

Vladimír Wagner

Je kosmologie mytologií? aneb úvaha experimentálního fyzika o kosmologických hypotézách a modelech

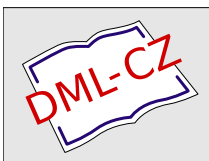
*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 48 (2003), No. 3, 193--206

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141179>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2003

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>

# Je kosmologie mytologií?

## aneb úvaha experimentálního fyzika o kosmologických hypotézách a modelech

Vladimír Wagner, Řež

*Ne, otázkou není, zda jeden či druhý nápad nebo co je na daném nápadu přitažlivého. Otázkou je dostat co nejvíce různých nápadů a dovést je tam, kde rozhodne experiment.*

*Jediné, co mě zajímá, je najít soubor pravidel, která by souhlasila s chováním přírody, a nezkoušet jít příliš daleko za to. Zjistil jsem, že většina filozofických diskusí je psychologicky užitečná, ale nakonec, když se podíváte zpátky do historie, zjistíte, že to, co bylo kdysi řečeno s takovou pádností, je téměř vždy — do jisté míry — nesmyslné!*

R. FEYNMAN v rozhovoru v knize P. DAVIESE a J. BROWNA  
*Superstrings: A Theory of Everything?*

V poslední době se objevila řada nových kosmologických hypotéz. Mezi ně patří hypotéza ekpyrotického<sup>1)</sup> vesmíru, jak ji navrhl například N. Turok [1], která je populárně prezentována v [2]. O kosmologii se zajímám a snažím se aspoň trochu její vývoj sledovat, a tak jsem si dovolil napsat následující úvahu o kosmologických hypotézách a modelech z pohledu experimentálního fyzika. Nejsem však ani kosmolog, ani expert na obecnou teorii relativity či dokonce různé modely kvantové gravitace. Jako experimentální fyzik se zabývám studiem velmi horkých a hustých stavů hadronové hmoty. Znalost jejich vlastností je sice důležitá pro poznání počátečních stadií vývoje vesmíru, ale je jen malým kamínkem v příslušné pestrobarevné mozaice. Jisté existuje řada povolanejších, kteří by tuto problematiku popsali lépe a asi u mě najdou řadu nepřesností. Budu tedy rád, když můj příspěvek budete považovat spíše za námět k zamyšlení a diskusi.

### Hypotéza, model, teorie

Připomeňme, že to, čím se věda zabývá a co vytváří, je popis reálného světa a nikoliv reálný svět samotný. Podle stupně přesnosti a spolehlivosti si dovoluji popis rozdělit

---

<sup>1)</sup> Slovo ekpyrotický je odvozeno od řeckého slova *ekpyrosis*, které vyjadřuje prudké vzplanutí — oheň.

---

RNDr. VLADIMÍR WAGNER, CSc. (1960), Ústav jaderné fyziky AV ČR, 250 68 Řež, e-mail: [wagner@ujf.cas.cz](mailto:wagner@ujf.cas.cz), <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/>

Článek vznikl přepracováním a rozšířením autorovy práce pro časopis Kozmos č. 1 (2003) se souhlasem jeho redakce.

na tři stupně: hypotézu, model a teorii. Hypotéza je návrh, jaké by měly být hlavní předpoklady a pravidla pro popis dané reality. Platnost tohoto návrhu však zatím nebyla prokázána. Modelem pak lze nazvat soubor předpokladů, pravidel a postupů, které umožňují zjednodušeně popsat experimentální údaje s odpovídající přesností. Teorie podává systematický a zobecněný obraz zákonitostí a podstatných souvislostí té oblasti skutečnosti, která je jejím předmětem. Obsahuje základní principy a postupy, které umožňují při znalosti počátečních podmínek popsat kvantitativně přesně experimentální data v celé komplexnosti. Bohužel se tyto termíny často používají dost volně a v různém kontextu. Například ve zmíněném článku o ekpyrotickém vesmíru se tato hypotéza uvádí jako „nová teorie“. Ostatně i „teorie velkého sjednocení“ či „superstrunové teorie“ jsou zatím pouze hypotézy. Protože však tyto názvy příslušných hypotéz jsou už vžitě, budu je užívat i já.

