

P. C. W. Davies

Kvantová gravitace: sjednocený model reality?

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 31 (1986), No. 3, 144--153

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138395>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1986

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [12] J. PAVELKA: *On fuzzy logic I — Many-valued rules of inference*. Zeitschr. f. math. Logik und Grundlagen d. Math. Bd. 25 (1979), 45—52.
- [13] P. RAULEFS: *Expert systems: State of the art and future prospects*. Informatik-Fachberichte 47, GWAI-81, Springer-Verlag, 1981, 98—111.
- [14] R. REITER: *A logic for default reasoning*. Artificial Intelligence 13 (1980), 81—132.
- [15] E. H. SHORTLIFFE: *Computer-based medical consultations: MYCIN*. American Elsevier, 1976.
- [16] R. C. SCHANK, R. P. ABELSON: *Scripts, plans, goals and understanding*. John Wiley & Sons, N. York, 1977.
- [17] M. STEFIK et al.: *The organization of expert systems, a tutorial*. Artificial Intelligence, North-Holland (1982), vol. 18, no. 2, 135—173.
- [18] D. A. WATERMAN, F. HAYES-ROTH (eds): *Pattern-directed inference systems*. Academic Press, 1978.
- [19] S. M. WEISS et al.: *A model-based method for computer-aided medical decision making*. Artificial Intelligence 11 (1978), 145—172.

Kvantová gravitace: sjednocený model reality?

P. C. W. Davies

Souhrn

Kvantové aspekty gravitace nabyly v poslední době velké astrofyzikální důležitosti. Hawkingův proces vypařování černých děr, tvorba částic v raném vesmíru a nejnověji inflační scénář raného vesmíru indikují, že kvantová gravitace mohla mít dominantní vliv na utváření struktury vesmíru ve velkém měřítku. Uvedené pokroky rovněž poukazují na možnost „samostatně se vytvořivšího vesmíru“, ve kterém se prostoročas i hmota objevují spontánně v důsledku kvantových efektů. To naznačuje, že mnohé z doposud uměle zaváděných počátečních podmínek, nutných ke sladění big bangového modelu s pozorovanými fakty, přirozeně a automaticky vyplývají z kvantové fyziky při velmi vysokých energiích (GUT a Planckova energie).

Z anglického originálu P. C. W. DAVIES: „*Quantum gravity: an unified model of existence?*“, uveřejněného v Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft, Nr. 58, Hamburg 1983, str. 47—56, s laskavým svolením autora i vydavatele přeložil ZDENĚK URBAN.

© 1983 Astronomische Gesellschaft, Hamburg.

1. Úvod

Zcela konzistentní teorie kvantové gravitace doposud neexistuje. Nejvíce se snad k tomuto cíli přiblížily tzv. teorie supergravitace, které jsou neustále rozvíjeny a mohly by poskytnout konečnou odpověď (přehled kvantové gravitace viz sborníky redigované Ishamem, Penrosem a Sciamou 1975 a 1981; přehled supergravitace, superprostoru a s těmito otázkami související problematiky poskytuje sborník redigovaný Hawkingem a Ročkem 1981). Fyzikové a kosmologové zkoumající důsledky kvantové gravitace musí prozatím při absenci celistvé teorie používat buď všeobecné argumenty, nebo hledat východisko v přibližných schématech, která patrně zůstanou v platnosti i po eventuálním vytvoření celistvé teorie.

Co je kvantová gravitace? V průběhu vývoje označovala několik různých věcí. Před dvaceti pěti léty znamenala kvantování gravitačního pole popsaného Einsteinovou obecnou teorií relativity (nebo blízkou variantou této teorie). V podstatě se to považovalo za analogii kvantování elektromagnetického pole. Takto byl rozvinut slovník Feynmanových diagramů s „gravitony“, které hrají analogickou roli jako fotony. Již v tomto stadiu však byl zřejmý velký rozdíl mezi elektromagnetismem a gravitací. Protože vazbová konstanta pro gravitaci (v základě Newtonova konstanta, G) má rozměr, zatímco elektromagnetická konstanta jemné struktury α je bezrozměrná, divergentní veličiny soužící všechny kvantové teorie pole nemohly být v rámci kvantové gravitace odstraněny „renormalizací“, tak jak se to podařilo v kvantové elektrodynamice. V důsledku toho v kvantové gravitaci vzniká neomezený počet stále zhoubnějších nekonečen, což teorii činí více či méně nepoužitelnou. Tato neblahá nerenormalizovatelnost již od té doby zůstala hlavní překážkou na cestě k vytvoření životaschopné teorie kvantové gravitace.

