

KONSTANTY PŘÍRODY

KOSMOLOGICKÁ KONSTANTA

Nic. Nic je bázeň vzbuzující a přitom v podstatě neuchopitelný pojem, vysoce oceňovaný autory s mystickým či existenciálním sklonem, zatímco většina ostatních jej přijímá s neklidem.

ENCYKLOPEDIE FILOZOFIE

Jak se dalo čekat, moderní kandidáti na teorii všeho se snaží říci něco o konstantách přírody a o jejich hodnotách. První kandidát, strunový obraz elementárních částic, se svým novým pojetím nejelementárnějších entit v přírodě a s objevem, jak zásadně matematická bezespornost zužuje výběr kandidátů na velkou vševládnou symetrii, nabízí závěr, že hodnoty přírodních konstant jsou už v teorii obsaženy. Musejí být nějakým rafinovaným způsobem hluboko zakopány v matematice. Bohužel doposud se nenašel žádný způsob, jak tuto informaci z teorie vytěžit. A jak jsme už viděli, bylo by takové vytěžení pouze první etapou nesnadné cesty, protože jedna věc je objevit, co teorie říká o konstantách v devíti či deseti prostorových rozměrech, a něco zcela jiného je zjistit, jak se potom tato informace přefiltruje, abychom z ní dokázali určit hodnoty konstant v našem třírozměrném světě. Další problém, jemuž se nechceme vyhnout, tkví v tom, že co vychází jako základní konstanta z teorie všeho, nemusí být vůbec totožné s jednou z veličin, jimž jsme si zvykli říkat konstanty přírody. Možná jsme poněkud vzdáleni nejhlubším konstantám přírody, protože naše cesta k pochopení fyzikálního světa vycházela z relativně nízkoenergetického prostředí, které je nutným předpokladem pro vývoj a přežití živých útvarů. Avšak moderní fyzika ve snaze najít odpovědi na naše nejhlubší otázky směřuje k stále vyšším a vyšším energiím a k prostředím nesmírně vzdáleným naší vlastní intuici a zkušenosti. Například ve strunové teorii je patrně nejzákladnější veličinou strunové napětí, a nikoliv jedna z konvenčních konstant přírody. Na první pohled bychom si mohli myslet, že taková situace znamená pouze mírné nepohodlí. Dejme tomu, že bychom uměli rozluštit proces, jímž se mnoho rozměrů dělí na tři, a ty expandují a nesmírně se zvětší, a na zbývající, které zůstávají malé, a že bychom dovedli vypočítat číselné hodnoty základních konstant teorie všeho. Co nám stojí v cestě? Abychom to pochopili, musíme si uvědomit, že není konstanta přírody jako konstanta přírody. Ačkoliv jsme se je snažili pro usnadnění výkladu směstnat do jedné přihrádky, zdá se, že některé jsou základnější než jiné. U těch nejfundamentálnějších můžeme očekávat, že budou zcela určeny jistou vnitřní logikou teorie všeho, další budou snad záviset na příspěvku speciálních proce-

sů, které probíhají ve vesmíru a mění jejich hodnoty nepředvídatelným způsobem. Teorie všeho by nám mohla zajistit, abychom se předvídaní pozorovaných konstant přírody nějak vyhnuli.

Přes tuto možnou komplikaci bychom se cítili posílení, kdyby kandidát na teorii všeho správně předpověděl aspoň jednu konstantu přírody. Donedávna se doufalo, že strunová teorie by takového kroku byla schopna a že pro testování teorie bude třeba pouze srovnat předpověď s pozorováním. V posledních letech se však vynořila konkurenční teorie (téměř) všeho, jež položila otázku, zda lze vůbec mluvit o opravdu základních konstantách, které zůstanou provždy stejné, neovlivnitelné událostmi v prostoru i v čase. K tomu rivalovi se nyní obrátíme.