Rozdíl v pojmech hypotéza, model, teorie si dovolím přiblížit na vývoji heliocentrické představy, kterou lze označit za počátek kosmologie. První Kopernikova představa o pohybu planet včetně Země okolo Slunce byla hypotézou. V té době ještě nebylo možno experimentálně rozhodnout, která z představ (heliocentrická nebo geocentrická) je správná. Popis experimentálních dat s použitím Kopernikovy hypotézy byl dokonce horší než při použití tehdy uznávané hypotézy geocentrické. Způsobil to chybný předpoklad, že planety se pohybují po kružnicích. Nesmírnou výhodou heliocentrické představy však byla elegantní jednoduchost oproti představě geocentrické, která nutně vedla ke složitému systému epicyklů. Dostatečně přesná data Tychona Brahe umožnila vybrat mezi hypotézami tu správnou a na jejich základě vytvořil J. Kepler fungující heliocentrický model umožňující i velmi přesné kvantitativní předpovědi. Přeměnu v konzistentní teorii provedl až I. Newton na základě své teorie všeobecné gravitace.

## Historický aspekt kosmologie

Kosmologie stejně jako studium dějin nebo vzniku a vývoje života zkoumá události, které proběhly. Zatím můžeme dost těžko předpokládat opakování tohoto „experimentu“. Naše testovatelné předpovědi se v případě kosmologických modelů týkají, podobně jako u modelů evoluce života, situace pozorované teď a projevů předcházejícího vývoje v současném stavu. Výhodou kosmologie je, že díky konečné rychlosti světla má možnost pozorovat také minulé stadia vzdálených oblastí vesmíru.

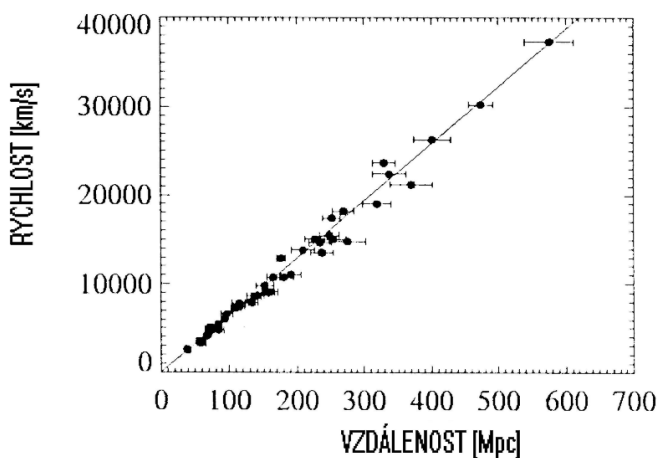
Možnost extrapolace a poznávání minulosti je založena na předpokladu jednoty a poznatelnosti fyzikálních zákonitostí v minulosti a dnes, a to v různých částech vesmíru a různých rozměrových škálách. To neznamená, že se nemohou fyzikální zákonitosti či „konstanty“ projevovat velmi rozdílně v závislosti na situaci. Na různých rozměrových škálách se mohou projevovat nejvýrazněji různé zákonitosti. Znamená to však, že pokud zákonitosti platící například v mikrosvětě aplikujeme v limitě na makroskopické soustavy, musí být v souladu se zákonitostmi použitelnými v této oblasti. Jako příklad může sloužit nerelativistická limita ( $v \ll c$ ) speciální teorie relativity. Tato koncepce se plně prosadila pracemi I. Newtona, který sjednotil popis pohybu pozemských

a vesmírných těles. Na jejím základě stojí úspěšný rozvoj vědy v posledních letech i staletích.