Právě snahy o překonání mrtvého bodu nerenormalizovatelnosti způsobily určité zmatení pojmu kvantové gravitace. Někteří fyzikové pocítovali, že kořen potíží leží uvnitř obecné relativity, nebo dokonce v naší koncepci prostoročasu. Jiní viděli problém v podobě samotné kvantové teorie. Prováděly se odvážné pokusy přemodelovat jak strukturu prostoročasu, tak i kvantové fyziky prostřednictvím nové fundamentální struktury; viz např. Wheelerovu pregeometrii (Misner, Thorne a Wheeler 1973) nebo Penroseovy twistory (Penrose 1975). Z takové fundamentální struktury by pak obecná relativita i kvantová teorie měly vyplývat jako aproximace.

Teorie supergravitace se snaží rozřešit problémy kvantové gravitace rozšířením teorie, a to tak, že by se nové mohutné symetrie – supersymetrie – spojující bosony i fermiony zahrnující do jednoho popisného schématu. (Československý čtenář zajímavější se o supersymetrii a supergravitaci jistě ocení zdařilý přehledový článek J. Niederleho v Čs. čas. fyz. A, sv. 30 (1980), č. 2, str. 118–133 – pozn. překl.) Gravitony jsou tak provázány dalšími částicemi, jako jsou fermionická (spin $3/2$) „gravitina“ a všechny tyto další částice jsou zároveň zahrnuty do multipletů podle módy částicových multipletů ve fyzice hadronů. To má výhodu, že – zhruba řečeno – nekonečna fermionického pole vstupují do hry s opačnými znaménky a ruší (nebo alespoň zmírňují) bosonická nekonečna např. gravitonů. Ve své nejobecnější formě je supergravitace zamýšlena jako teorie zahrnující veškeré subatomární částice a sjednocující všechny síly v přírodě.

Problémy kvantové gravitace interpretuje tedy supergravitace jako důsledek snah uměle izolovat obecnou relativitu od celého rozsahu gravitačních a negravitačních sil a polí.

Pojmu kvantová gravitace byl též přisuzován význam „kvantových efektů gravitace“. Při tomto decentnějším přístupu nešlo vůbec o snahu skutečně kvantovat gravitační pole jako takové. Namísto toho je gravitace brána jako pole představující klasické pozadí a zároveň se vyšetřuje chování jiných kvantových polí, která se na tomto pozadí šíří. Ačkoliv jde pouze o „semiklasickou“ teorii, tento přístup měl mnoho úspěchů; z nich nikoliv nejmenším je Hawkingova předpověď tepelného vyzařování z černých děr vedoucího k jejich pomalému vypaření. Pokud je to nutné, do teorie může být naroubován příspěvek v podobě gravitonu, a to ad hoc, nicméně důležité gravitační efekty vznikají v důsledku působení pole pozadí. Podobný přístup se často označuje jako kvantová teorie pole v zakřiveném prostoročase a je předmětem nedávno publikované knížky Birrella a autora této stati (Birrell a Davies 1982) (český překlad jednoho ze starších Daviesových článků věnovaných kvantové teorii pole v zakřiveném prostoročase může čtenář nalézt v Kosmických rozhledech – časopisu Čs. astronomické společnosti při ČSAV – ročník 1977, č. 3, str. 93–103 – pozn. překl.).

2. Semiklasická teorie

Detailně byly studovány dva důsledky semiklasické teorie. Prvním je tvorba částic gravitačním polem. Tento proces tvoří základ Hawkingova efektu, důležitý je však i pro kosmologii raného vesmíru. Druhým důsledkem je indukce energie a tlaku vakua (striktně tenzoru energie a hybnosti $T_{\mu\nu}$) zakřivením prostoročasu. To je zajímavé z hlediska uvažování zpětné reakce kvantových polí na (klasickou) gravitační dynamiku. Detailní popis těchto záležitostí může čtenář nalézt v již zmíněné knížce Birrella a Daviese (1982), kde jsou též uvedeny odkazy na dřívější práce.

Tvorba částic gravitačním polem může být heuristicky takto pochopena: Gravitace je vázána k ostatním polím v přírodě, např. k elektromagnetickému poli, takže když se gravitační pole mění, jeho energie přechází do jiných polí, což vede k tvorbě částic, např. fotonů. Frekvence takto vytvořeného typického fotonu bude řádově úměrná rozsahu změny gravitačního pole. Objevení se nových částic lze vysvětlovat jako excitaci kvantové energie vakua, stejně jako můžeme prudkým narušením elastického materiálu vytvořit fonony.