Mezi všemi konstantami existuje jeden typ, který je poněkud snazší vysvětlit. Tvoří jej konstanty s nulovou hodnotou. Když v roce 1916 Einstein poprvé aplikoval svou novou teorii gravitace na vesmír jako celek, byl značně ovlivněn filozofickými předsudky minulosti, předpokládajícími existenci statického absolutního prostoru, k němuž se vztahují všechny pozorované místní pohyby. Sama myšlenka rozpínání vesmíru jako celku se tenkrát jevila jako nanejvýš podivínská a nepřijatelná. Einstein objevil, že rozpínání je přímým důsledkem jeho teorie, a proto zkoumal, jak by šlo teorii pozměnit, aby vyloučila rozpínající se (či případně smršťující se) vesmíry. Zjistil, že by to šlo jednoduše provést obohacením teorie o novou přírodní konstantu, kterou její matematický aparát nepožaduje, ale dovoluje. Tato nová konstanta, nazvaná *kosmologickou konstantou*, má za následek existenci síly dalekého dosahu působící proti síle gravitační. Mezi oběma silami může nastat rovnováha, dovolující existenci statického neměnného vesmíru. Tato rovnováha by nebyla možná, pokud by byla kosmologická konstanta z teorie vynechána. Jak se však později ukázalo, ačkoliv takový statický vesmír může skutečně teoreticky existovat v principu, nemůže se nikdy objevit v praxi, protože rovnováha mezi gravitačním přitahováním a odpuzováním ze strany kosmologické konstanty je nestabilní. Jako když postavíme pero na špičku – sebemenší impuls v jednom či druhém směru vyvolá nevratnou změnu. Kdyby byl Einsteinův statický vesmír dokonale vyvážen (což se v reálném světě nikdy nemůže stát vzhledem k proměnným fluktuacím a nehomogenitám, jakými jsme i my sami, o nichž víme, že ve vesmíru nepochybně existují), začal by se ihned buď smršťovat, nebo rozpínat. Když se takový závěr stal nepochybným, obrátil se zájem vědců, povzbuzených Hubbleovým monumentálním objevem z roku 1929, že se vesmír opravdu rozpíná, ke studiu expandujícího vesmíru.

KONSTANTY PŘÍRODY

Einsteinův statický vesmír byl mrtvě narozeným dítětem a jeho tvůrce později litoval, že pro jeho udržení zavedl kosmologickou konstantu. Nazval ji „největším omylem svého života“, neboť promeškal příležitost udělat největší vědeckou předpověď všech dob: předpověď rozpínání vesmíru. Ale kosmologická konstanta ne a ne smířit se s důstojným odchodem ze scény. Dala by se sice odbýt tím, že už není potřebná, ale nebyl vlastně žádný dobrý důvod vylučovat ji z Einsteinových rovnic. Mnozí fyzikové ji považovali pouze za jakýsi přídavek k Einsteinově nové teorii gravitace a navrhovali ji zrušit, neboť prý jí chybí protějšek v Newtonově klasické teorii gravitace. Kdybychom ji totiž ponechali, Einsteinova teorie by se už ani při velmi slabých intenzitách všech gravitačních polí a velmi malých rychlostech všech pohybů ve srovnání s rychlostí světla neredukovala na Newtonovu teorii. Namísto slavného Newtonova zákona převrácených kvadrátů, který říká, že pro gravitační sílu mezi dvěma koulemi, jejichž středy jsou ve vzájemné vzdálenosti d , platí

$$\text{síla} \propto 1/d^2, \quad (*)$$

bychom našli, že zákon síly má tvar

$$\text{síla} \propto 1/d^2 + \Lambda d, \quad (**)$$

kde Λ je kosmologická konstanta.

Je zajímavou kuriozitou, že Newton mohl k tomuto silovému zákonu dospět už před třemi stoletími. Jeden z problémů, který ho velmi zaměstnával a byl příčinou toho, že se jeho *magnum opus*, kniha *Principia*, zdržela o řadu let, spočíval v tom, že nevěděl, jak ověřit přirozeně vyhlížející předpoklad, že gravitační přitažlivost působená sférickou hmotou je táž, jakou by vyvolala stejně velká „bodová hmotnost“ soustředěná v centru. Říká se tomu „sférická vlastnost“. Newton posléze zjistil, že tento předpoklad platí pro silový zákon převrácených kvadrátů (*), což je jeho gravitační zákon, ale nikoliv pro jiné hypotetické silové zákony, jako by byl zákon převrácené třetí či čtvrté mocniny vzdálenosti.