Než přistoupíme k současným kosmologickým modelům, je třeba ještě ujasnit některé další pojmy, které se v článkách o kosmologii používají. Jsou to pojmy látka, záření, hmota a energie. Látka je složena z částic, které mají nenulovou klidovou hmotnost. Záření je tvořeno částicemi, které mají klidovou hmotnost nulovou. Hmota je filozofický pojem, který označuje souhrn všech součástí objektivní reality. Nejen v kosmologických článcích však dost často nahrazuje pojem látka a někdy i pojem hmotnost. Stejný název jako pro jednu z nejdůležitějších fyzikálních veličin — energie — se používá i jako název jedné z forem hmoty. Název „energie“ je spojen s energií vakua nebo s energií záření a vakua dohromady. V dalším textu se bude používat pojem hmoty ve smyslu obecné filozofické definice. Látka, záření a „energie“ jsou různé formy hmoty. Definice pojmu látka a záření byly zmíněny a pojem „energie“ se bude týkat pouze energie vakua. I když jsem se snažil o co nejpřesnější užívání uvedených definic, v některých případech jsem se vzhledem k zavedené terminologii nemohl vyhnout některým nekonzistencím. Doufám však, že i v těchto případech bude smysl sdělení z kontextu jasný.

### Standardní kosmologický model?

Základem standardního kosmologického modelu (velkého třesku) je předpoklad, že pozorovaný vesmír byl v minulosti ve velmi horkém a hustém stavu. Od té doby probíhá rozpínání vesmíru a jeho ochlazování. Průběh rozpínání je dán počátečními podmínkami (např. poměrem mezi hustotami látky, záření a „energie“ ve vesmíru a hustotou kritickou — tedy takovou, pro kterou by se rozpínání vesmíru právě zastavilo) a je popsán obecnou teorií relativity. Chladnutí a vývoj vesmíru, pro jehož popis

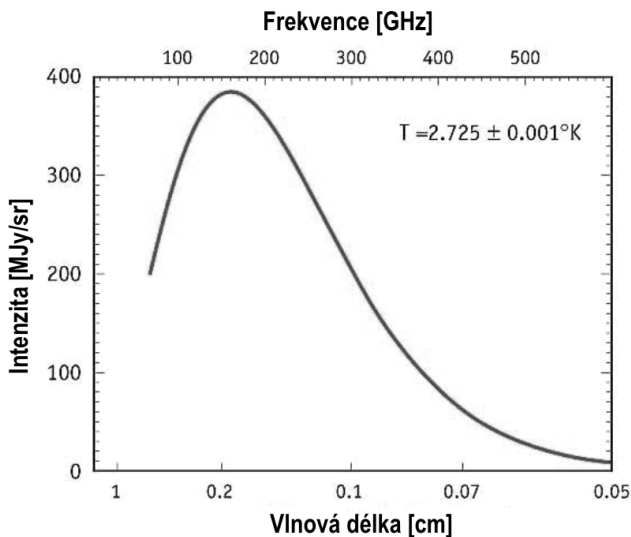


Obr. 1. Závislost rychlosti vzdalování galaxií na jejich vzdálenosti. Převzato z „Review of Particle Physics“ z roku 2000 vypracované skupinou „Particle Data Group“.

už nám nestačí pouze teorie gravitace, lze od jistého okamžiku popsat pomocí standardního modelu částic a interakcí. Uvedme si, na kterých experimentálních faktech je standardní kosmologický model postaven. Číselné hodnoty jsou většinou převzaty z velmi seriózní a v dobrém slova smyslu konzervativní kompilace „Review of Particle Physics“ z roku 2000, vypracované skupinou „Particle Data Group“ (ještě novější údaje lze nalézt v nedávno publikovaném přehledu této skupiny pro rok 2002 [3]). V případě hodnot založených na měření fluktuací reliktního mikrovlnného záření byly použity nejnovější údaje, publikované skupinami pracujícími na experimentech zmíněných v dalším textu.

Důkazem velkého třesku je především **vzdalování galaxií**, měřené pomocí rudého posuvu, které ukazuje na rozpínání vesmíru. Neexistenci stacionárního řešení rovnic obecné teorie relativity popisujících vesmír zjistil A. Friedman. Experimentálně jeho výpočty potvrdil E. Hubble a ukázal, že v našem případě jde o rozpínání.