V případě Hawkingova efektu vyzařování z černých děr je výše uvedená představa méně názorná, poněvadž gravitační pole mimo díry je statické (podstatná časová závislost nastává v průběhu fáze kolapsu). Lepší obraz poskytne analogie s rozpadem vakua v blízkosti supernabitého jádra. Pokud bodové jádro nese elektrický náboj hodnotou přesahující 173, stává se vakuum v okolí jádra nestabilním vůči rozpadu na elektron-pozitronové páry (Fulcher, Rafelski a Klein 1979). Příčinou je skutečnost, že elektrické pole je v tomto případě tak intenzivní, že změna potenciální energie v důsledku objevení se nabitého páru odráží klidovou hmotu – energii páru, takže tvorba párů je energeticky favorizována. U Hawkingova efektu intenzivní gravitační pole v blízkosti mikroskopické černé díry rovněž způsobuje rozpad vakua prostřednictvím tvorby párů;

protože však gravitace se váže ke všem částicím, nemusí být vytvořený pár částic elektricky nabitý.

K určení množství a spektra vytvořených částic lze provést určité výpočty. Kromě Hawkingova výsledku pro černé díry (Hawking 1975), kde se ukázalo, že částice mají přesně tepelné spektrum, bylo důležité vyšetřování několik kosmologických modelů; hlavní práci provedli Parker (1969), Audretsch, Schäfer a Dehnen (Audretsch a Schäfer 1978a, b; Schäfer a Dehnen 1977). Tyto přesně řešitelné modely velice napomohly vybudování obrazu mechanismu tvorby částic. Hlavní myšlenkou je, že rozsah tvorby částic, který je v současné epoše velmi malý, měl být v průběhu prvotních fází vesmíru velmi výrazný.

Druhou oblastí aplikace semiklasické teorie jsou efekty energie vakua. Nejnižší energetický stav (stav vakua) kvantové teorie pole není zcela bez aktivity. Energie nulového bodu různých modů pole dodává stavu vakua určitou strukturu a aktivitu, které jsou narušovány při vnoření vakua do zakřiveného prostoročasu (gravitační pole). Takto produkovaná změna tenzoru energie a hybnosti bude sama měnit gravitační pole prostřednictvím semiklasické Einsteinovy rovnice

$$(1) \quad G_{\mu\nu} = -8\pi G \langle T_{\mu\nu} \rangle,$$

kde $c = 1$ a $\langle T_{\mu\nu} \rangle$ je kvantová pravděpodobnostní hodnota operátoru tenzoru energie a hybnosti $T_{\mu\nu}$. Tato veličina může mít několik podivných vlastností. Může mít např. negativní energii nebo negativní tlak (Birrell a Davies 1982, kap. 6). Takové okolnosti narušují tzv. energetické podmínky, na kterých jsou založeny Hawkingovy-Penroseovy teorémy o singularitách (viz např. Hawking a Ellis 1973) a mohly by tak teorii zbavit singularit v důsledku kvantových efektů.

Očekává se, že semiklasická teorie bude dobrým přiblížením v oblasti vzdálené od tzv. Planckova režimu. Tento režim je definován přirozenou délkovou škálou vytvořenou z fundamentálních konstant G , \hbar , c . Lze najít:

$$\begin{aligned} \text{Planckova délka} &= (G\hbar/c^3)^{1/2} \simeq 10^{-35} \text{ m}, \\ \text{Planckův čas} &= (G\hbar/c^5)^{1/2} \simeq 10^{-43} \text{ s}, \\ \text{Planckova hmotnost} &= (\hbar c/G)^{1/2} \simeq 10^{-8} \text{ kg} \simeq 10^{19} \text{ GeV}, \\ \text{Planckova teplota} &= (\hbar c^5/G)^{1/2}/k \simeq 10^{32} \text{ K}. \end{aligned}$$

V Planckově režimu budou kvantově gravitační efekty vyvolávat dalekosáhlé modifikace v geometrické a snad i v topologické struktuře prostoročasu a budou tak zároveň vytvářet to, co se někdy označuje jako „prostoročasová pěna“ nebo „červí díry“ anebo konečně jako „virtuální černé díry“ o Planckově hmotnosti.

3. Inflační scénář raného vesmíru

Doposud byla tato diskuse omezena na předmět volných kvantových polí šířících se na pozadí gravitačního pole. Když však uvažujeme i negravitační interakce, objevují se nové efekty, třebaže se tím subjekt podstatně komplikuje. Objevují se také nové sporné

otázky, např. zdali teorie pole, která je renormalizovatelná v plochem prostoročase, zůstává renormalizovatelnou i v zakřiveném prostoročase.