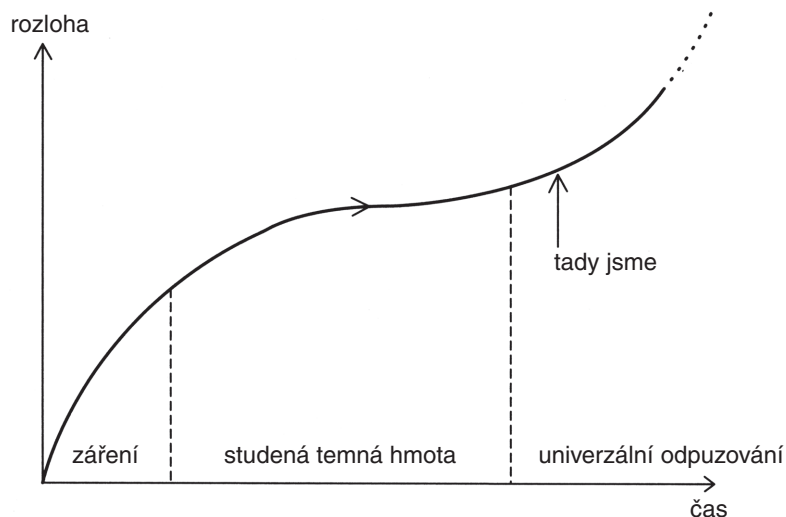
Kdyby si však Newton položil otázku, jaký je nejobecnější silový zákon, pro nějž platí sférická vlastnost, jako to později učinil francouzský matematik Pierre Simon Laplace, zjistil by, že odpovědí je zákon (**). Kdybychom tedy chtěli za základní princip newtonovské gravitace považovat sférickou vlastnost, byla by kosmologická konstanta přípustná, i když ne nezbytná, přesně jako to zjistil Einstein o základech obecné teorie relativity.

Co s kosmologickou konstantou dnes? Až asi do roku 1997 situace nebyla příliš vyhrocená. Na tehdy dosažitelné úrovni citlivosti pozorování nebyly žádné doklady pro existenci kosmologické konstanty. To znamenalo, že její číselná hodnota musela být menší než asi 10^{-55} cm^{-2} , tak malá, že většina fyziků ji opravdu pokládala za nulovou. Snad, doufali, jednou najdeme v teorii všeho nějaký prostý princip, který nám řekne, že je tomu tak.

Ale všechno dopadlo jinak. Na konci roku 1990 dvě velké skupiny astronomů užitím nových pozorovacích technik začaly nalézat doklady, že kosmologická konstanta vůbec není rovna nule. Studium vzplanutí a uhasínání velkého počtu supernov v blízkosti hranic viditelného vesmíru byly schopny probádat jeho rozpínání až do vzdáleností, kde v případě, že je Λ dosti velké, vstupuje do hry druhý člen v silovém zákonu (**). Zjistili, že v dostatečně velkých vzdálenostech rozpínání vesmíru pomalu přechází ze stavu zpomalování, daného přitažlivou gravitační silou, do stavu zrychlování daného univerzálním odpuzováním. [Nebylo by správné si myslet, že kosmologický člen převládá nad newtonovskou gravitací až ve velké vzdálenosti díky rozdílné závislosti na d . Představme si vzdálenou galaxii na povrchu koule o poloměru d . Newtonovská gravitace působící ze strany hmotného obsahu koule sice ubývá s kvadrátem poloměru, ale objem a tedy i hmotnost koule roste s jeho třetí mocninou. Newtonovské působení tedy roste úměrně d stejně jako kosmologický člen. S rozpínáním vesmíru se však hmotnost uvnitř koule o daném poloměru zmenšuje, zatímco kosmologický člen zůstává nezměněn. Proto v určitém okamžiku vesmírného vývoje převáží nad newtonovskou gravitací. Kdyby byl vesmír přesně homogenní, stalo by se to naráz v celém vesmíru bez ohledu na vzdálenost.] To je přesně takové chování, jaké se dá očekávat od kosmologické konstanty. Vypadá to, že má hodnotu asi 10^{-56} cm^{-2} a odpovídá za 72 % gravitující náplně vesmíru.

