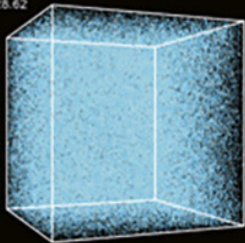


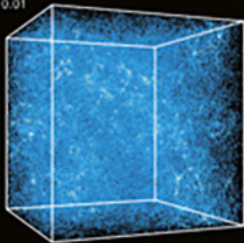
edice **aliter**

Andrew **Pontzen**

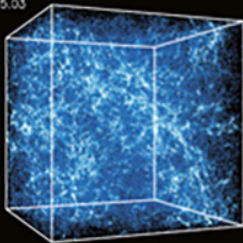
$Z=28.62$



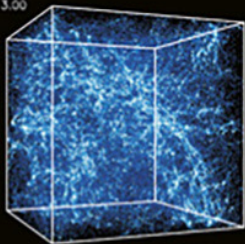
$Z=10.01$



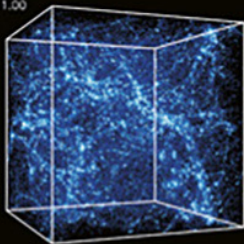
$Z= 5.03$



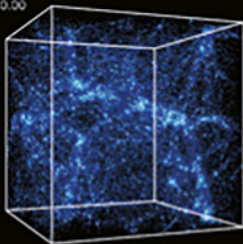
$Z= 3.00$



$Z= 1.00$



$Z= 0.00$



VESMÍR V KRABICI

Nové dějiny vesmíru

edice **aliter** — svazek **89**

Andrew
Pontzen

VESMÍR V KRABICI

Nové dějiny vesmíru

Argo a Dokořán

Mé rodině

OBSAH

PŘEDMLUVA	11
1	
Počasí a klima	25
2	
Temná hmota, temná energie a kosmická pavučina	61
3	
Galaxie a podmřížka	91
4	
Černé díry	123
5	
Kvantová mechanika a počátky vesmíru	149
6	
Myšlení	185
7	
Simulace, věda a realita	219
PODĚKOVÁNÍ	241
POZNÁMKY	243
REJSTRÍK	260

Copak pevné přesvědčení o tom,
že věc je nějaká, ji takovou skutečně činí?

William Blake, *Snoubení nebe a pekla*

Velice vzácně se stává, že jedna určitá událost otevře člověku nový obzor. Moji astronomičtí kolegové často spojují svou lásku k vesmíru s tím, že dostali astronomický dalekohled a pak strávili celou noc pozorováním hvězd nebo sledováním přistání na Měsíci. Můj osud byl zpečetěn, když jsem v sedmi letech objevil otcův počítač *ZX Spectrum*. Otec byl hudebník, pracoval s řadou prvních digitálních syntezátorů a vyznal se v elektronice. Domácí počítač byl další meta. Plastová krabička *Spectra* s gumovou klávesnicí a symbolem duhy se nacházela ve vlhkém suterénu, byla propojena se starou televizí a brzy jsem tam trávil každodenně celé hodiny. Ta věc mohla být naprogramována udělat téměř cokoliv, alespoň tak mi to připadalo.

Spectrum mělo hry a další programy, dneska bychom řekli různé aplikace, uloženy na audiokazetách. Spustit nějaký program byl nespolehlivý proces, který vyžadoval spoustu hádání a odhadování: rychlým posunem nebo přetáčením musel člověk nalézt to správné místo na pásce, pak natukat LOAD, stisknout play na přehrávači pásky a pár minut čekat, zatímco přístroj vydával bizarní zvuky a na obrazovce blikaly psychedelické barvy. Nakonec tohle všechno náhle skončilo, a když člověk měl štěstí, hra se spustila.

Jednou jsem v té početné otcově sbírce kazet našel program s názvem *SatOrb*.¹ Tenhle poklad otcovy sbírky vyzýval

hráče, aby vypustili satelit na oběžnou dráhu kolem planety, kterou si člověk mohl vybrat (z naší Sluneční soustavy). Hráč musel jen zadat počáteční výšku a rychlost a pak sledoval, jak se jeho vesmírnému tělesu daří. Jak se na černé obrazovce postupně objevovala dráha vyznačená žlutými pixely, hráč mohl hádat, jestli skončí nárazem na povrch planety, nebo satelit odletí do vesmírné pustiny, anebo skončí na kýžené stabilní dráze. Po řadě pokusů už člověk dokázal umístit satelit na stabilní dráhu a ten začal krásně obíhat, tak jako náš Měsíc nebo tisíce umělých satelitů obíhajících kolem Země.