Interakce pole mohou značně modifikovat rozsah tvorby částic. Mohou též produkovat další členy v Lagrangeově funkci teorie, které imitují gravitaci. Moderní přístup k sjednoceným kalibračním teoriím pole (GUTs = Grand Unified Theories – pozn. překl.) využívá např. samovázané (self-coupled) skalární pole ϕ (Higgsovo pole), které do Lagrangeovy funkce přispívá členy tvaru

$$(2) \quad -1/2\mu^2\phi^2 + 1/4\lambda\phi^4,$$

kde μ^2 je člen hmoty a $\lambda > 0$ je konstanta samovazby (self-coupling constant). Toto pole je nestabilní vůči spontánnímu narušení symetrie, kdy ϕ získává nenulovou pravděpodobnostní hodnotu

$$\langle \phi \rangle \equiv \sigma = \mu/\lambda^{1/2} = \text{konstanta}$$

(přehled problematiky viz Kirzhnits a Linde 1976). Je to právě toto narušení symetrie, které dodává hmotnost kalibračním částicím. Narušení symetrie má důležité gravitační efekty, protože přesouvá efektivní nulu z ϕ k σ . Připustíme-li možnost excitací ϕ kolem tohoto nového (stabilního) stavu $\tilde{\phi}$, získáváme $\phi \rightarrow \sigma + \tilde{\phi}$. Toto přemístění v Lagrangeově funkci zavádí člen úměrný σ , který je konstantou. Jak rozpoznal již Einstein v roce 1917 (Einstein 1917), konstantní člen v Lagrangeově funkci zavádí gravitační *odpuzování* ve formě slavné kosmologické konstanty. Spontánní narušení symetrie Higgsova pole v kalibrační teorii pole tak generuje kosmologickou konstantu Λ .

Hodnota konstanty musí být určena pozorováním, protože nemůžeme znát její „houlou“ hodnotu před narušením symetrie. Pozorování naznačují, že hodnota Λ je zanedbatelně malá. Je zde však jedna maličkost. Lagrangeova funkce (2) platí pouze pro nulovou teplotu. V raném vesmíru se však teplota mohla blížit i přesahovat tzv. GUT-teplotu (10^{28} K). Teplotně závislé členy v (2) konkurují μ^2 a jeví tendenci potlačovat narušení symetrie. Nad GUT-teplotou, kolem 10^{-35} s big bangu, by tak stav $\langle \phi \rangle = 0$ byl stabilní a symetrie Higgsova pole by nebyla narušena (Kirzhnits a Linde 1976).

V případě jak $\langle \phi \rangle = \sigma$, tak i $\langle \phi \rangle = 0$ jde o stavy „vakua“ v tom smyslu, že tyto stavy neobsahují částice a oba jsou charakterizovány symetriemi vakua. První stav je obvykle označován jako falešné vakuum, protože se při nízké teplotě může rozpadat na další „skutečné“ vakuum – pravděpodobně to, které dnes pozorujeme. Mezi těmito dvěma stavy je kolosální rozdíl v hodnotě Λ . Pokud $A_{\text{skutečné}} \simeq 0$, pak $A_{\text{falešné}}$ mohla být 10^{100} krát větší než $A_{\text{skutečné}}$! Za těchto okolností mohla Λ dočasně mít dominující vliv na gravitační dynamiku. To je výchozí bod tzv. scénáře inflačního vesmíru předloženého Guthem (1981) a v poněkud odlišné formě rozpracovaného Lindem (1982), Hawkingem a Mossem (1982) a Albrechtem a Steinhardtem (1982).

V krátkosti se inflační scénář rozvíjí takto: Na počátku byl vesmír ve stavu falešného vakua s velkou hodnotou Λ a nenarušenou symetrií ϕ . Při ochlazování vesmíru Λ začala dominovat v kosmologické dynamice, což vyvolalo vstup vesmíru do fáze prudké exponenciální expanze. Po krátký okamžik vesmír připomínal část de Sitterova prostoru s (Hubbleova konstanta) $^{-1} \sim 10^{-35}$ s (čas GUT). V průběhu této fáze se velikost typické oblasti prostoru rozepnula $\sim e^N$ krát. Pokud $N \gtrsim 60$, tato expanze mohla zvětšit Planckův objem na kosmické rozměry.

Teplota přitom exponenciálně klesá do blízkosti absolutní nuly, což energeticky favorizuje přechod z vakua falešného do skutečného. K tomuto přechodu však nemuselo dojít náhle. Guth poznamenal, že perioda superochlazování, dlouhá snad až desítky e -časů, mohla způsobit jakési „zavěšení“ vesmíru ve stavu falešného vakua udržujícího si obrovskou hodnotu Λ . Alternativně mohlo být falešné vakuum stabilizováno slabou potenciální bariérou, kterou bylo nutno před přechodem do skutečného vakua překonat nějakou analogií tunelového efektu. Kromě toho pokud je křivka potenciálu spojující stavy falešného a skutečného vakua na svém vrcholu velmi mělká, může čas rozpadu mezi oběma stavy činit mnoho e -časů, protože systém musí „sklouznout“ po dlouhém spádu potenciálu do „údolí“ reprezentujícího skutečné vakuum. Tento rozvinutější model je označován jako tzv. „nový inflační scénář“ Hawkinga a Mosse (1982) a Albrechta a Steinhardta (1982).