Druhým experimentálním základem standardního modelu je **existence reliktního mikrovlnného pozadí**, které vzniklo při oddělení látky od záření přibližně 300 tisíc let po začátku rozpínání vesmíru. Teplota už značně poklesla. Fotony elektromagnetického záření už neměly dost energie k ionizaci atomů vodíku a elektrony byly při dané teplotě v atomech vázány. Od té doby se vlivem rozpínání vesmíru vlnová délka fotonů prodloužila, jejich energie klesla, a tím klesla i teplota záření (v současné době je  $T = 2,725 \text{ K}$ ). Existenci takového pozadí předpověděl G. Gamow a experimentálně ho objevili A. A. Penzias a R. Wilson.



Obr. 2. Závislost intenzity mikrovlnného reliktního záření na vlnové délce. Převzato ze zdrojů NASA.

Třetím experimentálním potvrzením je **existence primordiálních lehkých prvků** (převážně hélia). Jejich množství nelze vysvětlit hvězdnou nukleosyntézou, je však v souladu s představou velkého třesku. Současná experimentální hodnota podílu primordiálního  $^4\text{He}$  a vodíku je například 0,238 s chybou 2 %.

Čtvrtým experimentálním faktem potvrzujícím velký třesk je, že velmi vzdálené galaxie, ze kterých k nám jde světlo velmi dlouho, vypadají jinak než galaxie blízké. Při srovnávání mladších a starších oblastí je **znatelná evoluce vesmíru**.

Všechny čtyři zmíněné astrofyzikální jevy standardní kosmologický model vysvětluje a umožňuje i kvantitativní popsání jejich vlastností. Zároveň nyní panuje velmi dobrá shoda mezi kosmologickými parametry určenými různými způsoby. Současná hodnota Hubbleovy konstanty, která charakterizuje současnou rychlost rozpínání vesmíru, se ustálila na hodnotě  $65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  s chybou okolo 10 %. Rychlost rozpínání vesmíru se může měnit a podle nejnovějších pozorování supernov Ia se zdá, že se rozpínání zrychluje. Po započtení této skutečnosti je hodnota stáří vesmíru 15 miliard let s chybou okolo 10 %. To je hodnota, která je v souladu s měřeními hodnotami stáří nejstarších objektů v galaxii, stejně jako s výsledky z datování pomocí radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu. Důležitá pro popis vývoje vesmíru v rámci standardního kosmologického modelu je znalost počátečních podmínek, které z tohoto modelu nevyplývají a musí se stanovit experimentálně. Je třeba určit hustotu a složení vesmíru. Řada nezávislých měření založených na různých fyzikálních principech v posledních desetiletích dosti přesvědčivě ukazuje, že celková hustota vesmíru je velmi blízká kritické a viditelná látka v něm tvoří jen okolo 0,5 %. Tuto látku můžeme pozorovat prostřednictvím elektromagnetického záření. Je složena z protonů a neutronů. Ty patří mezi baryony, a proto mluvíme o baryonové hmotě (i když jde o látku, vžilo se označení baryonová hmota). Viditelné a neviditelné formy baryonové hmoty je ve vesmíru jen okolo 5 %. Zbytek tvoří exotická temná látka, temné záření a temná „energie“ (podíl viditelného záření na hustotě vesmíru je pouze 0,0024 %).

### **Temná látka a temná „energie“**

O částicích se dovídáme pouze prostřednictvím jejich přímé nebo zprostředkované interakce. V současné době známe čtyři typy interakcí: silnou, elektromagnetickou, slabou a gravitační. Pokud bude existovat hmota, která s námi nemůže interagovat ani přímo, ani zprostředkovaně pomocí těchto interakcí, nezaznamenáme ji. O její existenci se nedovíme, i kdyby se celý svět složený z této hmoty prolínal s naším. Řada poznatků ukazuje, že ve vesmíru je velké množství hmoty, která interaguje jen prostřednictvím nejslabších ze zmíněných interakcí a neprojevuje se jinak než gravitačně nebo slabě. Její pozorování a identifikace jsou tak značně složité. Shrňme si experimentální důkazy, které pro existenci takové temné hmoty svědčí a naznačují její vlastnosti:

- 1) Nejstarší pozorovanou skutečností je pozorování dynamiky pohybu galaxií, kup galaxií i větších vesmírných struktur. Již od 30. let minulého století se pozoruje, že rotace galaxií a kup galaxií se nedá vysvětlit pouze viditelnou látkou. Je potřeba předpokládat masivní haló složené z neviditelné temné látky. U normálních galaxií je podíl temné látky okolo 70 %, u trpasličích až 90 %. U větších struktur pak platí, že čím větší struktura, tím větší podíl temné látky.