SatOrb ve mně probudil zájem o fyziku a počítače a má na svědomí, že jsem jako teenager strávil dlouhé hodiny v suterénu a psal své vlastní programy. Měl jsem pár knih o vesmíru, v nichž jsem si rád listoval, a čas od času jsem se i zadíval na noční nebe. Ale rozmazaný vesmír složený z kostiček v křiklavých barvách ukrytý v malé černé krabici mi připadal bližší a reálnější než ten vzdálený, do nekonečna se táhnoucí kosmický prostor.

V té době jsem ovšem netušil, že *SatOrb* je vlastně primitivní simulace.

Simulace se snaží v počítači napodobit reálnou situaci a dneska se používají tak běžně, že se týkají veškerých součástí našich životů. Předpovědi počasí, na které všichni spoléháme, jsou založeny na simulaci zemské atmosféry; když jedeme v autě nebo sedíme v letadle, jde o stroje, které před výrobou prošly simulacemi a testováním; simulace hrají hlavní roli při počítačem vytvářených speciálních efektech používaných ve filmech a v televizi; počítačové hry, architektonické modely, finanční plánování, a dokonce i rozhodování v problémech veřejné zdravotní péče se opírají o příslušné simulace.

Ve svém zaměstnání kosmologa se pokouším simulovat na počítačích celý vesmír. Cílem je pochopit, co všechno tam

nahoře je, kde se to tam vzalo a jaký to má vztah k našemu životu na Zemi. V jistém smyslu používám počítač jako laboratoř. Kosmologové nemohou dělat klasické experimenty jako ostatní vědci – nemohou ovládat vesmír; ale i kdyby to šlo, výsledky by dorazily za dobu odpovídající kosmickým měřítkům – za miliardy let. Simulace nám poskytují počítačový vesmír, jehož vzdálenosti a časy jsou v našich rukou.

Právě schopností vytvářet virtuální světy si mě počítače získaly, ale moje dnešní práce nespočívá v tom, že bych seděl někde v suterénu a bušil do klávesnice. Spolupracuji s desítkami kolegů tady v Londýně a po celém světě. Naše výsledky publikujeme v časopisech, které čtou stovky dalších lidí. Náš projekt představuje společné úsilí tisíců lidí, kteří využívají výkonné počítače zaplňující celé klimatizované místnosti.

Mezi mou dnešní prací a programem *SatOrb* existuje ještě jeden velký rozdíl: dráhu satelitu obíhající planetu můžeme vypočítat perem na papíru – možná to bude trochu zdoluhavé a náchylné k chybám, ale všechno, co dokáže *SatOrb*, dokáže i odhodlaná lidská bytost a nic z výsledků tohoto programu nemůže překvapit studenta fyziky, který složil bakalářské zkoušky. Každopádně *SatOrb* nepřináší nic zásadně nového o realitě, v níž žijeme. Naproti tomu naše simulace vesmíru přinášejí nové poznatky, které jsou často v rozporu s našimi očekáváními.

Proč tomu tak je, objasním v průběhu této knihy. Nejde jen o to, jak absurdně velký vesmír je, i když i to rozhodně stojí za zamyšlení. Je obtížné si představit už to, že Země má napříč 13 000 km, natož si představit velikost Slunce, do něhož by se naše Země vešla téměř 1,3milionkrát. Slunce je přitom pouze jednou ze stovek miliard hvězd v naší domovské galaxii, Mléčné dráze, která zase je pouze jednou ze stovek miliard galaxií různých tvarů, velikostí a barev, což

všechno dohromady tvoří obrovitý obrazec, kterému říkáme kosmická síť. Simulace odhalují, jakou tyto roztočivé struktury, navzdory všem těm enormním vzdálenostem, sehrály roli při našem vzniku: jak ukážu, všechny ty formy života na bázi uhlíku na malé skalnaté planetě by nebyly vznikly, nebýt podpory těchto obřích struktur. Je to neuvěřitelné. S něčím takovým myslím není možné se vyrovnat.

Vesmír ale není pouze nesmírně velký – je rovněž nesmírně složitý. Simulace jsou nejužitečnější, když sledují pohyb miliard jednotlivých hvězd, černých děr, mračen plynu a prachových částic. Předvídat kolektivní chování takového obrovského množství aktérů bývá mimořádně obtížné a neplyne přímočaře z fyziky jednotlivých komponent.