Když je skutečné vakuum eventuálně dosaženo, exponenciální expanze se zastavuje a obrovská energie expanze (reprezentovaná hustotou energie související s Λ) je termalizována, což může vést ke tvorbě hmoty, z které se skládají galaxie. Tato termalizace zvyšuje teplotu opět na úroveň GUT. Od tohoto bodu se již obvyklou cestou rozvíjí konvenční scénář horkého big bangu.

Období exponenciální expanze však zanechává dramatický otisk v následné struktuře vesmíru. Za prvé, jakékoliv prvotní nepravidelnosti, jako např. nehomogenity nebo anizotropie, jsou „roztaženy k smrti“ obrovským rozepnutím vesmíru. Z tohoto procesu vystupuje vesmír jako vysoce uniformní. Za druhé, dynamické charakteristiky de Sitterova prostoru jsou takové, že na konci inflační fáze je vesmír charakterizován hustotou energie blížící se hustotě kritické (Einsteinův-de Sitterův model), při které jsou sekce prostoru ploché ($k = 0$). Je to hustota, při které je gravitační síla vesmíru přesně vyrovnána se silou jeho expanze, což se, jak známo, blíží pozorované situaci. Za třetí, pozice kosmologického horizontu částice je posunuta o mnoho řádů dozadu za jeho zdánlivou pozici založenou na současné rychlosti expanze. Za čtvrté, hustota prvotních magnetických monopolů, které by podle GUTs měly být ve vesmíru velmi hojné, je redukována na zanedbatelnou hodnotu.

Inflace tak jednou ranou řeší několik záhad moderní kosmologie: Proč je vesmír ve velkém měřítku tak neuvěřitelně uniformní? Proč je pozorovaná hustota hmoty tak blízká kritické hustotě? Proč jsou oblasti vesmíru nacházející se vzhledem k Zemi v protilehlých směrech tak podobné, ačkoliv jsou podle klasické teorie odděleny částicovým horizontem? Proč vesmír není přeplněn magnetickými monopóly? Tyto nápadné charakteristiky našeho vesmíru z inflačního scénáře vyplývají přirozeně a automaticky. Inflace může navíc pojmout i existenci galaxií. „Převalení“ od falešného ke skutečnému vakuu nenastane všude stejně rychle. V závěrečném stavu se budou všude vyskytovat fluktuaace vedoucí k hustotním kontrastům, které mohou být principiálně odvozeny z detailů kvantové fyziky vysokých energií. Doposud zde vládnu určitě rozpory týkající se možných odhadů (Hawking a Moss 1983; Vilenkin 1983a), avšak hodnota slučitelná s následným růstem galaxií není nepravděpodobná.

Scénář inflačního vesmíru též poukazuje na velmi kuriózní a dalekosáhlou možnost: že antigravitace mohla být, pokud jde o určení tvaru vesmíru, mnohem důležitější než gravitace. Tato antigravitace je generována efekty kvantového pole při velmi vysokých

energiích a zároveň je nutno ji uvažovat jako nejdůležitější doposud známý proces kvantové gravitace. (Další práce indikují, že inflace v Planckově éře — snad generovaná efekty supergravitace — může být ještě úspěšnějším přístupem. Inflace v éře GUT doposud využívá gravitaci jako pole pozadí, ačkoliv nenulové zakřivení prostoročasu v detailech zdaleka nehraje pouze triviální roli.)

Ať je již současný obraz inflace správný, či ne, scénář měl a doposud má nejdůležitější vliv na filozofii kosmologie. Od samotných počátků teorie big bangu bylo nutné do této teorie „ručně“ zabudovávat většinu pozorovaných vlastností vesmíru — entropii připadající na jeden baryon, velikostní měřítko galaxií, rychlost expanze, uniformní rozložení hmoty a energie, izotropii expanze atd. Nyní se jeví, že mnohé, ne-li všechny, tyto vlastnosti mohou automaticky vznikat jako přirozený důsledek inflace. Protože inflační fáze „vymazává“ detaily předtím existujícího vesmíru, otázka počátečních podmínek je v tomto kontextu irelevantní — dokonce bezúčelná. Struktura vesmíru není produkována počátečními podmínkami, ale *zákony* fyziky vysokých energií — konkrétně, zákony kvantové gravitace.

4. Je vesmír kvantovým jevem?

Vznik vesmíru je nejzákladnější otázka přírodních věd. Mnozí vědci dokonce trvají na tom, že celá sporná otázka leží mimo oblasti vědeckého zkoumání. Vskutku, dokonce i v éře teorie big bangu se kosmologové spokojili s odesláním otázky, co způsobilo big bang spíše do říše metafyziky než fyziky. Tento přístup byl po objevu prostoročasových singularit ještě posílen.

