KAPITOLA 10

BRÁNY ZA NEJVĚTŠÍM RUBE GOLDBERGOVÝM STROJEM

Teď se dostáváme k jádru věci. Zdánlivý absurdní design vesmíru a odvolávání se na nějakou formu antropického principu je už dost zastaralá záležitost. Co je doopravdy nové, co je tím zemětřesením, jež vyvolalo mezi teoretickými fyziky obrovské zděšení a ostré diskuse, a co je důvodem vzniku této knížky, je poznání, že krajina strunové teorie obsahuje závratný počet rozmanitých údolí. Dřívější teorie jako kvantová elektrodynamika (teorie fotonů a elektronů) i kvantová chromodynamika (teorie kvarků a gluonů), které přežily 20. století, obsahovaly velice nudné krajiny. Byť je standardní model pěkně složitou teorií, obsahuje jen jedno vakuum. Co se jej týče, nikdy jsme si nemuseli vybírat, v jakém vakuu žijeme. Ani jsme nemohli.

Příčina nedostatku vakuí ve starších teoriích je jednoduchá. Není to v tom, že z matematického hlediska by kvantové teorie pole s bohatými krajinami nebyly možné. Když do standardního modelu přidáme pár set nepozorovaných polí podobných Higgsově poli, vygenerujeme tím obrovskou krajinu. Důvodem, proč je vakuum ve standardním modelu jedinečné, není nějaká pozoruhodná matematická elegance, o níž jsme mluvili ve 4. kapitole. Spíše to souvisí se skutečností, že standardní model byl postaven za specifickým účelem, totiž aby popsal jisté omezené skutečnosti našeho světa. Tato fakta byla do sebe po kouskách naskládána na základě experimentálních dat, aby popsala (nikoli vysvětlila) naše vlastní vakuum. Tyto teorie obdivuhodně plní to, k čemu byly navrženy, ale nic víc. Teoretici mysleli jen na tohle, takže neměli důvod přidávat do standardního modelu další struktury, aby nakonec získali krajinu. Vlastně po celé 20. století by většina fyziků (s výjimkou prozíravých vizionářů, jakými jsou Andrej Linde a Alex Vilenkin) považovala rozmanitou krajinu za skvrnu na pověsti fyziky, nikoli za její přednost.

Ještě donedávna byli strunoví teoretici zaslepeni starým paradigmatem teorie s jediným vakuem. Přes skutečnost, že ke kompaktifikaci (svinutí a schování) dodatečných dimenzí, jejichž existence vyplývá ze strunové teorie, můžeme použít miliony různých Calabiho-Yauových variet, lídři tohoto oboru nepřestávali doufat, že objeví nějaký matematický princip, jenž vyloučí všechna vakua a zachová pouze jedinou možnost. Byť se snažili sebevíc, najít princip pro výběr jedinečného vakua se jim však nepodařilo. Říkají, že „naděje umírá poslední“, avšak poslední dobou si většina strunových teoretiků začíná uvědomovat, že ačkoli teorie může být teorií správnou, jejich ambice byly přehnané. Sama teorie si žádá, aby na ni bylo nazíráno jako na teorii rozmanitosti, nikoli jedinečnosti.

Čím to, že se ve strunové teorii skrývá tak bohatá a různorodá krajina? Odpověď souvisí s enormní složitostí titěrných svinutých geometrií, které ukrývají šest či sedm dodatečných rozměrů prostoru. Než se však k této složitosti dostaneme, objasníme si jednodušší a mnohem známější příklad podobné komplexnosti. Vlastně mě právě tento příklad původně inspiroval k zavedení termínu *krajina*.

Slovo *krajina* nepochází z kuchyně strunových teoretiků ani kosmologů. Když jsem je poprvé použil v roce 2003 k popisu vysokého počtu strunových vakuí, vypůjčil jsem si je z mnohem staršího oboru přírodovědy, z fyziky a chemie velkých molekul. Možné konfigurace velkých molekul, sestavených ze stovek či tisíců atomů, byly dlouhou dobu popisovány jako krajiny nebo někdy jako energetické krajiny. Krajina strunové teorie má mnohem méně společného s vyschlými krajinami kvantové teorie pole, to už více souvisí s „konfiguračním prostorem“ velkých molekul. Věnujme se teď této skutečnosti, k průzkumu strunové teorie se vrátíme později.

*

Nejprve uvažujte jediný atom. Abychom specifikovali jeho polohu, potřebujeme znát tři čísla – souřadnice atomu podél tří os *x*, *y* a *z*. Nelíbí-li se vám značení *x*, *y*, *z*, klidně místo nich používejte délku, šířku a výšku. Takže možnými konfiguracemi jednoho atomu jsou body v obyčejném trojrozměrném prostoru.

Nejjednodušším systémem složeným z atomů je molekula skládající se ze dvou atomů. Ke stanovení polohy dvou atomů musíme znát šest souřadnic: tři pro každý atom. Bylo by přirozené těchto šest souřadnic označit jako x_1, y_1, z_1 a x_2, y_2, z_2, kde indexy 1 a 2 odpovídají prvnímu a druhému atomu. Těchto šest čísel popisuje body v trojrozměrném prostoru, avšak my těchto šest čísel můžeme zkombinovat tak, že vytvoříme abstraktní šestirozměrný prostor. Tento šestirozměrný prostor je krajinou popisující dvouatomovou molekulu.*

---

* Pro matematiky a fyziky je taková hra na konfigurační prostor – nebo obecně jakýkoli *n*-rozměrný prostor – snadná. Pro nematematiky a nefyziky už ne. Matematik či fyzik si řekne: „Bod v *troj*rozměrném prostoru je určen *třemi* souřadnicemi (x, y, z). Když mám dva body, dvě molekuly, mám celkem *šest* čísel. Nic mi nebrání ze dvou trojic vytvořit jednu *šestici* (x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2). Toto je teď také bod. Ale *jeden* bod v *šesti*rozměrném prostoru. Takže se podívejme, co všechno se zjednoduší a jaké nové možnosti se mi otevřou, když zavedu jediný

Teď přeskočme rovnou k molekule složené z tisícovky atomů. Vzhledem ke standardům anorganické chemie by to byla ohromná molekula, ale v organické chemii či biochemii je taková molekula dost běžná. Jak popíšeme všechny způsoby, kterými se může tisíc atomů uspořádat? Tato otázka není jen čistě hypotetická, protože biochemici a biofyzici, kteří chtějí porozumět tomu, jak se skládají proteinové molekuly, musejí uvažovat v řeči molekulární krajiny.