Nápadný rozdíl mezi individuálním chováním a chováním kolektivním lze ilustrovat na životě společenského hmyzu na Zemi. Kupříkladu útoční mravenci postupují v roji a vyhledávají kolonie slabšího hmyzu, který jim pak slouží jako potrava. Ve fázi hledání potravy jeví pozoruhodnou úroveň kooperace: vlastními těly vyrovnávají terén, a dokonce vytvářejí mosty, aby překlenuli nerovnosti. Přitom nemají žádný předem stanovený plán postupu, nemají projekty na tyto mosty ani jim nikdo nevelí, kde mají svými těly vyplnit příkopy. Neexistuje žádný organizující mechanismus, ale navzdory tomu vznikají organizované struktury, které bychom nedokázali odvodit z chování jednoho izolovaného mravence.

Na první pohled je to překvapující, protože lidská společenství jsou založená na hierarchii a plánování. Když člověk vidí pohyb armády mravenců jako celek, myslí si, že v kolonii existuje nějaký velitel, který určí strategii, jak se dostat ke kořisti co nejúspěšnějším způsobem. Ale nikdo takový neexistuje. Existují jen jednotliví mravenci, kteří se

řídí jednoduchými a neměnnými pravidly, jako připojit se k mravencům, kteří tvoří most, když se na ně zezadu tlačí spousta druhů, a opustit most, když už jim nikdo po zádech nešlape.² Sofistikovanost je pouhým důsledkem velkého počtu jedinců, kteří se řídí těmito pravidly.³

Pochopit, jak se propletenec hvězd, plynů a prachu postupně vyvine v uspořádaný a organizovaný vesmír, je jednou ze základních úloh kosmologického bádání. S použitím přírodních zákonů gravitace, částicové fyziky, záření a dalších vytváříme počítačové simulace, jejichž předpovědi mohou být testovány při pozorováních noční oblohy. Protože aritmetické operace počítačů jsou rychlé a přesné, mohou počítače opakovaně aplikovat tyto jednoduché zákony na miliony nebo miliardy objektů a odhalit, jak tento pevný soubor pravidel vede posléze k novému a překvapujícímu kolektivnímu chování.

Simulace nám umožňují pozorovat, jak se chování vesmíru jako celku rodí z pozemských zákonů jeho jednotlivých komponent. Na konci knihy už budete vědět, jak radikální je tato představa popisující spleť kosmický ekosystém, na kterém závisí naše existence.

Umění simulací

Pokoušet se vytvářet v počítači celý vesmír vyžaduje značnou dávku drzosti. Problémy jsou patrné už ze samotného zadání: objasnit, jak se zkombinuje spousta nepatrných vlivů a vede k nějakému globálnímu výsledku, je prostě těžká úloha. Když simulace nesprávně započte libovolný z těchto vlivů – třeba i jen trochu nesprávně –, závěry učiněné z výpočtu mohou být naprosto mylné. Umění simulace spočívá právě v tom, popsat jednotlivé vlivy tak přesně, jak je to možné, a přitom

neztráčet ze zřetele všechny nedokonalosti, abychom své závěry formulovali s náležitou opatrností.

Taková vágnost může být překvapující. Vesmír se řídí pevnými a nespornými zákony, aspoň ve škole nám to tvrdí, a je pravda, že virtuální vesmír by v principu mohl být vytvořen přímo se zřetelem na mechanicky přesné fyzikální zákony, které byly přesně a mnohonásobně ověřeny. Vypadá to, že pro nějaké chyby tu není místo. Zákony jsou formalizovaný soubor znalostí a očekávání zapsaný precizním jazykem matematiky – perfektní materiál pro přepsání do počítačového kódu. Ale věci nejsou tak jednoduché, jak vypadají.

Vezměme si například předpovídání počasí. Meteorologové, kteří nám sdělují, jak bude zítra, zakládají svou předpověď na simulaci zemské atmosféry. Tato simulace započítává nespočetně mnoho nepatrných vlivů větru, mračen a deště, aby předpověděla budoucí chování atmosféry. Ale vítr, mraky a déšť nevystupují přímo ve fyzikálních rovnicích – v těch vystupují jednotlivé atomy a molekuly. Počasí je výsledkem vzájemné interakce 10^{44} molekul zemské atmosféry a simulace zdánlivě potřebuje znát polohu a pohyb každé z nich.

