## Kvantová teorie pole

**Potřeba nové teorie**:
**Obecná relativita versus kvantová mechanika**

Naše chápání fyzikálního vesmíru se za poslední století významně prohloubilo. Teoretické nástroje kvantové mechaniky a obecné relativity nám dovolují porozumět jevům a vytvářet ověřitelné předpovědi o fyzikálních událostech od atomární a subatomární říše až k úkazům na úrovni galaxií, kup galaxií a dále až ke struktuře vesmíru jako celku. To je monumentální úspěch. Citlivého člověka skutečně nadchne, že bytosti svázané s průměrnou planetou obíhající kolem tuctové hvězdy někde mezi středem a okrajem celkem prachobyčejné galaxie byly schopny,díky svým experimentům a myšlení, zjistit a pochopit některé z nejtajuplnějších vlastností fyzikálního vesmíru. Nicméně fyzici ze své podstaty nebudou spokojeni, dokud nepocítí, že bylo dosaženo nejhlubší a nejfundamentálnější možné úrovně porozumění kosmu. O takovém počinu se Stephen Hawking zmiňuje jako o prvním kroku k poznání "mysli Boží".^1

Fyzici také nasbírali hojnou úrodu důkazů, že kvantová mechanika a obecná relativita neposkytují takovou nejhlubší úroveň porozumění. Díky tomu, že jejich domény platnosti jsou velmi odlišné, většina situací vyžaduje použít kvantovou mechaniku, nebo obecnou relativitu, ale téměř nikdy oboje najednou. V extrémních podmínkách, kde jsou objekty velmi masivní a velmi malé - v končinách blízko středu černé díry nebo v celém vesmíru krátce po velkém třesku, abychom uvedli dva příklady - však je třeba kvantové mechaniky i obecné relativity ke správnému pochopení jevů. Míchání těchto dvou teorií ale vede k podobné katastrofějako míchání střelného prachu s ohněm. Na dobře formulované otázky odvodíme ze směsi rovnic kvantové mechaniky a obecné relativity nesmyslné odpovědi. Nesmyslnost se většinou projeví tak, že pravděpodobnost zvoleného procesu nevyjde 20-procentní, 73-procentní, ani 91-procentní, ale nekonečná. Co může pravděpodobnost větší než jedna znamenat - ještě k tomu nekonečná? Jsme přinuceni usoudit, že cosi je vážně v nepořádku. Bližším pohledem na základní vlastnosti obecné relativity a kvantové mechaniky můžeme určit totožnost onoho "cosi".

 **Srdce kvantové mechaniky**

Když Heisenberg objevil princip neučitosti, fyzika se otočila vpravo v bok a na původní cestu se již nikdy nevrátila. Pravděpodobnosti, vlnové funkce, interference a kvanta - to všechno žádá radikálně nové pohledy na realitu. Nicméně fyzik "klasický" na život a na smrt by se stále mohl držet stébla naděje, že když vše řekneme a propracujeme, odchylky od klasické fyziky se nakonec poskládají do rámce nepříliš vzdáleného od starých způsobů myšlení. Princip neurčitosti ale cudně a definitivně podrazí nohy každému, kdo by chtěl lpět na minulosti.

Princip neurčitosti nám říká, že vesmír je stále bouřlivější místo, pokud ho zkoumáme na stále kratších vzdálenostech a časových úsecích. S jistou formou důkazu jsme se již setkali v předchozí kapitole, když jsme se snažili určit polohu elektronů: mohli jsme jejich pozici určovat stále přesněji zvyšováním frekvence fotonů, kterými jsme si na elektrony svítili, ovšem za cenu toho, že jsmesvým pozorováním stále více narušovali pohyb elektronů. Vysokofrekvenční fotony mají dost energie, díky níž do elektronu prudce "kopnou" a značně tím změníjeho rychlost. V místnosti narvané zdivočelými dětmi můžete znát přesně pozici každého z nich, aniž byste měli kontrolu nad směrem pohybu i velikostí jeho rychlosti - a podobná nemohoucnost určit polohu i rychlost částice znamená, žemikroskopická říše je svou podstatou nezkrotná.