Hawkingovy a Penroseovy teorémy o singularitách naznačují, že prvotní vesmír vznikl erupcí ze stavu nekonečné hustoty, za který není možné rozšířit fyziku a dokonce ani koncepci prostoročasu. V rámci tohoto obrazu big bang představuje náhlé „zjevení“, a to nejen hmoty, ale také prostoročasu. Singularita je považována za okraj, resp. hranici prostoročasu, takže otázka co *způsobilo* big bang, resp. co bylo předtím, je v těchto souvislostech nesmyslná. Nebylo žádné „předtím“; s big bangem započal i samotný čas. Sama big bangová singularita není jevem, protože není bodem prostoročasu. Namísto toho je hranicí prostoročasu. Protože veškerá fyzika zde selhává, singularita nepatří k fyzikálnímu vesmíru; představuje jakési interface mezi naturálním a supernaturálním. Protože v singularitě veškerá fyzika selhává, singularita je zcela nepředpověditelná. Co vychází z takové „věci“, není určeno žádnou prvotní fyzikální okolností. V tomto duchu tak kosmologové prohlašovali vynoření se vesmíru ze singularity za jev bez jakékoliv fyzikální příčiny či fyzikálního objasnění; za jev mimo dosah racionálního zkoumání.

V rámci subjektu kvantové kosmologie se otázka kosmogeneze ocitla ve zcela novém světle. Kvantová kosmologie je větví kvantové gravitace, ve které gravitační pole zahrnuje celý vesmír. Zdaleka nejde o dobře definovaný subjekt. K nejasnostem obklopujícím předmět kvantové gravitace zde navíc přistupuje hluboká filozofická potíž vysvětlit, co vlastně znamená kvantový popis veškeré reality — celého vesmíru. Ústředním bodem interpretace kvantové teorie je akt měření. Podle tzv. kodaňské interpretace měření

musí být provedeno určitým druhem vnějšího klasického zařízení nebo pozorovatelem, protože však kvantový systém zahrnuje všechny věci, žádný vnější „pozorovatel“ kolapsu kosmické vlnové funkce nemůže existovat. (Populární přehled viz knížku Daviese 1981.)

Navzdory těmto potížím stále ještě můžeme zkoumat důsledky toho, co se jeví v rámci i těch nejružnějších přístupů jako podstata kvantové fyziky – nepředpovídatelnosti. Studium kvantových jevů nás seznámilo s pojmem, že jev nemusí mít žádnou dobře definovanou příčinu. Symbolem této vlastnosti kvantových systémů je jev tvorby částic v silných elektromagnetických nebo gravitačních polích. Vnější pole jsou nutná pro tvorbu částic, nepředstavují však dostatečnou podmínku. Částice prostě nepředvídatelným způsobem vylétají odnikud. Pokud zákony kvantové fyziky dovolují částicím hmoty, tj. kvantům negravitačních polí, vznikat spontánně a nezapříčiněně, nemohly by rovněž připustit spontánní a nezapříčiněné zrození prostoročasu? Prostoročas je konec konců určitým kvantovým stavem gravitačního pole. Mohli bychom snad uvažovat o zákonech kvantové fyziky existujících nějakým způsobem „nad“ nebo „za“ fyzikálním vesmírem (podobně jako zákony aritmetiky stojí mimo fyzikální vesmír), o zákonech, které připouštějí, aby vesmír vznikl, nebo jej dokonce nutí vzniknout? Wheeler svého času psal o fundamentálních zákonech fyziky v tom smyslu, že „musí poskytnout vesmíru způsob, jak vzniknout“ (Patton a Wheeler 1975).

Nedávno se celá řada autorů pokusila vlít čerstvou krev do hrubé kostry této úžasné myšlenky. V nejjednodušší verzi nejde vůbec o snahu nalézt vznik samotného prostoročasu, který se uvažuje jako daný, ale existence hmoty je považována za kvantovou fluktuaci stavu vakua. Podobná formulace byla diskutována Tryonem (1973), Atkatzem a Pagelsem (1982) a Broutem, Englertem a Gunzigem (1978). Je možné tvrdit, že všechna zachovávací se kvantová čísla vesmíru jsou nulová, což v podstatě odpovídá vakuu. Tryon předpokládá, že na počátku byl jednoduše prázdný Minkowského prostor.