To je velmi podivná situace. Kosmologická konstanta má nepatrnou hodnotu, ale kdyby byla jen asi desetkrát větší, my bychom tu nebyli. Začala by urychlovat rozpínání vesmíru už dříve v jeho historii a učinila by nemožným, aby se formovaly hvězdy a galaxie. Rozpínání by bylo příliš rychlé, než aby se shlukovaly místní gravitační kupy. Jak to vypadá, máme co dělat s obrazem vesmíru, v němž se rozpínání začíná urychlovat v době, kdy vesmír dosáhl tří čtvrtin své dnešní hustoty (viz obr. 5.2)

Částicovní fyzikové si vyložili kosmologickou konstantu jako míru kvantové vakuové energie vesmíru. V kvantovém systému je pojem vakua poněkud odlišný od naší obvyklé představy. Není to prostě „pouhé nic“. Je to něco, co zbu-



Obr. 5.2 Změna vzdálenosti mezi dalekými místy (křivka) v rozpínajícím se vesmíru, kde kosmologická konstanta v jistém čase začne rozpínání urychlovat. Tato expanzní křivka je nejvěrohodnější obraz historie a budoucnosti našeho pozorovaného vesmíru. Vesmír prochází raným obdobím rozpínání, kdy dominovalo záření, přes období, kdy expanze je určována chladnými a temnými formami hmoty, ale když posléze vesmír nabyl tři čtvrtin své dnešní rozlohy, změnil své chování a začal své rozpínání zrychlovat.

de, když bylo ze systému odstraněno vše, co se dalo odstranit: je to stav nejnižší energie. Nemusí to odpovídat nulové energetické hladině a mohou dokonce být dva (nebo i více) stavy s touž minimální energií. Navíc se minimální energiový stav může měnit s časem, takže po nějaké době přestane být minimálním stavem a systém rychle (nebo pomalu) přejde z jednoho vakua do druhého. Takto nazíráno, malá hodnota kosmologické konstanty, kterou dnes pozorujeme, nám dává vakuovou energii vesmíru. Bohužel nám to fakticky neříká, proč má tato energie tak podivnou hodnotu. Všechny teorie částicové fyziky, které o tom mají co říci, předvídají, že její hodnota by měla být drtivě větší - většinou tak asi 10^{120} krát!

V našem pochopení vakuové energie vesmíru a kosmologické konstanty je tedy velká mezera. Ani strunová teorie na to dosud nevrhla žádné světlo. Je vskutku možné, že pro tuto hodnotu není žádné vysvětlení v běžném smyslu, jak by si je fyzikové přáli. Ukazuje se, že strunové teorie dovolují jakožto výsledek teorie všeho ohromující mnohost možných vesmírů. Řada vlastností vesmíru, které jsme zvyklí považovat za fundamentální, může mít v těchto te-

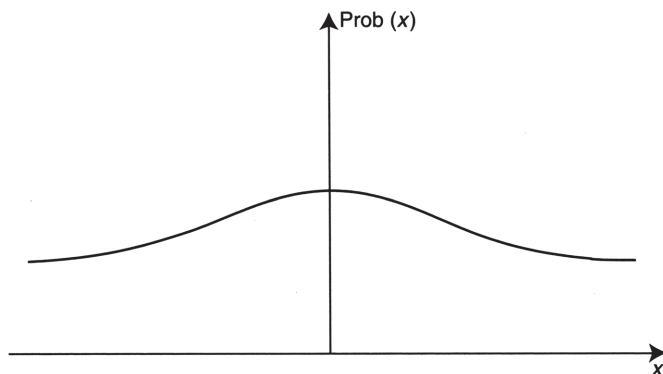
oriích nižší postavení, protože teorie všeho a z ní vyplývající zákony přírody je úplně a jednoznačně neurčují. Počet vakuových stavů, do nichž se vesmír může dostat, je patrně obrovský – jeden odhad je 10^{1500} – a každý z těchto stavů se vyznačuje odlišným souborem přírodních konstant, různou hodnotou kosmologické konstanty a různými strukturami astronomického vesmíru. Co je ještě horší, různé stavy dovolují různé počty přírodních sil a je představitelné, že i rozličný počet těch dimenzí prostoru, které se staly velkými. V podobné situaci můžeme nanejvýš doufat, že z teorie všeho vyplyne cosi jako pravděpodobnost, že vesmír si vybere nějaké konkrétní síly, přírodní konstanty a další vlastnosti. Nenajdeme žádné fundamentální vysvětlení pro pozorované veličiny, jako je kosmologická konstanta. Můžeme však určit rozsah hodnot takovéto veličiny, v němž mohou existovat vědomím obdaření „pozorovatelé“. Pochopitelně shledáme, že žijeme ve vesmíru s konstantami a vlastnostmi, jež padnou do intervalu příznivého pro život, *at' už jsou podle teorie všeho apriorně jakkoliv nepravděpodobné*. Mohli bychom být schopni určit, zda je pozorovaná vlastnost v rámci dané životu příznivé podoblasti všech možností typická nebo naopak velmi nepravděpodobná, ale jakékoliv hlubší vysvětlení bude pro nás nedosažitelné. Výsledek je, že některé důležité vlastnosti vesmíru, jako je hodnota kosmologické konstanty, mohou být náhodnými výstupy zákonů přírody a mohly by nabývat mnoha jiných hodnot slučitelných s univerzálními zákony. Nemohli bychom pak užívat teorie všeho k určení jejich pozorovaných hodnot o nic více, než jsme schopni užitím Newtonových pohybových zákonů vysvětlit, proč naše sluneční soustava obsahuje pod drahou Pluta osm planet.