Ačkoliv z tohoto příkladu lze vyčíst základní vztah mezi neurčitostí a chaosem, odhaluje jen část pravdy. Mohl by vás třeba vést k názoru, že neurčitost se objeví jen tehdy, pokud my - neohrabaní pozorovatelé přírody - zakopneme o jeviště. To ale není pravda. Příklad elektronu, který divoce reaguje na naši snahu uvěznit ho do stále menší krabičky tím, že v ní rachtá stále větší rychlostí, nás snad vede blíže k pravdě. Dokonce i bez "přímých zásahů" experimentátorovým záškodnickým fotonem se rychlost elektronu od jednoho okamžiku ke druhému prudce a nepředpovídatelně mění. Ale ani tento příklad úplně neodhaluje ohromující mikroskopické rysy přírody, které Heisenbergův objev vynesl na světlo. Dokonce i za nejklidnějších podmínek, které si lze představit a jaké najdeme v prázdné oblasti prostoru, nám princip neurčitosti říká, že z mikroskopického úhlu pohledu lze spatřit obrovskou aktivitu. A tato aktivita je stále silnější na stále kratších vzdálenostech a časových měřítcích.

Klíčem k pochopení posledních vět jsou "kvantové bankovní mechanismy". V předchozí kapitole jsme řekli, že právě jako lze vypůjčením peněz překonat důležitou finanční překážku, částice jako elektron si dočasně může půjčit energii, abypřekonala doslovnou fyzikální překážku. Tak jest. Ale kvantová mechanika nás nutí s analogií učinit ještě jeden důležitý krok vpřed. Představte si někoho, kdo chodí od kamaráda ke kamarádovi a pod nátlakem si od nich neustále půjčujepeníze. Čím je kratší doba, na kterou kamarád může obnos půjčit, tím více peněz shání. Půjčuje si a vrací, půjčuje a vrací - a tak stále dokola s neochabující intenzitou si bere peníze jen proto, aby je mohl obratem splatit. Jako ceny akcií na Wall Street za divokého dne, obsah peněženky chronického "vypůjčovatele" v každém okamžiku extrémně kolísá, aby se nakonec stav jeho financí ukázal být asi tak stejný, jako když začal.

Heisenbergův princip neurčitosti tvrdí, že podobně šíleně se pohybuje tam a zpět energie a hybnost (hmotnost vynásobená rychlostí) na mikroskopických vzdálenostech vesmíru a v mikroskopických časových intervalech, a to ustavičně. Dokonce i v prázdné oblasti prostoru - například v prázdné krabici - princip neurčitosti říká, že energie a hybnost jsou neurčité: fluktuují mezi extrémy, kteréjsou stále větší, pokud je krabice stále menší a pokud je typický čas, po který prostor sledujeme, kratší a kratší. Oblast prostoru uvnitř krabice se chovájako chronický "vypůjčovatel" energie a hybnosti, nepřetržitě si od okolního vesmíru vyzvedává "půjčky", aby je obratem "splácela". Ale co se takových operací může účastnit například v tiché a prázdné oblasti prostoru? Všechno. Doslova. Energie (a hybnost) jsou nakonec oněmi základními konvertibilními měnami. E=mc^2 nám říká, že lze energii přeměnit na hmotu i naopak. Tedy pokud je fluktuace energie dostatečně velká, může například na okamžik způsobit, že se v prostoru vynoří elektron se svým antihmotným společníkem pozitronem, a to i pokud byla oblast původně prázdná! Jelikož je třeba energii rychle splatit, vytvořené částice spolu během okamžiku zanihilují, aby zanechaly jen energii zapůjčenou k jejich kreaci. Totéž platí i pro jiné masky, které si na sebe energie a hybnost mohou nasadit - mohou se objevit jiné druhy částic a obratem zase zanihilovat, elektromagnetické pole může divoce fluktuovat, stejně jako pole slabéi silné jaderné síly - kvantově mechanická neurčitost nám vesmír na mikroskopických měřítcích ukazuje jako šílenou a chaotickou arénu, hemžící se všemi typy částic. Feynman jednou zažertoval, "Vytvořeny a zanihilovány, vytvořeny a zanihilovány - jaké to mrhání časem."^2 Poněvadž se půjčky a splátky v průměru kompenzují, prázdná oblast prostoru vyhlíží klidně a mírně, pokud ji sledujeme s rozlišením horším než mikroskopickým. Princip neurčitostivšak obnažuje fakt, že makroskopické průměrování zamlžuje intenzivní mikroskopickou aktivitu.^3 Jak za krátkou dobu uvidíme, právě tohlemikroskopické šílenství je překážkou spojení obecné relativity s kvantovou mechanikou.