Ambicióznější modely se snaží popsat vznik prostoročasu a hmoty jako jediný kvantový jev. Vilenkin (1983b) například diskutoval náhlé objevení se vesmíru v kontextu tunelového procesu instantonového typu. Podobné myšlenky předložili i Zeldovich (1981), Grischuk a Zeldovich (1982) a Gott (1982). Ve všech těchto modelech se zdá být nepravděpodobné očekávat, že kvantová gravitace bude indukovat spontánní objevení se vesmíru o Hubblových rozměrech. Pravděpodobnější je, že nově utvořený „zárodečný vesmír“ (embryo cosmos) bude mít Planckovy proporce. Dalším krokem je to, co autor této stati nazývá „problémem povýšení“ na vesmír o plných rozměrech. Zde přichází vysvobození v podobě inflace. Když už jednou vesmír pod vládou Λ je, pak se pomocí inflace může rychle rozepnout na Hubblovu velikost. Bizarní vlastností antigravitace poháněné kosmologickou konstantou je, že Λ -člen v rovnicích pole, pokud je převeden na pravou stranu

$$(3) \quad G_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}, \quad \Lambda = \text{konstanta}$$

se chová jako homogenní tekutina se stavovou rovnicí $p = -\rho$, tj. tlak je negativní.

Nyní se nám v Robertsonových-Walkerových kosmologických modelech s měřítkovým faktorem $a(t)$ objevuje možnost pomocí Einsteinových rovnic nalézt globální zákon zachování energie (energie však v obecné relativitě ve všeobecnosti není dobře definována):

$$(4) \quad d(\rho a^3) + p da^3 = 0$$

nebo

$$(5) \quad dE + p dV = 0.$$

Zhruba řečeno, energie objemu a^3 se s expanzí vesmíru mění přesně podle množství práce vykonané tlakem p při vzrůstu objemu – stejně jako v laboratorní fyzice. Rovnice (5) se však komplikuje, pokud uvážíme možnost negativního tlaku, protože v tomto případě celková energie v objemu $a^3(t)$ expandujícím spolu s vesmírem ve skutečnosti roste. Materiál při své expanzi koná „negativní práci“. V případě Λ -členu $p = -\rho$ a řešení rovnice (5) poskytuje $\rho = \text{konstantní}$, tj. *hustota* energie se s expanzí nemění, zatímco celková energie v objemu a^3 roste. Expanze vesmíru je tak odpovědná za tvorbu energie.

Ve fyzice se vyskytuje široce rozšířený princip známý jako Lenzův zákon. Tento zákon určuje, že fyzikální efekt působí zpětně na svůj zdroj tak, že redukuje sklon zdroje k projevování tohoto efektu. Tímto způsobem vesmír zůstává stabilní. Gravitace – nebo spíše, na tomto místě, antigravitace – je výjimkou. Obvyklá gravitace je nestabilní vůči implozi; když už jednou určitá oblast látky začne kolabovat v důsledku vlivu gravitace, gravitační síla se spíše zesiluje než zeslabuje a jev se urychluje. Podobně antigravitace produkovaná Λ je nestabilní, poněvadž negativní tlak, i když vedl ke generaci energie výše uvedeným způsobem, resp. mechanismem, rovněž vytvořil vše-zahrnující obrovské gravitační odpuzování, které pokračuje v pohánění prudké kosmologické expanze. Kosmologická konstanta Λ tak nutí vesmír expandovat a současně je příčinou vzniku energie při této expanzi. Antigravitace je tedy pro přírodu jakousi „zázračnou nádobou“ neomezené volné energie.

Inflace tímto způsobem generuje energii potřebnou k vytvoření vesmíru – materiál galaxií, záření, pohyb – a toto všechno bez jakéhokoliv počátečního vstupu energie. Nepatrné kvantové smítko o Planckových rozměrech se tak může v důsledku působení antigravitační nestability rozepnout na celý kosmos bohatý na energii i strukturu. Zdá se, že konečně máme v rukou nástin sjednocené teorie umožňující objasnit vznik veškeré reality. Je otázkou budoucnosti, zdali se detaily tohoto nástinu ukáží být z hlediska vytváření celistvého obrazu světa stejně uspokojivými nebo ne – , avšak zcela jistě budou mít velký vliv na naši perspektivu vesmíru.

Literatura

- [1] ALBRECHT, A., STEINHARDT, P. J.: Phys. Rev. Lett. 48 (1982), 1220.
- [2] ATKATZ, D., PAGELS, H.: Phys. Rev. D 25, 2065.
- [3] AUDRETSCH, J., SCHÄFER, G.: Phys. Lett. 66A (1978a), 459.
- [4] AUDRETSCH, J., SCHÄFER, G.: J. Phys. A, 11 (1978b), 1583.
- [5] BIRRELL, N. D., DAVIES, P. C. W.: *Quantum Fields in Curved Space*. Cambridge University Press, 1982.
- [6] BROUT, R., ENGLERT, F., GUNZIG, E.: Ann. Phys. (N. Y.) 115 (1978), 78.
- [7] DAVIES, P. C. W.: *Other Worlds, Dent, Mehrfachwelten*. Diederichs, 1981.
- [8] EINSTEIN, A.: Sitz. Preuss. Akad. Wiss. 142 (1917).
- [9] FULCHER, L. P., RAFELSKI, J., KLEIN, A.: *The Decay of the Vacuum*, Sci. Amer. 1979 (Dec.), p. 120.