Je evidentní, že když chceme specifikovat konfiguraci celé tisícovky atomů, musíme zadat tři tisíce čísel, které můžeme považovat za souřadnice krajiny mající tři tisíce dimenzí čili krajiny možných molekulárních „designů".

Soubor atomů má nějakou potenciální energii, jež se mění s tím, jak se atomy pohybují. Když se atomy pohybují pryč od sebe, nakonec dosáhnou bodu s minimální energií. Jistě, je mnohem obtížnější představit si energii tisícovky atomů, ale princip je stejný – potenciální energie molekuly se mění s tím, jak se pohybuje po krajině. Stejně jako v třetí kapitole platí, že pokud na potenciální energii nahlížíme jako na výšku, bude mít krajina bohatou topografii s pohořími, údolími a hřebeny.

Pozoruhodnou skutečností je, že počet těchto údolí bude závratný, protože roste exponenciálně s počtem atomů. V případě velké molekuly přesahuje počet izolovaných údolí hranici milionů či dokonce miliard. Krajina molekuly složené z tisícovky atomů může mít klidně 10^{100} údolí. Jak toto vše souvisí s krajinou vakuí a strunovou teorií? Odpověď je jednoduchá. Kompaktifikace ve strunové teorii obsahuje mnoho „pohyblivých součástí", stejně jako molekula. S některými součástmi jsme se již setkali. Kompaktifikační moduly jsou veličinami, které určují velikost a tvar rozličných geometrických rysů Calabiho-Yauových variet. V této kapitole prozkoumáme některé další pohyblivé součástky a uvidíme, proč je krajina tak složitá a neobyčejně bohatá.

D-BRÁNY

V 8. kapitole jsme viděli, jak Witten ve své práci, kterou fyzikům představil v roce 1995, spojil různé strunové teorie do jedné velké M(istrovské)-teorie. Jenomže teorie trpěla vážným nedostatkem, protože potřebovala nové objekty, jež dřívější strunová teorie nepředpovídala. Teorie musela fungovat nějak takto: každá strunová teorie musí ve své matematice obsahovat dříve netušené, hluboce skryté objekty. Fundamentální struny z jedné verze teorie strun nebyly

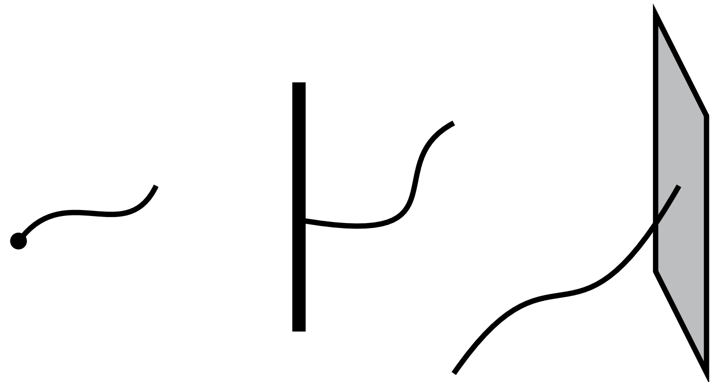
bod v šestirozměrném prostoru. Pokud se to osvědčí, postup zobecním." A opravdu se ukáže, že takový přístup se vyplácí. Nakonec si řekne toto: „Budu mít abstraktní prostor s 3*N* dimenzemi, kde *N* je počet částic. Jelikož stav libovolné částice charakterizuji nejen polohou, ale i rychlostí (obecněji hybností), musím uvést dvojnásobek čísel – proto bude lepší takový prostor vnořit do vyššího 6*N*-rozměrného prostoru." (Druhý prostor je takzvaný fázový prostor a konfigurační prostor je jeho podprostorem.) [Pozn. překl.]

stejnými objekty jako fundamentální struny z jiné verze. Jak se však měnily moduly – když se člověk pohyboval krajinou – nové objekty ze strunové verze A se přeměňovaly ve staré objekty strunové verze B. Jedním příkladem, který jsme již viděli, je transformace membrán z M-teorie do strun ze strunové teorie typu IIa. Wittenovy představy byly přitažlivé, dokonce podmanivé, avšak povaha nových objektů a jejich matematické postavení v teorii byly naprostou záhadou. Tak tomu bylo, než Joe Polchinski objevil své brány.

Joe Polchinski je šarmantní a veselý člověk, ten typ, kterého byste měli rádi za souseda. Jednou komentoval jídlo a pronesl: „Jsou pouze dva druhy jídla – to, které poléváte čokoládou, a to, na které dáváte kečup." Jeho chlapecký zevnějšek však zakrývá jednu z nejhlubších a nejhloubavějších myslí zaměřenou na problémy, které fyziku sužovaly v uplynulém půlstoletí. Dokonce ještě dříve, než Witten představil svou M-teorii, si Joe v rámci strunové teorie pohrával s novou myšlenkou. Víceméně to bral za matematickou hru, když postuloval existenci zvláštních míst v prostoru, kde mohly struny končit. Představte si, jak dítě drží jeden konec švihadla, mává jím, a švihadlo se vlní. Vlny putují na vzdálený konec švihadla, avšak to, co se stane v dalším okamžiku, závisí na tom, zda je vzdálený konec volný, nebo zda je uvázaný k nějakému pevnému bodu. Než Polchinski rozehrál svou partii, konce otevřených strun byly vždy volné, jeho ale napadlo, že v prostoru mohou existovat kotvicí body, které zabraňují strunám volně vlát. Takové ukotvení mohl představovat třeba i obyčejný bod v prostoru čili víceméně cosi jako ruka pevně omezující pohyb konce. Možností je ale daleko víc. Předpokládejte, že konec švihadla je upevněn ke kroužku, jenž může klouzat nahoru a dolů po tyčce. Konec je částečně upevněn, ale částečně se může i pohybovat. Třebaže je konec připevněn k tyči, může se volně pohybovat podél přímky – po tyči samotné. Co jde udělat se švihadly a tyčkami, můžeme udělat i se strunami. Tak nějak to Polchinski tvrdil. Proč by v prostoru nemohly být zvláštní úsečky, na které by se připevnily konce strun? Podobně jako v případě švihadla a tyčky by se pohyboval konec struny volně po délce úsečky. Úsečku bychom mohli ohnout i do nějaké křivky. Body a čáry nepředstavují všechny možnosti. Konec struny by se mohl připojit i k ploše, druhu membrány. Struny by mohly klouzat po ploše v libovolném směru, ale z membrány samotné by uniknout nemohly.