**Kvantová teorie pole**

V třicátých a čtyřicátých letech teoretičtí fyzici, vedeni lidmi jako Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga a Richard Feynman, abychom jich vyjmenovali alespoň pár, neúnavně bojovali s úkolem nalézt matematický formalismus, který by si s divokostí mikroskopického světa dokázal poradit. Zjistili, že Schrödingerova rovnice (zmíněná v 4. kapitole) byla ve skutečnosti jen přibližným popisem mikroskopické fyziky - aproximací, která funguje extrémně dobře, pokud člověk nesonduje příliš hluboko v mikroskopickém hemžení (ani teoreticky, ani experimentálně), která však celkem určitě selže, pokud do hloubky zavítáme.

Hlavním kusem fyziky, který Schrödinger ve své formulaci kvantové mechaniky opomíjel, byla speciální relativita. Schrödinger se ve skutečnosti nejprve pokusil speciální relativitu začlenit, ale došel ke kvantové rovnici, jejíž předpovědi protiřečily experimentálním měřením vodíkového atomu. Tohle přimělo Schrödingera přijmout dlouhou historií fyziky odzkoušený slogan "rozděl a panuj": raději než abychom se v jediném kroku snažili začlenit do rozpracované teorie všechno, co o vesmíru víme, je často mnohem prospěšnější učinit více menších kroků, které postupně zahrnují jeden objev z první linie fyziky za druhým. Schrödinger hledal a našel matematický rámec, zvládající experimentálně objevený vlnově-částicový dualismus, ale v raném stádiu chápání věcí nezakomponoval speciální relativitu.^4

Fyzici si ale brzy uvědomili, že speciální relativita pro korektní kvantově mechanický rámec hraje zásadní roli. Důvodem je, že mikroskopické šílenství nás nutí si uvědomit, že energie se může projevovat pestrou paletou způsobů - což je poznatek, který plyne z tvrzení speciální relativity E=mc^2. Zanedbáním speciální relativity Schrödinger ignoroval "ohebnost" energie, hmoty a pohybu.

Své úsilí o spojení speciální relativity s kvantovými představami fyzici nejprve zaměřili na elektromagnetickou sílu a její interakci s hmotou. Po řadě nápadů nakonec vytvořili kvantovou elektrodynamiku. Ta je příkladem relativistickékvantové teorie pole, které se začalo krátce říkat kvantová teorie pole. Kvantová je proto, že všechny aspekty jako neurčitost a pravděpodobnosti jsou do teorie zabudovány od samého počátku; je to teorie pole proto, že kvantové principy spojuje se starším klasickým pojmem silového pole - v případě kvantové elektrodynamiky jde o Maxwellovo elektromagnetické pole. Nakonec relativistická je proto, že speciální relativita je začleněna také od začátku. (Pokud byste chtěli vizuální metaforu kvantového pole, představte si nejprve klasické pole - řekněme jako oceán neviditelných siločar, které prostupují prostorem - ale takovou představu musíte vylepšit v dvou ohledech. Za prvé, kvantové pole by se ve vaší mysli mělo skládat z částic, jakými jsou v případě elektromagnetického pole fotony. Za druhé byste si měli představit, že energie ve formě pohybu a hmot částic neustále přeskakuje z jednoho kvantového pole k jinému spolu s tím,jak tato pole ustavičně vibrují časoprostorem.)

**Kvantová elektrodynamika** je prokazatelně nejpřesnější teorií přírodních jevů dosud předloženou. Její přesnost dokresluje práce Toichiro Kinoshity, částicového fyzika z Cornellovy univerzity, který přes 30 let usilovně počítal jisté detailní vlastnosti elektronu. Kinoshita svými výpočty popsal tisíce stran a k dokončení potřeboval nejvýkonnější počítače na světě. Úsilí ale nebylo marné: výpočty vedly k předpovědím, které experimentátoři ověřili s přesností větší než jedna miliardtina. Taková shoda abstraktního teoretického výpočtu s reálným světem je absolutně úžasná. Díky kvantové elektrodynamice fyzici mohli upevnitroli fotonů jako "nejmenších balíčků světla" a odkrýt jejich interakce s elektricky nabitými částicemi, jako jsou elektrony, v matematicky úplném a přesvědčivém rámci, schopném předpovídat výsledky pokusů.