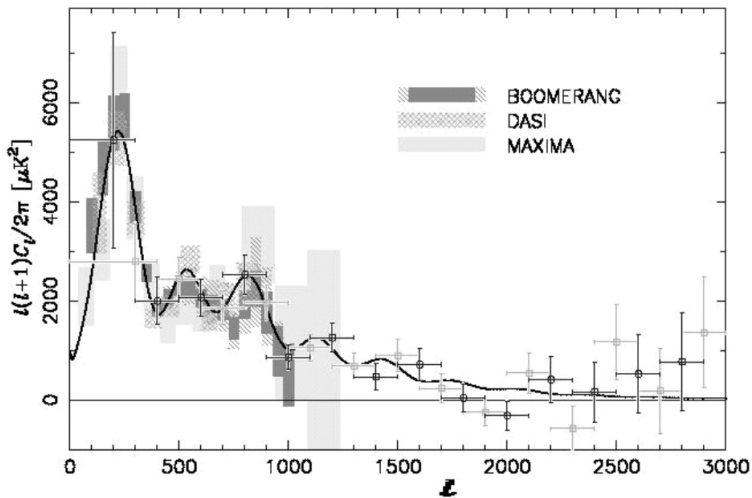
- 2) Teplota horkého plynu v galaxiích, určená z jeho rentgenovského záření, ukazuje, že tento plyn by z galaxií už dávno unikl, pokud by jejich hmotnost nebyla větší než hmotnost viditelné látky.
- 3) Studium gravitačních čoček lze zjistit hmotnosti galaxií nebo kup galaxií a ta je mnohem větší, než je hmotnost jejich viditelné látky.



Obr. 3. CBI (Cosmic Background Imager) — zařízení složené ze 13 částí a určené pro interferometrii ve frekvenční oblasti 26 až 36 GHz. Používá se pro studium mikrovlnného reliktního pozadí s vynikajícím úhlovým rozlišením. Nachází se v severním Chile v nadmořské výšce 5080 m.

- 4) Pozorování anizotropie v teplotě mikrovlnného reliktního záření na velmi malé úhly. Tyto fluktuace odpovídají fluktuacím hustoty (akustickým vlnám), fluktuacím gravitace či fluktuacím jiných vlastností prostředí v okamžiku posledního rozptylu reliktních fotonů. Dají se tak pozorovat vlastnosti prostředí v okamžiku, kdy se záření oddělovalo od látky. První pozorování z pozemního experimentu CBI, provedená v nedávné době, potvrzují a zpřesňují data pozemního experimentu DASI a balónových experimentů BOOMERANG a MAXIMA. Měření se zobrazují ve formě spektra úhlových fluktuací, tj. závislosti velikosti fluktuací na převrácené hodnotě úhlové vzdálenosti porovnávaných míst (viz obr. 4). Pozorování jasně potvrzují existenci temné látky a s vysokou pravděpodobností vylučují hypotézy vysvětlující rotační křivky galaxií modifikací teorie gravitace. Její předpovědi jsou uvedeny například ve [4] a populárnější formou je popsána v [5]. Mezi závěry šesti různých experimentálních týmů, které se zabývají studiem mikrovlnného záření,

panuje velmi dobrá shoda. Poloha prvního píku ve spektru úhlových fluktuací ukazuje, že vesmír je velmi blízký plochému (poměr mezi hustotou vesmíru a kritickou hustotou je velmi blízký jedničce) a dává odhad celkové hustoty hmoty. Průběh spektra fluktuací velmi striktně omezuje množství baryonové hmoty ve vesmíru na pouhých 5 % (vzdálenost sudých a lichých maxim), a to, že celkově látka tvoří 30 % a „energie“ 70 % (srovnání amplitudy prvního píku a následujících). Důležitý je i poznatek, že pro měřené frekvence a v mezích současné přesnosti měření nezávisí amplituda těchto fluktuací na vlnové délce, ve které ji měříme. Ovšem rozsah měřených frekvencí je zatím dost omezený.