To ovšem není možné. Paměť každého počítače je konečná a může být měřena v bitech, což jsou nejmenší možné jednotky záznamu odpovídající jedné ze dvou stavů paměťové buňky: zapnuto-vypnuto. Jeden bit není příliš informativní, ale když jich máme dost, můžeme zaznamenat cokoli. Kupříkladu černobílý obraz může být zaznamenán bity na nějaké mřížce: stav zapnuto může zobrazit černý bod, vypnuto nechá bod prázdný. Číslo, písmeno, barva, zvuky, videa, facebookoví přátelé: všechno lze zapsat jako posloupnosti bitů, a čím více bitů k dispozici máte, tím přesnějšího popisu můžete dosáhnout. *XX Spectrum* mělo paměť o velikosti téměř 400 000 bitů; notebook, na němž

ted' píšu, má paměť 100 miliard bitů a některé superpočítače mají bitů víc než 10 000 bilionů.

To se pořád ani vzdáleně neblíží k tomu, aby bylo možno simulovat zemskou atmosféru na molekulární úrovni. Kdyby k popisu každé molekuly stačil i jen jeden bit, pořád by bylo nutno zvětšit paměťovou kapacitu⁴ výpočetních center 10²¹krát.

Takže předpovídání počasí nemůže být prováděno na bázi atomů a molekul a simulace, které mají vypovídat o celých galaxiích, také nemohou pracovat s těmito fundamentálními komponentami. Mají-li se data vejít do paměti počítačů, popis počasí, galaxie nebo celého vesmíru musí brát obrovská množství molekul jako jeden celek a studovat, jak se tyto celky pohybují, jak se na sebe tlačí, jak přenášejí energii, reagují na záření a tak dále, to všechno ale bez odkazování na nespočetně mnoho jednotlivých stavebních kamínků uvnitř.

Pokud je cílem napodobit v počítačích realitu, máme k tomu zoufale nedokonalé prostředky a možnosti toho, co s nimi lze dosáhnout, jsou často velice omezené. Nicméně díky tomu, že technika se za posledních padesát let neustále zlepšuje, a díky důvtipným fyzikálním trikům a zjednodušení stále početnější komunita astrofyziků takové kosmologické simulace zvládla.

Naznačím vám, jak byly tyto triky a zjednodušení vynalezeny – někdy to byly výsledky práce doktorandů, kteří museli osamoceně bojovat, aby jejich nápady došly uznání; jindy se spojily síly celé laboratoře, aby zdolaly nějaký těžký problém; a v některých případech pomohlo, že výzkum dostal prioritu v nejvyšších vládních kruzích. Některá z těchto zjednodušení jsou dobře ospravedlnitelná, kdežto jiná jsou spíše jenom dohadem. To je pak ten důvod, proč ne všemu v simulovaném vesmíru lze stoprocentně věřit.

Taková situace není vyhrazena pouze kosmologii. Lidstvo se stává postupně stále více závislé na simulacích, modelech a algoritmech, přičemž hranice mezi těmito kategoriemi je rozvolněná. Podle mě jsou algoritmy pravidla, která určí, co se má dělat: když třeba autopilot opraví kurz letadla, sociální síť rozhodne, které příspěvky se zobrazí, nebo GPS vypočte, kudy jet. V případech, kdy rozhodnutí nejsou tak přímočará, je třeba vytvořit příslušný model – popis důležitých jevů, jako je třeba letová dynamika, rozpětí lidské pozornosti nebo budoucí intenzita provozu. Když pak model obsahuje velký počet různých elementů, které se vzájemně ovlivňují, je nejlépe ho popsat jako simulaci.

Dobrým příkladem toho, jak nezřetelné jsou hranice mezi algoritmem, modelem a simulací, je finanční trh, který se nechal inspirovat teoretickou fyzikou, což sehrálo významnou roli při finančním krachu v roce 2008.⁵ Cílem modelování finančního trhu je předpověď budoucího chování akcií na základě informací, které jsou k dispozici. Detailní předpovědi tohoto typu nejsou možné, ale počátkem tohoto tisíciletí se hedgeové fondy zamilovaly do teoretických fyziků a jejich schopnosti kvalifikovaně předvídat budoucí chování systémů. S použitím několika jednoduchých předpokladů o minulém chování jednotlivých akcií vytvářeli takzvaní „kvantové“ (zkráceno z kvantitativní analytici) simulace budoucího dlouhodobého vývoje akciového trhu.⁶ Na základě těchto počítačových předpovědí pak manažeři fondů začali spekulovat s akciemi.