Úspěch kvantové elektrodynamiky inspiroval další fyziky v 60. a 70. letech k pokusu zkonstruovat analogickým způsobem vysvětlení slabé, silné a gravitační síly. V případě slabé a silné síly se tato cesta ukázala být úžasně plodná. V analogii s kvantovou elektrodynamikou dokázali fyzici vybudovat kvantové teoriepole pro silnou a slabou sílu, nazývané kvantová chromodynamika a elektroslabá teorie. "Kvantová chromodynamika" je barvitější název, než by třeba bylo logičtější označení "kvantová silná dynamika", ale název sám (odvozený od řeckéhoslova "chroma", které znamená barvu) nemá až tak hluboký význam (označuje, žev teorii na sebe působí "barvy" kvarků, o kterých si povíme v další sekci); zdruhé strany přívlastek "elektroslabá" zachycuje důležitý milník v našem chápání sil přírody.

V práci, která jim vynesla Nobelovu cenu, ukázali Sheldon Glashow, Abdus Salama Steven Weinberg, že slabá a elektromagnetická síla se přirozeně sjednocují na úrovni popisu kvantovou teorií pole, ačkoliv se ve světě kolem nás projevují naprosto odlišně. Konec konců slabé silové pole se na všech vzdálenostech kromě subatomárních zeslabuje tak, že téměř zmizí, zatímco elektromagnetické vlny - viditelné světlo, radiové i televizní signály a rentgenové paprsky - se neoddiskutovatelně projevují i v makroskopickém měřítku. Nicméně Glashow, Salam a Weinberg v podstatě ukázali, že při dostatečně vysoké teplotě a energiích - které vládly zlomek sekundy po velkém třesku - se elektromagnetické a slabé silové pole rozpouští jedno do druhého, jejich vlastnosti se stávají nerozeznatelnými a je proto lepší je nazývat elektroslabými poli. Když teplota klesá, cožse od velkého třesku děje neustále, elektromagnetická a slabá síla se vykrystalizují do formy odlišné od jejich vysokoteplotního chování - díky procesu známému jako narušení symetrie, o kterém promluvíme později - a proto se jeví odlišné ve studeném vesmíru, který nyní obýváme.

A tedy, pokud si zapisujete úspěchy, do 70. let fyzici vyvinuli rozumný a úspěšný kvantově mechanický popis tří sil ze čtyř (silné, slabé a elektromagnetické) a ukázali, že dvě z nich (slabá a elektromagnetická) fakticky sdílejí společný původ (jímž je elektroslabá síla). Za poslední dvě desetiletí podrobili své teoretické zpracování tří negravitačních sil - toho, jak působí na sebe navzájem a na částice představené v 1. kapitole - značným experimentálním zatěžkávajícím zkouškám. Teorie se se všemi vypořádala. Jakmile experimentátoři naměříjistých 19 parametrů (hmotnosti částic z tabulky 1.1, jejichž náboje vůči všem silám zachycuje tabulka v 1. poznámce k 1. kapitole na konci knihy, sílu třínegravitačních sil z tabulky 1.2 a pár dalších konstant, které nemusíme rozebírat), a teoretici tato čísla vloží do kvantových teorií pole, popisujících částice hmoty a silnou, slabou a elektromagnetickou sílu, následné předpovědi teorie o mikrokosmu podivuhodně souhlasí s výsledky experimentů. To platí až do energií, které hmotu dokáží rozdrtit na třísky velké asi miliardtinu miliardtiny metru, kde leží hranice schopností dnešní techniky. Z tohoto důvodu nazývají fyzici teorii tří negravitačních sil a tří generací částic hmoty standardní teorií, nebo častěji standardním modelem částicové fyziky.