- [10] GOTT, J. R.: *Nature* 295 (1982), 304.
- [11] GRISCHUK, L. P., ZELDOVICH, YA. B.: *Complete cosmological theories*, in: *The Quantum Theory of Space and Time*, M. J. DUFF and C. J. ISHAM (eds.), Cambridge University Press, 1982.
- [12] GUTH, A. H.: *Phys. Rev. D* 23 (1981), 347.
- [13] HAWKING, S. W.: *Comm. Math. Phys.* 43 (1975), 199.
- [14] HAWKING, S. W., ELLIS, G. F. R.: *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, 1973.
- [15] HAWKING, S. W., MOSS, I. G.: *Phys. Lett.* 110B (1982), 35.
- [16] HAWKING, S. W., MOSS, I. G.: *Fluctuations in the inflationary universe*. University of Newcastle, preprint 1983.
- [17] HAWKING, S. W., ROČEK, M. (eds.): *Superspace and Supergravity*. Cambridge University Press, 1981.
- [18] ISHAM, C. J., PENROSE, R., SCIAMA, D. W. (eds.): *Quantum Gravity. An Oxford Symposium*. Oxford, Clarendon Press, 1975.
- [19] ISHAM, C. J., PENROSE, R., SCIAMA, D. W. (eds.): 1981, *Quantum Gravity II. A Second Oxford Symposium*. Oxford, Clarendon Press, 1981.
- [20] KIRZHNITS, D. A., LINDE, A. D.: *Ann. Phys. (N. Y.)* 101 (1976), 195.
- [21] LINDE, A. D.: *Phys. Lett.* 108B (1982), 389.
- [22] MISNER, C. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A.: 1973, *Gravitation, chapter 44*. Freeman 1973.
- [23] PARKER, L.: *Phys. Rev.* 183 (1969), 1057.
- [24] PATTON, G. M., WHEELER, J. A.: 1975, *Is physics legislated by cosmology?*, in: *Quantum Gravity. An Oxford Symposium*. C. J. ISHAM, R. PENROSE and D. W. SCIAMA (eds.), Oxford, Clarendon Press, 1975.
- [25] PENROSE, R.: *Twistor theory, its aims and achievements*, in: *Quantum Gravity. An Oxford Symposium*. C. J. ISHAM, R. PENROSE and D. W. SCIAMA (eds.), Oxford, Clarendon Press, 1975.
- [26] SCHÄFER, G., DEHNEN, H.: *Astron. Astrophys.* 54 (1977), 823.
- [27] TRYON, E. P.: *Nature* 246 (1973), 396.
- [28] VILENKIN, A.: *Fluctuations in the inflationary universe*. Tufts University preprint, 1983a.
- [29] VILENKIN, A.: *The birth of inflationary universes*. Tufts University preprint = *Phys. Rev. D* 27 (1983b), 2848.
- [30] ZELDOVICH, YA. B.: 1981, *Soviet Astronomy Lett.* 7 (1981), 579.

Je zvláštní, že jen neobyčejní lidé dělají objevy, které se pak zdají tak snadné a jednoduché. To předpokládá, že k vyzorování nejjednodušších, ale pravdivých vztahů mezi věcmi je potřeba mít velice hluboké znalosti.

Není větší překážky pokroku ve vědách než touha pocítit v nich úspěch příliš brzy. To je obzvlášť příznačné pro živé povahy. Proto také nejčastěji málo vykonají. Povolí totiž a ztratí odvahu, jakmile zpozorují, že nedělají pokroky. Ale dělali by pokroky, kdyby vynakládali málo síly a mnoho času.

Alespoň jednou o všem zapochybuji, i kdyby to byla věta: dvakrát dvě jsou čtyři.

Není to zvláštní, že se nejvyšších čestných úradů na světě (jako je král) dosahuje beze zkoušky, která se požaduje na každém městském fyzikovi?

Mnozí lidé vědí všechno tak, jako známe hádanku, jejíž rozluštění jsme si přečetli nebo nám je někdo řekl, a to je ten nejhorší způsob vědění, který by si člověk měl osvojovat co nejméně. Měl by se spíš snažit získat takové znalosti, které mu umožní, aby v nutném případě sám odhalil mnohé, co si jiní musejí přechíst nebo poslechnout, aby se to dověděli.

Nejnebezpečnější nepravdy jsou pravdy mírně překroucené.