Obr. 4. Shrnutí experimentálních dat o průběhu úhlové anizotropie mikrovlnného reliktního záření získaných v posledních experimentech. Zkoumá se závislost velikostí fluktuací intenzity mikrovlnného pozadí na parametru  $l = 180^\circ/\theta$ , kde  $\theta$  je úhlová vzdálenost porovnávaných měřených míst ve stupních.  $l = 3000$  odpovídá úhlu  $0,06^\circ$ . Body s chybami jsou data CBI. Křivka je modelový fit (standardní model s kosmologickými parametry a složením hmoty blízkým uvedeným v tomto článku) na všechna experimentální data. Převzato z J. L. SIEVERS et al., astro-ph/0205387.

- 5) Pozorování stále vzdálenějších hvězd a galaxií pomocí Hubblova teleskopu posunují počátek formování galaxií a hvězd stále blíže k počátku velkého třesku. Tuto skutečnost podporuje například i nedávná studie kosmického infračerveného pozadí v programu 2MASS. Počáteční formování zárodků struktury vesmíru tak muselo probíhat už v době, kdy byla teplota natolik vysoká, že formování baryonové hmoty bránila. Pro úspěšné formování velkorozměrové struktury vesmíru byla nutná existence nebaryonové temné látky. Tato látka musela být navíc chladná (částice, které ji tvoří, měly krátce po velkém třesku nerelativistické rychlosti). K vysvětlení formování samotných galaxií je však třeba předpokládat také existenci relativně malého množství horké temné látky (její částice měly krátce po velkém třesku relativistické rychlosti).



- 6) Pozorované produkty primordiální nukleosyntézy (poměr lehkých prvků  $^4\text{He}$  a deuteria) striktně vymezují hustotu baryonové hmoty a výsledky odpovídají velmi dobře hodnotě získané ze zkoumání anizotropie reliktního záření.
- 7) Vztah mezi rudým posuvem a vzdáleností určený pomocí supernov Ia naznačuje zrychlení expanze, a tedy existenci temné neviditelné „energie“, která způsobuje odpudivou sílu.

Takže zkusme si shrnout dosud získané poznatky. Hustota hmoty vesmíru je dnes s přesností lepší než 5 % rovna hustotě kritické, která odpovídá plochému vesmíru. Její složení je pak 70 % temná „energie“, 25 % temná chladná nebaryonová látka, 5 % baryonová hmota a malá příměs horké temné látky.

V poslední době vyšlo několik rozborů stupně věrohodnosti různých zmíněných předpokladů v populárních článcích význačných kosmologů. Jedním z nich je například příspěvek, který napsal P. James E. Peebles [6].

### Standardní inflační kosmologický model?

Standardní model vývoje vesmíru je velmi úspěšný v popisu vývoje vesmíru od jistého okamžiku. Chceme-li však popsat vývoj vesmíru předtím a zároveň vysvětlit nastavení počátečních podmínek, potřebujeme vybudovat nový model. Připomeňme si, které základní počáteční podmínky standardního modelu musí takový model vysvětlit:

a) **Vysokou stejnorodost a izotropnost vesmíru.** Je třeba vysvětlit, proč jsou hustota látky ve vesmíru i teplota reliktního záření velmi stejnorodé a shodují se i v místech, která by při průběhu rozpínání vesmíru podle standardního modelu byla díky omezené rychlosti (maximální možnou rychlostí je rychlost světla) oddělena a jejichž parametry (hustota, teplota, ...) by se nemohly vyrovnat.