**Zprostředkující částice**

Podle standardního modelu, stejně jako je foton nejmenším stavebním kamenem elektromagnetického pole, tak i silná a slabá síla mají své nejmenší balíčky. Jak jsme zmínili v 1. kapitole, nejmenším balíčkům silné síly se říká gluony a balíčky slabé síly se nazývají slabé kalibrační bosony (přesněji W-bosony a Z-bosony). Standardní model nás nabádá k představě, že tyto částice nemají žádnouvnitřní strukturu - v tomto rámci jsou z každého pohledu právě tak elementární jako tři rodiny částic hmoty.

Fotony, gluony a slabé kalibrační bosony poskytují mikroskopický mechanismus pro přenášení sil, které se z nich skládají. Pokud například jedna elektricky nabitá částice odpuzuje jinou se stejným znaménkem náboje, můžete si představit, že je obklopena elektrickým polem - "mrakem", "mlhou" nebo "elektrickou vůní" - a každá částice pak cítí sílu, která pochází z odpuzování elektrických mraků obou z nich. Přesnější mikroskopický popis toho, jak se odpuzují, vypadá ale trochu jinak. Elektromagnetické pole se skládá z hejna fotonů; elektromagnetická síla mezi dvěma nabitými částicemi ve skutečnosti pochází z přestřelky mezi oběma částicemi; fotony hrají roli kulek. V hrubé analogii s tím, jak můžete svůj pohyb a pohyb své spolubruslařky ovlivnit vymrštěním řady kulečníkovýchkoulí směrem na ni, dvě elektricky nabité částice se ovlivňují výměnou nejmenších balíčků světla.

Důležitým nedostatkem bruslařského přirovnání je fakt, že výměna koulí je vždy"odpudivá" - žene bruslaře od sebe. Na rozdíl od toho dvě opačně nabité částice také interagují díky výměně fotonů, ačkoliv je výsledná elektrická síla přitažlivá. Šlo by snad říci, že foton není doručovatelem síly samotné, ale raději zprávy o tom, jak má příjemce na danou sílu reagovat. Pro částice se stejnýmznaménkem náboje nese foton zprávu "jděte od sebe", zatímco poselství pro opačně nabité částice říká "pojďte k sobě blíž". Z tohoto důvodu se foton občas nazývá zprostředkující částicí elektromagnetické síly. Podobně gluony a slabé kalibrační bosony jsou zprostředkovateli (mohli bychom též říci "poslíčky") silné a slabé síly. Silná síla, která drží kvarky zamčené uvnitř protonu a neutronu, má původ ve výměně gluonů mezi jednotlivými kvarky. Gluony, abychom tak řekli, poskytují "lepidlo" (anglicky "glue"), které drží subatomární částice přilepené k sobě. Slabá síla, která zodpovídá za jisté druhy přeměn částic při radioaktivním rozpadu, je zprostředkována slabými kalibračními bosony.

**Kalibrační symetrie**

Možná jste si již uvědomili, že tím podivínem, který v naší diskusi o kvantovéteorii nezapadl do kolektivu ostatních sil, je gravitace. Na základě úspěchu při popisu zbylých tří sil byste fyzikům mohli poradit hledat kvantovou teoriigravitačního pole, v níž by nejmenší balíček gravitační síly, graviton, hrál roli poslíčka. Na první pohled je takový návrh velmi příhodný, jelikož kvantová teorie tří negravitačních sil ukazuje, že jedna jejich vlastnost (kterou si vysvětlíme za okamžik) se mučivě podobá jistému aspektu gravitace, se kterým jsme se setkali v 3. kapitole.

Připomeňme si, že gravitační síla nám dovoluje tvrdit, že všechny pozorovatelky - nehledě na stav jejich pohybu - si jsou zcela rovny. Dokonce i ty, které bychom obvykle označili za zrychlující, mohou hlásat, že jsou v klidu, jelikož sílu, kterou cítí, mohou přisoudit gravitačnímu poli ve svém okolí. V tomto smyslu symetrie gravitaci vyžaduje: zaručuje s její pomocí stejnou úroveň pravdivosti všech možných úhlů pohledu, všech možných "vztažných soustav". Podobnostse silnou, slabou a elektromagnetickou sílou tkví v tom, že i ony jsou spojeny se symetriemi, které nás nutí odpovídající sílu zavést, ačkoliv jsou příslušné symetrie abstraktnější než symetrie spojená s gravitací.