Tyto body, čáry a plochy, na kterých mohou končit struny, si zasluhovaly jméno, a tak je Joe pokřtil „Dirichletovy brány", zkráceně jen D-brány. Peter Dirichlet žil v 19. století a byl to německý matematik, který neměl se strunovou teorií pranic společného. Před 150 lety ale studoval matematiku vln a to, jak se odrážejí od pevných objektů. Nové objekty se určitě mohly jmenovat Polchinského brány, ale termín *p-brány* už strunoví teoretici používali pro jiný typ objektů.

Joe je můj dobrý kamarád. Za těch více než pětadvacet let jsme spolu pracovali na řadě fyzikálních projektů. O D-bránách jsem se prvně doslechl nad šálkem



D0-brána D1-brána D2 brána

kávy v Quackenbushově mezigalaktické kavárně a espresso baru v texaském Austinu, myslím, že to bylo v roce 1994. Ta představa mě bavila, ale za revoluční věc jsem ji nepokládal. Nebyl jsem sám, kdo podcenil význam D-bran. D-brány tehdy nikdo neměl v diáři na seznamu úkolů – dokonce snad ani Joe. Ale krátce po Wittenově přednášce v roce 1995 po nich teoretičtí fyzici rychle skočili.

Jak souvisejí D-brány s Wittenovou přednáškou? O několik měsíců později napsal Joe článek, jenž měl obrovský dopad na všechny oblasti teoretické fyziky. Witten potřeboval přesně takové objekty, jakými byly Joeovy D-brány. Fyzici vyzbrojení D-bránami mohli konečně dokončit Wittenův projekt, který nahrazoval několik zdánlivě různých teorií jedinou teorií s mnoha řešeními.

BRÁNY O VŠECH DIMENZÍCH

Čím jsou struny tak zvláštní? Co je tak výjimečného na jednorozměrných vláknech energie, že strunoví teoretici mají takovou jistotu, že tato vlákna představují stavební kamínky veškeré hmoty? Čím více se dozvídáme o této teorii, tím jistěji víme, že na nich není nic zvláštního. V 8. kapitole jsme se seznámili s magickou mysteriózní majestátní jedenáctirozměrnou M-teorií. Tato teorie neobsahuje žádné struny. Má v sobě membrány a gravitony, ale tím to končí. Žádné struny v ní nenajdete. Jak jsme viděli, struny se zjeví jen tehdy, když M-teorii proženeme kompaktifikací, a i tehdy jsou struny limitami páskovitých membrán, jež se promění ve strunové objekty, jen když kompaktní dimenzi zmenšíme na nulovou velikost. Jinými slovy, strunová teorie je teorií strun jen v jistých limitních oblastech krajiny.

Ve světě s trojrozměrným prostorem existují tři typy objektů, které strunoví teoretici nazývají bránami. Nejjednodušším objektem je bodová částice. Jelikož bod se nerozkládá do žádného směru, je zvykem o bodu uvažovat jako o *nularozměrném (bezrozměrném) prostoru.* Život na bodu by byl velmi nudný; nejde ho zkoumat v žádném směru. Strunoví teoretici hovoří o bodových částicích jako o *nulabránách*, jelikož *nula* odpovídá jejich dimenzi. V žargonu strunové teorie se nulabráně, na které může struna mít svůj konec, říká D-nulabrána (zkráceně D0-brána).

Po nulabránách přicházejí jednobrány neboli struny. Struna se rozkládá pouze v jednom směru. Žití na struně je hodně omezující, ale máte alespoň jeden směr k pohybu. Ve strunové teorii existují dva typy jednobran – původní struny a D-struny (D-jednobrány), což jsou jednorozměrné objekty, na kterých mohou obyčejné struny mít své konce.

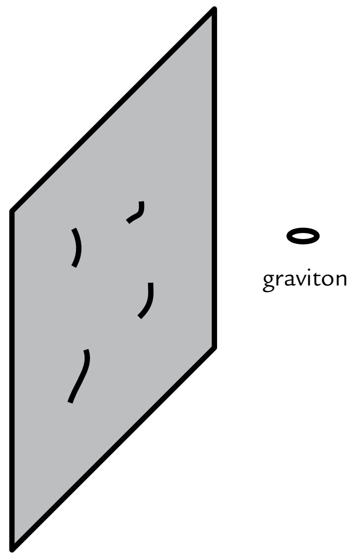
Konečně tady máme dvojbrány neboli membrány – ohebné plátky. Na dvojbráně je život daleko rozmanitější, byť stále není tak zajímavý jako v trojrozměrném prostoru. Vlastně bychom náš trojrozměrný svět mohli klidně nazývat trojbránou, avšak na rozdíl od nulabran, jednobran a dvojbran nemůžeme trojbránou otáčet v prostoru. Ona *je* tím prostorem. Předpokládejme však, že bychom žili ve světě se čtyřmi prostorovými rozměry. Dodatečná prostorová dimenze by umožňovala trojbráně se volně pohybovat. Ve světě se čtyřmi prostorovými dimenzemi je přípustné mít nulabrány, jednobrány, dvojbrány i trojbrány.

A co (9+1)rozměrný svět strunové teorie? Je možné, že existují brány od nuly až k osmi dimenzím, tedy nula- až osmibrány, samo o sobě to ale ještě neznamená, že daná teorie opravdu takové objekty obsahuje. To záleží na základních složkách hmoty a způsobech, jakými se mohou skládat. Avšak znamená to, že máme dostatečný počet dimenzí, aby v nich takové brány byly. Deset prostorových dimenzí M-teorie dostačuje i na to, aby v nich přebýval další druh bran, totiž devítibrány.

Jenom to, že se do desetirozměrného prostoru vejde deset různých druhů bran, neznamená, že všechny brány mohou v M-teorii existovat jako přípustné objekty. Ve skutečnosti je M-teorie neobsahuje automaticky. M-teorie je teorií gravitonů, membrán a pětibran. Žádné jiné brány neexistují. Kdybychom chtěli vědět, proč tomu tak je, zabředli bychom hluboko do abstraktní matematiky supersymetrické obecné teorie relativity. Chodit tak daleko nemusíme, postačí vědět, že jedenáctirozměrná supergravitace – tedy (10+1)-rozměrná supergravitace – je teorií membrán a pětibran, jež spolu gravitačně interagují přehazováním gravitonů tam a zpátky.

Každá desetirozměrná strunová teorie obsahuje širokou paletu D-bran. Jedna verze – strunová teorie typu IIa – má brány se sudým počtem dimenzí: D0, D2, D4, D6 a D8. Brány ve strunové teorii typu IIb mají lichý počet dimenzí, jsou to zde brány D1, D3, D5, D7 a D9.