b) Zároveň i **jisté nehomogenity**, které umožní formování velkoškálové struktury vesmíru, galaxií i hvězd. Poslední měření ukazují, že toto formování probíhalo velmi rychle. První generace hvězd se objevila po uplynutí zhruba jen pár stovek milionů let po začátku rozpínání.

c) **Plochosť vesmíru.** To znamená blízkost hustoty hmoty ve vesmíru hustotě kritické. Proč je to právě tato hodnota?

d) **Poměr mezi jednotlivými složkami hmoty.** Tedy to složení vesmíru, které bylo ukázáno v předchozí části a tvoří počáteční podmínky standardního kosmologického modelu.

e) **Vznik přebytku hmoty nad antihmotou** (baryonovou asymetrii). Zjistit, jak se vlastně stalo, že vůbec existujeme. Komplexnější rozbor tohoto problému z pohledu inflačních kosmologických modelů lze najít v populárnější formě v [7].

f) **Absence pozorovatelných topologických singularit** (např. magnetických monopolů). Měly by vznikat v hojném množství na počátku velkého třesku, ale zatím nebyla pozorována ani jedna.

g) Zároveň je důležité, aby takový model řešil i **problém počáteční singularity**, tedy toho, že při extrapolacích k počátku roste hustota i teplota vesmíru do nekonečna.

Řešení většiny a možná i všech těchto problémů nabízí hypotéza inflační etapy na počátku vývoje vesmíru. Ta je založena na předpokladu, že v nejranějším období velkého třesku existovala fáze, kdy se rozpínání vesmíru exponenciálně zrychlovalo. Rychlá expanze zvětšila rozměr vesmíru  $10^{30}$ krát během řádově  $10^{-32}$  s. Tím by byla zajištěna homogenita a izotropnost námi pozorované části vesmíru. Její komponenty byly totiž před inflací velmi blízko sebe. Nehomogenity potřebné k formování velkoškálové struktury a galaxií jsou pak dány kvantovými fluktuacemi, které se rozepnuly během inflace. Pokud by vesmír, ve kterém probíhá inflace, nebyl plochý, buď by se rychle zhroutil, nebo „rozfoukl“. Hustota monopolů se během inflace zmenšila natolik, že se jejich počet v námi pozorované části vesmíru pohybuje v řádu jednotek. Přesné hodnoty zvětšení rozměru i doby, po kterou inflace probíhala, závisí na variantě navrhovaného inflačního modelu. Inflace by probíhala v průběhu vydělování jednotlivých interakcí ze sjednocené interakce. Existuje několik možností podle toho, jestli by inflace proběhla při vydělení gravitační, silné nebo slabé interakce. Úplně vyloučeno není, že by inflačních fází mohlo být i více. Konkrétní průběh pak velmi silně závisí na variantě teorie sjednocení interakcí, která se uplatňovala. Ta by také určovala podstatu vzniku baryonové asymetrie a poměr a podstatu jednotlivých složek hmoty. Největším problémem zůstává počáteční singularita. Tu by měla řešit jednotná teorie interakcí, na jejíž místo v současné době aspirují superstrunové teorie.

Jak už byla zmínka, z pozorování supernov se zdá, že i dnes probíhá zrychlování expanze vesmíru. Také není úplně vyloučeno, že nás v budoucnu čeká vydělení nové, páté síly a s tím spojené nové inflační období, nebo se, jak ve své nové hypotéze předložil A. Linde, odpudivá síla energie vakua změní na přitažlivou. Expanze se zastaví a obrátí, dojde ke smrštění a „velkému krachu“. Jak je vidět, nabízí hypotéza inflace velmi širokou škálu možností popisu vlastností vesmíru i jeho vývoje v minulosti i budoucnosti.