Abychom získali hrubou představu o poměrně delikátních principech takových symetrií, uvažujme o jednom důležitém příkladě. Do tabulky v 1. poznámce k 1. kapitole na konci knihy jsme zaznamenali fakt, že kvarky mohou mít tři různé "barvy" (vznešeně nazývané červená, zelená a modrá, ačkoliv takové nálepky s barvou v obvyklém zrakovém smyslu vůbec nesouvisejí), které určují, jak kvark reaguje na silnou sílu, a to obdobným způsobem, jako elektrický náboj určuje, jak částice reaguje na elektromagnetické pole. Všechny údaje, které lidstvo nasbíralo, vedou k poznání, že existuje symetrie mezi barvami v tom smyslu, že interakce mezi dvěma kvarky stejné barvy (červený s červeným, zelený se zeleným, modrý s modrým) jsou ve všech třech případech totožné - a podobně jsou totožné interakce mezi kvarky různých barev (červený se zeleným, zelený s modrým, modrý s červeným). Ve skutečnosti data podporují ještě překvapivější závěr. Pokud bychom tři barvy - tři silné náboje, které kvark může nést - proměnili či předefinovali konkrétním způsobem (v našem vznešeném chromatickém jazyku lze hrubě říci, že červenou, zelenou a modrou bychom přeměnili třeba na žlutou, tyrkysovou a fialovou), a dokonce kdyby se detaily takové proměny měnily od místa k místu a od okamžiku k okamžiku, interakce mezi kvarky by ani teď nedoznaly žádných změn. Z tohoto důvodu, stejně jako o kouli říkáme, že má rotační symetrii, protože vypadá stejně nehledě na to, jak s ní otáčíme (rotujeme) nebo jak měníme úhel, pod nímž ji sledujeme, tak také říkáme, že vesmír vykazuje symetrii silné interakce: fyzika je zcela necitlivá na takové proměny "barev" - nábojů síly; fyzika se po těchto proměnách nezmění. Z historických důvodů též fyzici říkají, že symetrie silné interakce je příkladem kalibrační symetrie.^5

Přicházíme k nejdůležitějšímu bodu. Právě jako rovnoprávnost všech úhlů pohledu v obecné relativitě vyžaduje zavedení gravitační síly, pokrok odvíjený od prací Hermanna Weyla ve 20. letech a Chen-Ning Yanga a Roberta Millse v 50. letech ukázal, že kalibrační symetrie si vynucují existenci dalších sil. V duchu citlivé klimatizační soustavy, která udržuje teplotu, tlak a vlhkost v oblasti zcela beze změn dokonalou kompenzací všech vnějších vlivů, jisté druhy silových polí podle Yanga a Millse poskytují dokonalou kompenzaci proměn příslušných nábojů, čímž udržují interakce mezi částicemi naprosto nezměněné. V případě kalibrační symetrie spojené s proměnami barev kvarků, požadovanou silou není nicjiného než silná síla. Tedy bez silné síly by se fyzika změnila po výše načrtnuté proměně barevných nábojů. Takové poznání ukazuje, že navzdory nesmírně odlišným vlastnostem gravitace a silné síly (vzpomeňte, že gravitace je proti silné interakci muší silou a že operuje na velmi dlouhých vzdálenostech), mají obě trochu společné krve: obě jsou vynuceny požadavkem, aby měl vesmír jisté symetrie. Podobná diskuse se vztahuje i na slabou a elektromagnetickou sílu, i jejich existence je svázána s dalšími symetriemi - takzvanými elektroslabými kalibračními symetriemi. A tak jsou všechny čtyři síly přímo spojeny s principy symetrie.

Může se zdát, že tento společný rys všech čtyř sil věstí světlou budoucnost nápadu, který jsme navrhli na začátku této sekce. Konkrétně že při našem úsilí začlenit kvantovou mechaniku do obecné relativity bychom se měli shánět po kvantové teorii gravitačního pole podobné, jakou fyzici našli pro ostatní tři síly. Takové úvahy po léta inspirovaly urozenou skupinu fenomenálních fyziků, aby se na takovou stezku rázně vydali, ale terén se ukázal být plný nebezpečných nástrah, a tak jím zatím nikdo úspěšně neprošel. Podívejme se proč.