Stejně jako můžete připevnit k tyčce více než jedno švihadlo, může na D-bráně mít svůj konec větší počet strun. Vlastně oba konce jediné struny mohou být připevněny k téže D-bráně, stejně jako mohou dva konce švihadla být upevněny k jediné tyčce. Tyto segmenty struny se mohou pohybovat volně po D-bráně, ale nemohou se z ní dostat pryč. Jsou to tvorové odsouzení prožít svůj život na D-bráně.



Malé segmenty struny jsou zajímavé tím, že se chovají stejně jako elementární částice. Kupříkladu si vezměte D-trojbránu. Krátké struny, s oběma konci připevněnými k bráně, se pohybují volně přes trojrozměrný objem D-trojbrány. Mohou se k sobě přiblížit, spojit se v jeden segment, kmitat a rozpojit se. Pohybují se a interagují jako částice, jež strunová teorie měla původně vysvětlit – proto také vznikla. Avšak nyní tyto částice žijí na bráně. D-brána je modelem světa obsahujícího elementární částice, které se chovají jako skutečné elementární částice. Jediná věc, jež chybí na D-bráně, je gravitace. Důvodem je, že graviton je uzavřená struna, tedy struna bez konců. Struna bez konců se nemá jak přichytit k bráně.

Je možné, že skutečný svět (s výjimkou gravitonů) se všemi elektrony, fotony a dalšími elementárními částicemi – stejně jako atomy, molekulami, lidmi, hvězdami a galaxiemi – je světem na bráně? Většina teoretiků, kteří pracují na této problematice, to považuje za pravděpodobné.

BRÁNY A KOMPAKTIFIKACE

S bránami si lze vyhrát do sytosti. Vezměte D-dvojbránu – membránu – a zakřivte ji do tvaru 2-sféry. Vyrobili jste si balon. Potíž je, že v důsledku silného napětí membrány se 2-sféra zhroutí, jako když balon propíchnete. D-dvojbránu byste mohli smotat i do tvaru toru, ale i ten by rychle zkolaboval.

Teď si však představte bránu, která se rozléhá od jednoho konce vesmíru k druhému. Nejjednodušší představa je D-jednobrána natažená jako nekonečný provaz přes celý vesmír. Nekonečná D-brána nemá jak se scvrknout a zhroutit. Můžete si představit, že dva kosmičtí obři drží konce brány na místě, ale jelikož je D-brána nekonečná, obři leží v nekonečné vzdálenosti.

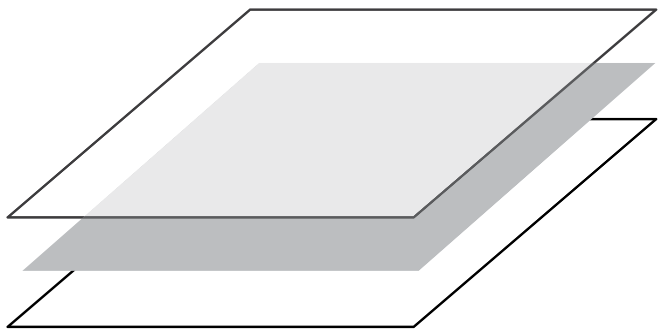
Nemáme důvod zůstávat jen u D-jednobran, protože stabilní je i nekonečně velké plátno natažené přes vesmír. Tentokrát bychom k udržení plátna potřebovali zástup obrů a opět platí, že by museli ležet v nekonečnu. Nekonečná membrána by byla světem obsahujícím elementární částice, jež by připomínaly „plochosvětovou“ verzi našeho vlastního vesmíru. Mohlo by vás napadnout, že tvorové žijící na membráně by nemohli odhalit existenci dalších rozměrů, ale to není tak docela pravda. Žalobníčkem by byly vlastnosti gravitační síly. Vzpomeňte si, že gravitaci vyvolávají gravitony, které přeskakují mezi objekty. Jenže gravitony mají podobu uzavřených strun bez konců. Nemají důvod zůstávat na bráně. Naopak si volně bloudí celým prostorem. Sice mohou být vyměňovány mezi objekty na bráně, ale jen tak, že si nejprve vyjdou do dodatečných dimenzí, a až pak se vrátí k bráně. Gravitace by byla jako „zpráva“ ze science fiction, a tvorům z plochosvěta by zvěstovala existenci více dimenzí existujících mimo jejich svět. Tvorové by takto zjistili, že jsou uvězněni na dvojrozměrném povrchu.

„Nepozorované“ dimenze gravitace by ve skutečnosti bylo možné odhalit velmi snadno. Když se objekty srážejí, vysílají gravitony, stejně jako kolidující elektrony vysílají fotony. Avšak gravitony typicky odletí do prostoru a nikdy se nevrátí zpět na bránu. Tímto způsobem by se ztrácela z brány energie. Obyvatelé plochosvěta by zjistili, že energie se neproměňuje v teplo, potenciální energii či chemickou energii, ale že prostě mizí.

Nyní si představte, že prostor má více než obvyklé tři dimenze. Stejným způsobem by se mohla rozkládat v prostoru nekonečná D-trojbrána a na této trojbráně by mohly existovat obvyklé věci z našeho světa – jen gravitace by dělala neplechu. Zákon gravitační síly by odrážel skutečnost, že gravitony se pohybují více dimenzemi, neboť by šířením do dalších dimenzí gravitace „prořídla“. Následky by byly katastrofické. Gravitace by hodně zeslábla a galaxie, hvězdy i planety by sotva držely pohromadě. Gravitace by vlastně byla tak slabá, že by nás ani neudržela na povrchu Země (kdyby Země zůstala v jednom kusu).

Zabývejme se teď dodatečnými dimenzemi – těmi, které my prozkoumat nemůžeme, ale graviton ano – a sviňme je do mikroskopicky malého kompaktního prostoru. Obyčejné tři dimenze, jaké známe, vytvářejí nekonečnou místnost, ale ty ostatní dimenze mají stěny, stropy a podlahy. Body na protilehlých stěnách, stropu a podlaze jsou souhlasné stejně, jak jsme viděli v 8. kapitole.