Pro mnohé fyziky je to vysoce neuspokojivý, dokonce nepřijatelný závěr. Myslí si, že zákony přírody by měly nabídnout vysvětlení pro cokoliv. Bohužel vesmír nebyl konstruován pro naše pohodlí. Bylo by velmi podezřelé, kdyby všechny naše otázky po vesmíru mohly být zodpovězeny *dnes*, za použití dostupné techniky. V jiných vědách jsme se naučili nacházet druhy otázek, na něž vědecká teorie nemůže odpovědět kvůli chaotické citlivosti, vnějším vstupům informace či náhodnému porušení symetrie. Můžeme připustit stejný typ indeterminismu v našem pochopení vlastností vesmíru jako celku.

V takové situaci musíme nevyhnutelně zvážit osudové následky toho, že není žádný důvod považovat náš vesmír za „nejpravděpodobnější“, co se týče hodnot konstant přírody. Viděli jsme už přece, že naše vlastní existence a existence všech představitelných pozorovatelů je možná jen proto, že hodnoty mnoha konstant leží velmi blízko hodnotám pozorovaným. Pozměňme je pou-

KONSTANTY PŘÍRODY

ze málo, a nebudou žádní pozorovatelé. Vidíme tedy, že je nutné pozorovatelné hodnoty konstant přírody srovnávat nikoliv s nejpravděpodobnějším souborem hodnot vzniklých podle teorie všeho, ale s *nejpravděpodobnějšími hodnotami vázanými podmínkou, že dovolí budoucí existenci pozorovatelů* (viz obr. 5.3). A příslušný soubor hodnot se může podstatně lišit od nejpravděpodobnějších hodnot nepodléhajících takovému omezení. Fakt naší vlastní existence, nemluvě o kolosálním problému odhalení všech způsobů, jimiž konstanty přírody vstupují do kosmologických a biochemických podmínek nutných pro existenci nás i jiných pozorovatelů, nemůže být opomenut při interpretaci a zhodnocení předpovědí hodnot konstant přírody. Potřebujeme znát všechny konstanty přírody, jejichž hodnoty poskytují nutné podmínky pro existenci pozorovatelů. To plodí nepříjemné dilema, protože mnohé (ne-li všechny) tyto konstanty budou navzájem vázány stavbou nějaké teorie všeho. Potřebujeme úplně znát teorii, dříve než budeme moci úplně odhadnout, jaké jsou pravděpodobnosti pro vývoj složitých pozorovatelů. Určení konstant přírody se nyní jeví jako daleko větší výzva teoriím všeho, než se zdálo ve chvíli, kdy jsme tyto teorie začali hledat.



Obr. 5.3 Pravděpodobnostní rozdělení, v němž se pravděpodobnost nijak výrazně nekupí okolo nějaké speciální hodnoty. Pokud interakce červích děr předvídají, že pravděpodobnost konstanty přírody x v našem viditelném vesmíru vypadá takto, pak je nesnadné rozhodnout, zda bychom měli vzít nejpravděpodobnější hodnotu (v tomto případě nulu) jako tu, která by měla odpovídat realitě. Pokud by jistý rozsah možných hodnot x umožňoval vznik vesmírů, v nichž by se inteligentní bytosti nemohly vyvinout ani udržovat, pak by tyto hodnoty nemohly být pozorovány. Měli bychom porovnávat pozorování s pravděpodobnostmi, že konstanta nabude hodnoty x , za podmínky, že tato hodnota dovolí vývoj života, a to může být veličina velmi odlišná od nepodmíněné pravděpodobnosti, že bude dosažena hodnota x .