**Obecná relativita versus kvantová mechanika**

Obvyklou říší použitelnosti obecné relativity je svět dlouhých, astronomickýchvzdáleností. Na takových vzdálenostech z Einsteinovy teorie plyne, že při nepřítomnosti hmoty je prostor plochý, jak ilustroval obrázek 3.3. Při snaze spojit kvantovou mechaniku s obecnou relativitou se musíme zaměřit úplně jinam a vyšetřovat mikroskopické vlastnosti prostoru. Na obrázku 5.1 to ilustrujeme ohraničováním a zvětšováním stále menších oblastí geometrie prostoru. Ze začátku se moc věcí neděje; jak je vidět na prvních třech zvětšeních v obrázku 5.1, struktura prostoru si ponechává svoji základní formu. Úvahy plně v klasických mantinelech by nás vedly k očekávání, že takový plochý a klidný obraz prostoru vydrží do libovolně krátkých měřítek. Kvantová mechanika ale závěr radikálně mění. Všechno je podrobeno kvantovým fluktuacím, vězícím v principu neurčitosti - včetně gravitačního pole. Ačkoliv z klasického myšlení plyne, že prázdný prostor má nulové gravitační pole, kvantová mechanika ukazuje, že je v průměru sice nulové, ale jeho okamžitá hodnota se díky kvantovým fluktuacím vlní nahoru a dolů. Princip neurčitosti nám navíc říká, že velikost takových vlnek gravitačního pole roste, pokud se zaměřujeme na menší oblasti prostoru. Kvantová mechanika ukazuje, že nic a nikdo není rád, pokud je zahnán do koutku; zúžení sledovaného prostoru vede k ještě výraznějším vlnkám.

Jelikož se gravitační pole odráží v zakřivení, jeho kvantové fluktuace se projevují stále drastičtějším zkroucením okolního prostoru. Příklady takových deformací vidíme na čtvrté úrovni zvětšení v obrázku 5.1. Zkoumáním ještě kratšíchdélek, jako na páté úrovni v obrázku, náhodné kvantově mechanické fluktuace gravitačního pole odpovídají natolik drsnému pokroucení prostoru, že se už nepodobá jemně zdeformovanému geometrickému objektu, jakým byla gumová blána, užitá v našem přirovnání ve 3. kapitole. Místo toho prostor získává zpěněnou, rozbouřenou a zauzlovanou formu znázorněnou horním patrem obrázku. John Wheeler razil označení kvantová pěna, aby popsal zběsilost obnaženou ultramikroskopickýmzkoumáním prostoru (a času), kterým nacházíme neznámé končiny světa, kde obvyklá slůvka vlevo, vpravo, vpředu, vzadu, nahoře, dole (a dokonce i před a po) ztrácejí smysl. Právě na těchto velmi krátkých vzdálenostech pochopíme zásadníneslučitelnost mezi obecnou relativitou a kvantovou mechanikou. Pojem hladké geometrie prostoru, hlavní princip obecné relativity, je zničen zuřivými fluktuacemi kvantového světa na krátkých vzdálenostech. Na ultramikroskopických vzdálenostech je hlavní rys kvantové mechaniky - princip neurčitosti - v přímém konfliktu s hlavním rysem obecné relativity - hladkým geometrickým modelem (časo)prostoru.

*Obrázek 5.1 Několikanásobným zvětšením oblasti prostoru zkoumáme jeho ultramikroskopické vlastnosti. Pokusy spojit obecnou relativitu s kvantovou mechanikou narážejí na zuřivou kvantovou pěnu, vynořující se na nejvyšší úrovni zvětšení.*

*V praxi tento konflikt vztyčí hlavu velmi konkrétním způsobem. Výpočty, které spojují rovnice obecné relativity a rovnice kvantové mechaniky, typicky vedou ke stále stejné absurdní odpovědi: nekonečno. Nekonečná odpověď je způsobem, kterým nás příroda praští ukazovátkem přes zápěstí jako učitel ze staré školy, aby vyjádřila, že něco děláme špatně.^6 Rovnice obecné relativity se se šílenstvím kvantové pěny nevypořádají.*