Abychom si to mohli lépe představit, vraťme se k příkladu, v němž jsme prohnali kompaktifikací trojrozměrný prostor, kde jsme svinuli jednu dimenzi. Na počátku máme nekonečnou místnost a každý bod na stropě je totožný s bodem na podlaze přesně pod ním. Avšak teď leží na podlaze koberec, který se rozléhá do nekonečna. Koberec je D-bránou. Představte si, že se kobercová brána pomalu pohybuje svislou dimenzí. Pomalu se zvedá z podlahy jako kouzelný létající koberec z arabských pohádek. Levituje tak dlouho, až se dotkne stropu. A abrakadabra – koberec se okamžitě objeví na podlaze.



Graviton sice stále není připevněn ke kobercové bráně, ale teď se nedostane moc daleko, protože nemá dost místa, kudy se pohybovat v dodatečné dimenzi. A je-li dodatečná dimenze mikroskopicky malá, nejde ani říct, zda graviton bránu vůbec opustil. Výsledek? Gravitace je skoro stejně silná, jak by měla být, kdyby se graviton pohyboval přímo po bráně. A samozřejmě se nic nezmění, pokud membránu nahradíme D-trojbránou ve vícerozměrném prostoru. D-trojbrána v devítirozměrném prostoru strunové teorie by vypadala podobně jako náš svět se šesti svinutými dodatečnými dimenzemi.

Většina strunových teoretiků si doopravdy myslí, že žijeme v bránovém světě, jenž se vznáší v prostoru s šesti dodatečnými dimenzemi. A možná kolem nás poletují i jiné brány, jež od nás dělí mikroskopická vzdálenost, které ale nevidíme, jelikož naše fotony jsou ukotvené v naší vlastní bráně a jejich fotony zase ve své bráně. Ačkoli jsou tyto brány neviditelné, odhalit jejich existenci by mohlo jít, protože by gravitace, jež je tvořena uzavřenými strunami, tuto mezeru přemostila. Není snad přesně tohle skrytá hmota? Neviditelná hmota, jejíž gravitační vliv pociťují naše vlastní hvězdy a galaxie? Polchinského brány nám otevřely zcela nové obzory. Z našeho pohledu je však vesmír, kde si bránové světy žijí v poklidu a míru, jen jedou z mnoha možností, jež lze v krajině nalézt. Calabiho-Yauovy prostory překypují nesmírnou složitostí, obsahují stovky modulů, bránových světů, toků (k těm se dostaneme později), zkrátka vesmír se začíná jevit jako svět, který by mohla milovat jen Rube Goldbergova matka. Abych parafrázoval proslulého experimentálního fyzika Isidora Isaaca Rabiho: „Kdo si sakra tohle všechno objednal?“*

V žádném případě jsme tím nevyčerpali všechny triky a mechanismy, se kterými si Rube může hrát. Další možností je, že se brány nejen vznášejí v kompaktním prostoru, ale mohou se také obtočit kolem kompaktních rozměrů. Nejjednodušší bude, když se vrátíme k nekonečně dlouhému válci a ovineme kolem něj D-jednobránu. Vypadalo by to zcela stejně jako ovinutí obyčejné struny kolem válce jen s tím rozdílem, že strunu nahradíme D-jednobránou. Tento objekt by zdálky vypadal jako bodová částice na jednorozměrné lince. Na druhou stranu teď předpokládejte, že kompaktní prostor má tvar obyčejné 2-sféry. Můžete zkusit obtočit strunu nebo D-jednobránu kolem rovníku této koule jako pásek kolem těla nějakého tlustého člověka. Pásek by však mohl ze sférického tlusťocha sklouznout. Struna nebo D-jednobrána není na sféře stabilní – moc dlouho na ní nevydrží. Slovy fyzika Sidneyho Colemana: „Basketbalový míč do lasa nechytnete.“

A co torus – povrch pneumatiky? Může se D-jednobrána navinout na torus stabilním způsobem? Může, a to více než jen jedním. Zajímavým zobecněním toru je povrch se dvěma dírami. Vezměte kousek hlíny a uplácejte z ní kuličku. Vzniklý povrch je sféra. Teď v ní vydloubejte díru, aby nový povrch připomínal americkou koblihu, a dostali jsme torus. Teď do toru vydloubejte druhou díru. Vzniklý povrch je zobecněný torus se dvěma dírami. D-jednobránu můžete navinout na torus se dvěma dírami více způsoby než na torus s jednou dírou. Matematik by sféru označil za *plochu s nulovým rodem*, torus za *plochu s jedním rodem* a torus se dvěma dírami pak za *plochu s rodem dva*.** Je zřejmé, že vydlabat můžete libovolný počet děr a vytvořit povrchy s libovolně vysokým rodem. Čím je rod plochy vyšší, tím více způsobů existuje pro svinutí bran.

Strunová teorie obsahuje devítirozměrný prostor, z čehož šest dodatečných dimenzí skrývá pomocí kompaktifikace. Šestirozměrné plochy jsou daleko složitější než dvojrozměrné prostory. Nejenže můžete svinout D-jednobrány, ale jelikož existují vícerozměrné odrůdy koblihových děr, můžete obmotávat i D-dvojbrány, D-trojbrány, D-čtyřbrány, D-pětibrány i D-šestibrány, a to stovkami způsobů.

Dosud jsme se zabývali příklady, v nichž vystupovala zpravidla vždy jen jedna brána, ale ve skutečnosti můžete pracovat i s jejich soubory. Představte

---

* Rabi takto komentoval nově objevený mion (částici podobnou elektronu, ale dvakrát těžší). „Kdo si tohle objednal?“ Není pochyb, že tím mínil onu svévolnost v elementárních částicích.

** Rod plochy (genus topologie) je číslo, jímž lze charakterizovat topologii objektu na základě „děr“ či „držadel“, které takový objekt obsahuje. Plochou rodu 0 je třeba povrch koule (bez děr), rod 1 má zmíněný torus (pneumatika), rod 2 má nafouknutá ležatá osmička (představte si hračku pro nemluvňata se dvěma dírami). [Pozn. překl.]

si opět koberec ležící na podlaze do nekonečna se rozléhající místnosti. Proč ale nemít dva na sobě ležící koberce? Vlastně jich na sebe můžeme navrstvit daleko víc, jako v perském bazaru. Stejně jako mohou koberce nad sebou volně poletovat, může vzniknout i plát tvořený od sebe oddělenými D-bránami. Avšak tyto brány jsou cosi jako lepkavé koberce. Když je přiložíte k sobě, přilepí se na sebe a vznikne složená brána. Rube Goldberg má tak ještě více možností, jak navrhovat své stroje. V pokoji může položit do různých výšek několik souborů koberců. Má volné ruce vytvářet svět se všemi možnými vlastnostmi. Ve skutečnosti platí, že pomocí dvou souborů složených ze dvou a tří bran může vytvořit svět s fyzikálními zákony, jež budou sdílet podobné vlastnosti se standardním modelem!