Ale modely a simulace nejsou kopií reality a jsou jenom tak dobré, jak dobré jsou zjednodušující předpoklady, na nichž jsou založeny. Když je burza nervózní, jednotliví akcionáři zpanikaří a začnou pochybovat o svém každém rozhodnutí. V takovém případě je velice obtížné stanovit

nějaké zákonitosti, jak se budou ceny akcií vyvíjet, a odhady, na co vsadit, můžou být fantasticky mylné. Manažeři fondů, kteří nebyli obezřetní, chovali se příliš sebejistě, příliš slepě důvěřovali předpovědím modelů nebo simulací, zjistili, že je štěstí velice rychle opouští.

Už v 60. letech matematici namítali, že předpoklady, z nichž vycházelo finanční modelování, podceňují riziko selhání trhu, jevu sice vzácného, ale zato katastrofálního.⁷ Ti opatrnější finančníci po roce 2000 si možnost kolapsu uvědomovali a brali předpovědi modelů s rezervou. Jiní ale byli oslněni počítačovými předpověďmi a v důsledku toho prodělali svým investorům obrovské sumy peněz.

Poučením není, že simulace jsou bezcenné, ale že jsou nuancované a nelze je brát doslova. Rozumět simulaci znamená být si dobře vědom jejích omezení a ty jsou dány zjednodušeními, která kvůli nesmírné složitosti reálného světa virtuální svět vyžaduje. Čím lépe rozumíme nedokonalostem simulace, tím více oceníme, co nám simulace skutečně říká.

Po finančním krachu v roce 2008 publikovali dva přední „kvantové“ Hippokratovu přísahu modelářů: „Budu mít na paměti, že jsem nestvořil tento svět a on nesplňuje moje rovnice... Nebudu lidem, kteří používají můj model, tvrdit, že je přesnější, než skutečně je. Všem jeho uživatelům po pravdě vysvětlím, v čem jsou jeho zjednodušení a nedostatky.“⁸ To je také zásada, která by měla být dodržována i v případě kosmologických simulací.

Finanční rizika spojená se simulacemi vesmíru jsou malá ve srovnání s riziky spojenými s investicí bilionů dolarů do akcií na burze. To nic nemění na tom, že i kosmologové by rádi věděli, které aspekty jejich simulací jsou směřodonné a které ne. Snažíme se vytvořit příběh stvoření, který je natolik precizní, aby jeho základě bylo možno rozumně

investovat do nových teleskopů a laboratoří; ať už jde o jakékoli částky, všechny peníze jdoucí do výzkumu fundamentální fyziky by měly být investovány chytře, aby naděje, že přispějí k novým objevům, byly maximální.

Kosmická laboratoř

V kosmických simulacích pracujeme s některými těžko uvěřitelnými prvky, které teď představím. Je dobré začít u temné energie a temné hmoty: exotických substancí, které na Zemi neznáme, které jsou neviditelné i pro ty nejdokonalejší teleskopy, a přitom to vypadá, že jsou nepostradatelné, má-li dávat historie vesmíru smysl. Bez nich by simulace nebyly schopné vesmír smysluplně popsat.

Hypotézy o těchto materiálech působí absurdně, což podstatně ztěžuje situaci. Na jednu stranu je o to důležitější předvést, jak simulace fungují, přiznat jejich omezení a zdůvodnit, proč, když se sečtou pro a proti, přesto přijímáme nehorázné závěry. Na druhou stranu, když přijmeme argumentaci zdůvodňující temnou hmotu a temnou energii, nasměrují nás ke zcela novým sférám fyziky, dosud nedotčeným laboratorními experimenty. Pro vědce není nic tak vzrušujícího jako pracovat v takovéto hraniční oblasti vědy – pohání nás naděje, že jednoho dne lidstvo pozná tajemství přírody a porozumí jim.

Simulace zkoumají také současné porozumění světu v jiném směru, týkajícím se jednoho z nejzákladnějších předpokladů vědy: že všechno, co se děje, má svůj důvod, že se jedná o řetěz po sobě jdoucích příčin a následků. Třeba v případě předpovídání počasí to znamená, že vítr, mraky, déšť, teplo a chladno se jen tak neobjeví a zase nezmizí; že se vyskytují v určitých meteorologických systémech, které se