Všimněte si ale, že pokud hledíme na kresby z obrázku 5.1 pozpátku a ustupujeme k běžnějším vzdálenostem, náhoda a prudké kudrlinky na krátkém měřítku se vyhladí - podobným způsobem, díky němuž bankovní konto našeho chronického vypůjčovatele neukazovalo žádné známky jeho nátlaku - a pojem hladké geometrie vesmíru se znovu zpřesní. Je to podobné, jako když se díváte na obrázek z jehličkové tiskárny nízkého rozlišení: z dálky se vám zdá, že tečky tvořící obraz splývají a tvoří dojem hladkého obrazu, jehož světlost se hladce a bez prasklin mění od bodu k bodu. Při pohledu zblízka si ale všimnete patrného rozdílu od vzhledu z dlouhých vzdáleností. Obraz je pouhou kolekcí jednotlivých, diskrétních bodů, každý z nichž je oddělen od ostatních. Všimněte si ale, že diskrétní povahy obrázku si začnete být vědomi jen při pohledu zblízka; z dostatečné dálky vypadá hladce. Podobně se geometrie časoprostoru zdá být hladká, pokud není zkoumána s ultramikroskopickou přesností. To je důvodem úspěchu obecné relativity na dostatečně dlouhých měřítcích vzdálenosti (a času) - měřítcích relevantních pro mnohé typické astronomické aplikace - ale stává se vnitřně rozporuplnouna krátkých vzdálenostech (a časech). Hlavní doktrína hladké a jemně zakřivené geometrie je oprávněna ve velkém rozměru, ale díky kvantovým fluktuacím selhává, je-li zatlačena do malého.

Základní principy obecné relativity a kvantové mechaniky nám dovolují spočítatpřibližnou délku, pod kterou bychom se museli smrštit, aby se zhoubný jev z obrázku 5.1 stal očividným. Malá hodnota Planckovy konstanty - zodpovědné za sílu kvantových efektů - a slabost gravitační síly společně vedou k výsledku známému jako Planckova délka, která je tak malá, že si ji téměř nelze ani představit: milióntina miliardtiny miliardtiny miliardtiny centimetru (10^-35 metru).^7 Pátá úroveň obrázku 5.1 tedy schematicky líčí ultramikroskopickou, sub-planckovskou krajinu vesmíru. Pro představu o měřítku, kdybychom zvětšili atom do velikosti známé části kosmu, Planckova délka by sotva narostla do výšky průměrného stromu.

Vidíme tedy, že neslučitelnost kvantové mechaniky s obecnou relativitou se stane zjevnou až v dosti esoterické, tajuplné říši vesmíru. Z tohoto titulu bystese mohli ptát, zda si konflikt zaslouží naše trápení. Po pravdě, fyzikální komunita o tomto tématu nemluví jednotným jazykem. Jsou fyzici, kteří jsou ochotni si problému povšimnout, ale šťastně ho obejdou a užijí obecné relativity a kvantové mechaniky pro otázky, v nichž typická délka daleko převyšuje Planckovu délku, jak jejich výzkum žádá. Jsou však i jiní fyzici, kteří se cítí být velmi otřeseni faktem, že dva základní pilíře fyziky, jak ji známe, jsou ve svémjádru fundamentálně neslučitelné, nehledě na ultramikroskopické vzdálenosti, jejichž zkoumání je nutné pro obnažení konfliktu. Taková neslučitelnost, jak říkají, ukazuje na podstatnou prasklinu v našem poznání fyzikálního vesmíru. Tento názor je podepřen nedokazatelným, ale hluboce procítěným pohledem, že vesmír, pokud ho pochopíme na nejhlubší a nejelementárnější úrovni, lze popsat logicky spolehlivou teorií, jejíž části jsou harmonicky sjednoceny. A jistě, nehledě na míru důležitosti neslučitelnosti pro jejich výzkum, je pro většinu fyziků obtížné uvěřit, že v samých základech bude naše nejhlubší teoretické chápání kosmu matematicky nekonzistentně slátáno z dvou silných, ale nespojitelných rámců.

Fyzici vyzkoušeli řadu pokusů, jak modifikovat obecnou relativitu nebo kvantovou mechaniku nějakým způsobem, kterým by se konfliktu mohli vyhnout, ale všechny pokusy, přes odvahu a upřímnost mnohých z nich, končily jedním neúspěchem za druhým.

Tak tomu bylo až do objevu teorie superstrun.^8