Když počítáme možnosti pro vytvoření vesmíru, polohy bran v kompaktním prostor jsou dalšími proměnnými, které musíme přidat k modulům. Když jsou kompaktní dimenze mikroskopické – příliš malé, aby je bylo vidět – zdálky se polohy bran jeví jen jako další skalární pole definující krajinu.

TOKY

Ukázalo se, že toky jsou jedněmi z nejdůležitějších ingrediencí krajiny. Zejména kvůli nim je krajina tak nesmírně rozlehlá. Toky jsou o něco abstraktnější než brány a také se hůře představují. Jsou to nové zajímavé ingredience, ale to podstatné o nich je jednoduché. Zdálky vypadají jako pouhá další skalární pole. Nejznámějšími příklady toků jsou elektrická a magnetická pole, která zavedli Faraday a Maxwell. Faraday sice nebyl matematik, ale uměl si věci dobře představovat. Zdálo by se, že ve svých experimentálních aparaturách snad musel elektromagnetická pole i vidět. Pole magnetu si představoval jako *siločáry* vycházející ze severního pólu a proudící zpět do jižního pólu. V každém bodě prostoru určují tyto siločáry směr magnetického pole, zatímco hustota siločar (to, jak jsou na sebe natěsnány) udává intenzitu pole.

Stejným způsobem si Faraday představoval i elektrické pole, tedy jako siločáry tekoucí z kladných nábojů do záporných. Představte si, že imaginární sféra obklopuje izolovaný nabitý objekt, z něhož vycházejí siločáry elektrické síly a míří do nekonečna. Siločáry musejí procházet i sférou. Tyto imaginární čáry procházející přes sféru jsou příkladem elektrického toku povrchem.

Pro celkové množství toku procházejícího povrchem existuje jistá míra. Faraday si tok představoval jako počet siločar procházejících povrchem. Kdyby znal kalkulus, popsal by tok jako plošný integrál elektrického pole. Představa *počtu siločar* byla ještě lepší, než Faraday tušil. Tok povrchem je jednou z věcí, o kterých nás kvantová mechanika učí, že jsou kvantované. Podobně jako v případě fotonu není jednotka toku dělitelná na menší složky. Je tomu skutečně tak, tok se nemůže spojitě měnit, ale musíme na něj pohlížet v řeči diskrétních čar, takže tok libovolným povrchem je vyjádřen celým číslem.

Obyčejná elektrická a magnetická pole v trojrozměrném prostoru míří všemi směry, ale lze též uvažovat toky mířící do šesti kompaktních prostorových směrů. V šestirozměrném prostoru je matematika popisující toky složitější, avšak stále si je můžete představovat jako siločáry nebo siloplochy vinoucí se přes Calabiho-Yaův prostor a procházející přes koblihové díry.

Pro hlubší zkoumání toků v Calabiho-Yauově prostoru potřebujeme hodně moderní geometrie a topologie, ony důležité závěry však není těžké pochopit. Stejně jako v případě magnetických polí je i tok přes rozličné koblihové díry kvantován. Je to vždy celočíselný násobek nějaké základní jednotky toku. To znamená, že abychom mohli úplně určit tok, musíme zjistit několik celých čísel – tedy kolik tokových jednotek prochází každou dírou prostoru.

Kolik celých čísel je potřeba k popisu toku na Calabiho-Yauově prostoru? Jejich počet závisí na počtu děr, které povrch má. Calabiho-Yauovy plochy jsou nesrovnatelně složitější než jednoduchý torus a typicky obsahují několik set děr. Součástí popisu bodu v krajině jsou tedy řádově stovky tokových celých čísel!

KONIFOLDNÍ SINGULARITY

V typické situaci může tedy k fixaci velikosti a tvaru kompaktního prostoru vystupovat několik stovek modulů, dále nějaké brány nacházející se v různých místech prostoru, a teď jsme přidali několik stovek tokových čísel. Co ještě můžeme Rube Goldbergovi poskytnout?

Je toho hodně, s čím si může hrát, ale aby délka této knížky nepřesáhla únosnou mez, vysvětlíme si už jen jeden přídavek – konifoldní singularitu.* Fotbalový míč má tvar sféry. Když budete ignorovat strukturu míče a švy na jeho povrchu, je míč hladký. Míč používaný v americkém fotbalu (zvaný šiška) je na druhou stranu všude hladký s výjimkou konců, kde přechází v body. Nekonečně ostrý bod ležící někde na hladké ploše je příkladem *singularity*. V případě fotbalové šišky se singularitám říká kónické singularity (kuželové singularity). Špičatý tvar jejích konců je jako vrchol kužele.

* V angličtině zní původní termín *conifold*. Je to pojem poměrně nový a v češtině nemá žádný ustálený ekvivalent. Počeštěná verze může tedy znít jako *konifold* – konifold je zobecněním *variety*, se kterou se zde setkáváme pravidelně. Anglické slovo pro varietu je *manifold*. Na rozdíl od variet obsahují konifoldy „kuželové singularity“, což jsou body v prostoru (na varietě, či zde již konifoldu), jejichž okolí vypadají jako kužely. Konifold tedy není všude hladký jako varieta (obsahuje ostré body představované vrcholem kužele). Česky bychom konifoldu mohli říkat i *kovarieta* (jako „kónická varieta“), ale to by čtenáře znalé matematiky mohlo svádět k myšlenkám o dualitě mezi kovarietami a varietami, podobně jak je tomu mezi vektory a kovektory. [Pozn. překl.]

Singularity ve vícerozměrném prostoru, tedy místa, kde prostor není hladký, jsou už komplikovanější a mají složitější topologii. Konifold je takovou singularitou, která může existovat na Calabiho-Yauově prostoru. I když jsou komplikované, v zásadě se podobají vrcholu kužele, jak jejich název napovídá. Pro naše účely si postačí představit konifold jako špičaté kuželovité místo v geometrii.

Když spojíte konifoldy a toky na jednom Calabiho-Yauově prostoru, začnou se dít zajímavé věci. Tok vyvíjí sílu na špičku kužele a natahuje ji do dlouhého úzkého hrdla, které vypadá jako čenich mravenečníka. Ve skutečnosti můžete najednou mít více než jednu kónickou singularitu – v takovém případě je prostor plný špiček a vypadá jako šestirozměrná odrůda ježovky.

