech standardního modelu a šel jsem přímo na doktorské studium v Princetonu. Na fyzikálním ústavu tam pracoval David Gross, který se svým studentem Frankem Wilczekem sehrál klíčovou roli v rozpracování standardního modelu. Ještě tam nebyl Witten, který se pak vrátil do Princetonu jako „držení profesor“* přímo z postdoktorského pobytu, když přeskočil běžný postup. Pro mě to byla doba, kdy jsem si vážně osvojoval kvantovou teorii pole a začal jsem se snažit o nějakou původní práci. V celé této oblasti začínalo období rozčarování. Kolovaly různé myšlenky, jak jít za standardní model, ale nezdálo se, že by některá úspěšně fungovala.

Princeton jsem opustil roku 1984 a strávil pak tři roky postdoktorským výzkumem v Ústavu teoretické fyziky na Newyorské státní univerzitě (SUNY) ve Stony Brooku. Můj příchod zapadl do období, kterému se dostalo označení „první super-

* *Tenured professor* se v USA se těší jisté ochraně a nemůže být například propuštěn bez udání důvodů (pozn. překl.).

strunová revoluce“. Tvoří ji řada událostí – vyličím je později –, jež znamenaly na poli částicové fyziky velkou změnu. Na konci mého tříletého pobytu ve Stony Brooku jsem dospěl k názoru, že kdo se zajímá o matematiku a o kvantovou teorii pole, nemá na fyzikálním pracovišti žádnou bezprostřední perspektivu, pokud nezačne pracovat na nové, superstrunové teorii. Tento můj pocit posílilo neúspěšné hledání místa pro druhý postdoktorský pobyt.

Protože mé výzkumné zájmy zahrnovaly oblasti kvantové teorie pole co nejbližší matematice a nechtěl jsem se pouštět do teorie superstrun, připadalo mi jako dobrý nápad hledat si štěstí mezi matematiky. Přesunul jsem se do Cambridge, kde mi harvardský fyzikální ústav dovolil sedět u stolu jako neplacený host a matematický ústav Tuftsovy univerzity mě zaměstnal jako asistenta vyučujícího analýzu. Odtud jsem přešel na jednoletý postdoktorský pobyt na Výzkumném ústavu matematických věd v Berkeley, načež následovalo čtyřleté působení na matematickém ústavu Columbijské univerzity na místě vypisovaném pro mladého vědce.

Tento přechod od matematiky k fyzice se ukázal jako moudrý a já jsem pak setrval na tomto matematickém ústavu více než šestnáct let. Dnes mám na fakultě sice nedržené, ale trvalé postavení „lektora“ a jednou z mých hlavních povinností je zajišťovat na ústavu trvale dobré fungování počítačového systému. Učím také studenty a doktorandy a pokračuji ve výzkumu v oblasti matematiky a kvantové teorie pole.

Vývoj mé akademické kariéry byl poněkud neobvyklý a jsem si dobře vědom, že mi při něm mimořádně přálo štěstí. Začalo to už rodiči, kteří si mohli dovolit poslat mě na Harvard. A pokračovalo tím, že jsem se ve správný čas ocitl na správném místě, kde byla neběžná příležitost pracovat ve skvělém prostředí talentovaných a vstřícných kolegů.

Tato zkušenost přesunu od fyziky k matematice trochu připomíná můj dětský přesun ze Spojených států do Francie. Matematika a fyzika mají každá své vlastní území, na němž

se mluví odlišnými jazyky. Diskuse mezi nimi o téže věci často končí u výrazů, které jsou pro druhou stranu nesrozumitelné. Rozdíly mezi oběma oblastmi jsou však hlubší a nespočívají prostě jen v jazyku. Zahrnují velmi rozdílnou historii, kulturu, tradice a způsoby myšlení. Stejně jako v dětství shledávám, že po takovém přesunu se člověk má co učit, a nakonec zakotví v zajímavém bikulturním stadiu. Doufám, že se mi podaří vysvětlit něco z toho, co jsem se naučil o složitém a trvale se vyvíjejícím vztahu mezi předměty fyziky a matematiky a mezi odpovídajícími akademickými kulturami.

Když jsem usedl k sepsání některých těchto námětů, začal jsem snažit se o podání krátké historie kvantové mechaniky a teorie částic. Má perspektiva byla jiná, než je běžné ve většině pokusů tohoto druhu, které obvykle ignorují roli matematiky v daném příběhu. A při hlubším nahlédnutí do některých standardních knih s touto tematikou jsem si povšiml zajímavé věci. Jednou z největších postav v malém okruhu lidí, kteří objevili a rozvinuli kvantovou mechaniku, byl matematik Hermann Weyl. Za velmi krátké období let 1925 a 1926, kdy fyzici kvantovou mechaniku vypracovali, s nimi stále komunikoval, ale přijal také explozi inspirace k čistě matematické práci, která byla vrcholem jeho vědecké dráhy. Oblast matematiky, již se tenkrát zabýval, dnes nese název teorie reprezentace grup. Byl si dobře vědom, že je to správný nástroj k pochopení části nové kvantové mechaniky. Fyzici Weylovu matematiku a její souvislost s kvantovou mechanikou téměř všeobecně nechápali, a to ani poté, co pohotově napsal knihu obsahující střídající se kapitoly o kvantové mechanice a o teorii reprezentace.³ Jeho kniha byla po řadu let pokládána za klasickou, třebaže většina fyziků se pravděpodobně prokousala jen polovinou kapitol.

Teorie reprezentace grup je matematickým vyjádřením pojmu „symetrie“ a pochopení důležitosti tohoto pojmu v padesátých a šedesátých letech mezi částicovými teoretiky pozvolna rostlo. V sedmdesátých letech se kurzy teorie reprezentace

grup zahrnující části Weylova díla staly standardní částí výuky teoretického fyzika. Od té doby teorie částic a matematika úzce a velmi všestranným způsobem interagovaly. Jedním z hlavních cílů této knihy je vysvětlit zákruty a obraty tohoto příběhu.

Pozitivním závěrem knihy bude, že z historického hlediska byl jedním z hlavních zdrojů pokroku v částicové fyzice objev nových grup symetrie přírody společně s jejich novými reprezentacemi. Zdroj nezdaru programu superstrunové teorie může být shledán v tom, že postrádá jakýkoli nový princip symetrie. Bez neočekávaných teoretických dat jen stěží přijdou nové teoretické úspěchy, neobráti-li teoretici pozornost od svého neúspěšného programu k nesnadnému úkolu lépe pochopit symetrie přírodního světa.