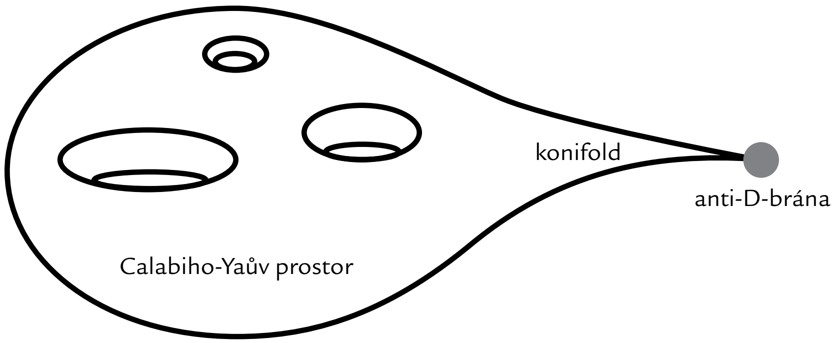
Teď už má Rube Goldberg potřebné součástky. Nakolik bizarní stroj zvládne sestavit? Možností má nepřeberné množství, zde si popíšeme jen jeden takový stroj, a to konstrukci jménem KKLT, jejíž jméno se skládá z počátečních písmen příjmení jejích konstruktérů.* K, K, L a T začali nejprve s Calabiho-Yauovým prostorem. Na výběr jich jsou miliony, prostě si vyberte libovolný z nich. Někde na prostoru ční konifoldní singularita ve tvaru čenichu. V dalším kroku KKLT vyplnili různé díry toky, tedy přiřadili každé díře nějaké celé číslo. To všechno v praxi znamená stanovit asi pět set parametrů pro moduly a toky. Ve výsledku vzniklo údolí v krajině, ale ne takové údolí, o kterém bychom si zatím povídali. Tento bod je v krajině Údolím smrti – nikoli kvůli tomu, že údolí je horké, ale protože leží pod hladinou moře, jeho výška je záporná. To samozřejmě znamená, že je záporná i energie vakua, a tedy i kosmologická konstanta. Z hlediska našeho vesmíru není znaménko správně. Nevzejde z ní univerzální odpuzování, ale univerzální kosmické přitahování. Kosmologická konstanta proto nepovede k urychlování rozpínání vesmíru, ale k jeho předčasnému zhroucení.

Tým KKLT provedl ještě další Rube Goldbergův trik. Přidali do stroje antibránu – antikobercovou bránu. D-brány se chovají jako částice. Stejně jako ke každé částici existuje antičástice, má i každá brána svou antibránu. A stejně jako v případě obyčejných částic i tady platí, že když se setká brána s antibránou, anihilují spolu za doprovodu energetické exploze. Jenomže KKLT do konstrukce přidali jen antibrány.

Ukazuje se, že na antibránu působí síla, která ji tlačí ke špičce konifoldní singularity. Jen v takovém místě může antibrána existovat. Hmotnost dodatečné antibrány přidává to správné množství energie, aby výška byla kladná. Čili když tým KKLT přidal špetku všech ingrediencí, objevili v krajině bod, vlastně údolí, s malou kladnou kosmologickou konstantou – první svého druhu.

---

* Ve jméně KKLT se skrývají příjmení Kachru, Kalloshová, Linde a Trivedi. Shamit Kachru, Renata Kalloshová a Andrej Linde jsou profesoři ze Stanfordovy univerzity, Sandrip Trivedi je profesorem v Institutu Tata v Indii.



Rube Goldbergův stroj z dílny KKLT.

Význam údolí, které KKLT našli, není v tom, že by věrně připomínalo naše vlastní údolí – neobsahuje totiž standardní model elementárních částic, a navíc údolí nemělo ve své původní podobě ani potřebné ingredience, aby popsalo inflaci. Jeho důležitost tkví ve skutečnosti, že to byl první úspěšně dokončený pokus o únik ze supersymetrické planiny při hledání údolí „nad hladinou moře“. Byl to důkaz principu, že v krajině strunové teorie leží údolí s malou kladnou kosmologickou konstantou.

Stroj z dílny týmu KKLT sice nese rysy Rube Goldbergovy složitosti, ale má i jednu vlastnost, kterou by Goldberg nikdy neschválil – obsahuje totiž jednu součástku, která slouží ku dvěma účelům. Antibrána zvyšuje energii a díky antibráně je kosmologická konstanta kladná, ale to ještě není všechno. Stojí za další podstatnou skutečností. Platí totiž, že náš svět, ve kterém žijeme, není supersymetrický – neexistuje například nehmotný fermionový parter fotonu, neexistuje ani identické bosonové dvojče elektronu – ale dokud nebyla do hrdla konifoldu přidána antibrána, konstrukce KKLT byla pořád supersymetrická. Antibrána však zakřivila pouťové zrcadlo a došlo k narušení supersymetrie. Takový čin se rozhodně nenese v Goldbergově duchu – použít jednu součástku ke dvěma účelům? Kdo to kdy viděl?

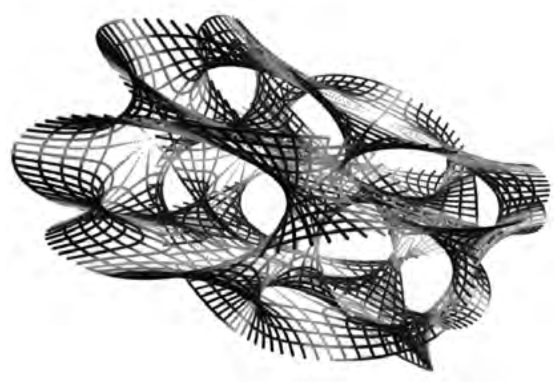
Bod v krajině, k němuž došel tým KKLT, není naším světem, ale nemusí být vůbec těžké do něj zakomponovat standardní model, a to přidáním dalších nových bran. Potřebné ingredience by poskytlo dalších pět D-bran ležících někde mimo antibránu.

BOUSSOOVO A POLCHINSKÉHO „DISKRÉTUUM“

Tým KKLT nenašel jen jediné údolí, ale spíše rozsáhlý soubor údolí. Jak jsme zmínili na začátku 7. kapitoly, Joe Polchinski s Raphaelem Boussoem, který byl tehdy postdoktorandem na Stanfordu, už základní myšlenku vysvětlili v článku, který byl do velké míry ignorován. Aby Bousso s Polchinským pochopili, jak může kompaktifikace vést k závratnému množství vakuí, zaměřili se na jedinou Calabiho-Yauovu geometrii a zajímali se o otázku, kolik existuje způsobů, jimiž lze stovky koblihových děr v prostoru zaplnit toky.

Předpokládejme, že máme Calabiho-Yauovu varietu s takovou bohatou topologií, že umožňuje existenci pěti set odlišných koblihových děr, jimiž mohou vát příslušné toky. Tok vinoucí se každou dírou musí být určen celým číslem, takže musíme specifikovat strunu s pěti stovkami celých čísel.

Teoreticky vzato pro velikost celých čísel neexistuje žádné omezení, ale v praxi bychom neradi, aby nám dírami protékaly silné toky. Následkem velmi silného toku by se totiž varieta mohla zvětšit do nebezpečných proporcí. Takže nějaké meze si stanovit musíme. Předpokládejme, že podmínkou pro tok je maximálně devítinásobek jednotky – potom celé číslo popisující tok leží mezi nulou a devítkou, což platí to pro všechny toky. Kolik možností tenhle předpoklad dá?

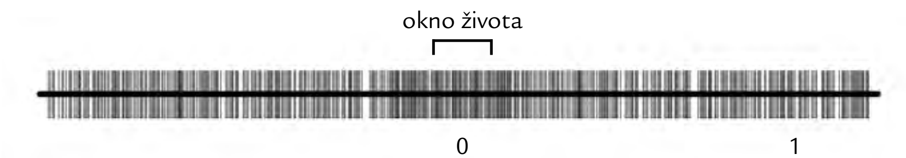


Část Calabiho-Yauovy variety.

Nejdříve to zkusme na jednodušším příkladu. Předpokládejme, že se zabýváme jen jednou dírou místo pěti set. Může-li celé číslo příslušející toku být nula až devět, máme celkem deset možností, tedy 0–9. Pointou je, že každá z těchto možností definuje potenciální vakuum, prostředí s vlastními zákony a (což je nejdůležitější) s vlastní vakuovou energií. Ačkoli z pohledu obyčejné kvantové teorie pole z 20. století je deset vakuí hodně, jen těžko je to slibné číslo, jež by nám pomohlo překonat nesmírnou nepravděpodobnost vynulování na 119 desetinných míst. Ale pokračujme.

Předpokládejme, že teď máme dvě díry, z nichž každou může procházet tok popsaný celým číslem od nuly po devítku. Pak počet možných konfigurací činí 10^2 neboli jedno sto. Tento výsledek je mírným zlepšením, ale je stále příliš nízký. Ale všimněte si, že pokaždé, když přidáme jednu díru, se počet možností zvětší desetinásobně. Šesti dírám odpovídá milion možností, dvanácti dírám už bilion možností. A když máme pět set děr, dostaneme závratně vysoký počet konfigurací 10^{500}. A co víc, každé údolí na tomto obřím seznamu obsahuje nějakou vakuovou energii, z nichž žádné dvě pravděpodobně nemají stejnou hodnotu.

Načrtněme si malý graf, který nám ukáže všechny možné hodnoty kosmologické konstanty. Vezměte si list papíru a nakreslete na něj vodorovnou osu. Uprostřed vyznačte nulový bod (kde bude mít kosmologická konstanta nulovou hodnotu). Napravo, vcelku daleko od nuly, vyznačte další bod, to bude jednička. Tato hodnota bude naší srovnávací hodnotou vakuové energie – bude to naše Jednotka. Nyní na osu vynášejte všechny ostatní body, které odpovídají vakuovým energiím celkem 10^{500} údolí. S dost ostrou tužkou se vám podaří vynést sotva tisícovku náhodně rozmístěných bodů, pak se začnou všechny slévat a vytvoří spojitou linku.



Chcete-li získat přesnější obrázek, vezměte si větší papír. S papírem o velikosti Empire State Building byste mohli zanést třeba milion náhodně rozmístěných teček, než by se začaly navzájem dotýkat. Papír o velikosti galaxie by pojal nějakých 10^{24} od sebe odlišených bodů. Ani jedno z těchto čísel se vůbec neblíží hodnotě 10^{500}. I kdybyste body na sebe namačkali na vzdálenost Planckovy délky, na list papíru velký jako celý známý vesmír byste vynesli jen ubohých 10^{60} bodů. Počet bodů vyjádřený číslem 10^{500} je tak závratný, že mě nenapadá jediný způsob, jak tyto body graficky znázornit.

Označením *všech* možných bodů v daném rozsahu vznikne *kontinuum*. Body v našem grafu znázorňujícím vakuovou energii ve skutečnosti netvoří kontinuum, ale jsou natolik husté, že z praktického hlediska představují všechna možná čísla. K popisu takto nesmírně obrovské a husté množiny hodnot vymysleli strunoví teoretici Bousso a Polchinski slovo *diskrétuum* – množina je diskrétní, ale téměř spojitá, vytváří skoro kontinuum.

Skutečnou pointou však je, že vzhledem k množství náhodně vybraných hodnot kosmologické konstanty bude v uzoučkém „okně života“, které vypočetl Weinberg, existovat závratné množství bodů. K tomu nepotřebujeme žádné jemné vyladění. Samozřejmě že v antropickém okně bude ležet jen nepatrná část údolí, asi tak jedno z každých 10^{120}.

Růst krajiny během roků, které uběhly od objevu strunové teorie, představoval pro většinu strunových teoretiků hrozná muka. Za těch šťastných raných let, když se prořídlá krajina skládala jen z jediného bodu či nanejvýš z tolika, že je šlo spočítat na prstech jedné ruky, byli strunoví teoretici štěstím bez sebe, když zjistili, že několik známých teorií představuje jen různá řešení jediné teorie. Při konsolidaci se však ve vzduchu začal vznášet jiný zlověstný trend, který strunové teoretiky děsil. Počet odlišných řešení se rozrůstal v nepředstavitelně obrovskou krajinu. Je však pravděpodobné, že tito fyzici najednou začnou krajinu vidět v jiném světle – jako zcela nejdůležitější a nejpřesvědčivější rys své teorie. Člověka může napadnout otázka: „Nenahradili jsme zrovna jeden nemožný problém druhým? Už se nemusíme ptát, proč je kosmologická konstanta tak jemně vyladěná. Snad je pravda, že krajina je natolik rozsáhlá, že v ní najdete cokoli, co zrovna hledáte. Ale jaký fyzikální princip vybírá to naše pohostinné údolí z 10^{500} dalších?“ V další kapitole najdeme odpověď, která zní, že takový princip neexistuje. Jak uvidíme, scestná je otázka sama o sobě.