## Jednotná teorie interakcí (teorie superstrun)?

Jaká konkrétní varianta inflace se ukáže správná, závisí na tom, jak vypadá správná jednotná teorie interakcí. Připomeňme si krátce, jak daleko jsme došli na cestě k ní. Spolehlivě je potvrzen jen standardní model částic a interakcí. Ten v sobě zahrnuje teorii elektroslabých interakcí, která sjednocuje popis slabé a elektromagnetické interakce. Její součástí je i popis elektromagnetické interakce pomocí kvantové elektrodynamiky. Tato teorie umožňuje dělat vůbec nejpřesnější kvantitativní předpovědi. Například shoda mezi teoretickou a experimentální hodnotou magnetického momentu elektronu je až na jedenáct platných cifer. Kvantová chromodynamika pak popisuje silné interakce. Stranou stojí obecná teorie relativity popisující gravitační interakci, jejíž kvantovou podobu dosud neznáme. Standardní model částic a interakcí je extrémně

úspěšný. Dokáže popsat téměř všechny jevy v mikrosvětě, přesto existují důvody, proč je třeba jít za něj:

A) Ve standardním modelu existuje velký počet volných parametrů (hmotnosti leptonů, kvarků, intermediálních bozonů a Higgsů, různé parametry míchání).

B) Existuje řada symetrií mezi částicemi a interakcemi standardního modelu (např. symetrie mezi leptony a kvarky).

C) Je třeba zahrnout do popisu i gravitaci a vypracovat kvantovou teorii gravitace.

D) Díky tomu, že ve standardním modelu pracujeme s bodovými částicemi, existuje zde problém singularit (některé fyzikální veličiny mohou v některých případech růst do nekonečna).

E) Z experimentálních důvodů jsou to hlavně už zmíněná baryonová asymetrie vesmíru a existence temné hmoty, dalším je zjištění oscilací neutrin. Poslední velmi přesná měření magnetického momentu mionu ukazují na odchylku od předpovědi standardního modelu (kvantové elektrodynamiky).

Existuje řada rozšíření standardního modelu. Hypotézy velkého sjednocení vycházejí ze symetrie leptonů a kvarků. Zavádějí částice, které dokáží měnit kvarky na leptony a naopak. Tím vzniká nezachování baryonového čísla, což je jedna z hlavních podmínek vzniku baryonové asymetrie. Jejich důsledkem je i rozpad protonu. Ještě obecnější jsou supersymetrické teorie. Ty vedou k představě, že každá částice látky (fermion) má svého supersymetrického partnera (bozon) a každá částice interakce (bozon) má svého supersymetrického partnera (fermion). Supersymetrické teorie, které zahrnují gravitaci, se nazývají supergravitace. V současné době se zdají v oblasti hledání jednotné teorie pole nejperspektivnější superstrunové teorie. Ty popisují částice jako vibrace elementárních objektů, které se nazývají struny. V nedávné době se podařilo najít takovou verzi superstrunové teorie, tzv.  $M$ -teorii, která spojuje všech pět variant superstrunových teorií, které byly dosud známy. Náš vesmír se v této teorii rozprostírá na čtyřrozměrné membráně (bráně), která se pohybuje v pátém rozměru (první tři rozměry jsou prostorové a čtvrtý je časový). Zároveň existuje ještě pět dalších rozměrů, které jsou svinuty a natolik malé, že jejich projevy nelze zatím pozorovat. Struny nejsou bodové objekty, proto odstraňují problém singularit. Jako každá supersymetrická teorie vysvětluje superstrunová teorie symetrie mezi různými typy částic a interakcí. Zahrnuje do sjednocování i gravitaci. Mohla by vysvětlit oscilace neutrin i baryonovou asymetrii a poskytuje i dostatečný sortiment částic, který kromě těch známých zahrnuje i dostatek kandidátů pro vysvětlení existence temné hmoty. Vidíme, že superstrunová  $M$ -teorie je výborným kandidátem na finální „teorii všeho“. Má to ovšem zatím dva háčky.

Prvním problémem je, že zatím chybí matematický aparát, který  $M$ -teorie potřebuje pro výpočet kvantitativních předpovědí. Druhým je pak to, že předpovědi, ve kterých překračuje superstrunová teorie standardní model nebo se liší od jiných supersymetrických teorií, se týkají jevů při takových energiích, které přesahují možnosti současných

urychlovačů. Jeden ze zakladatelů superstrunových teorií B. Greene si tak postěžoval, že pracuje již dvě desetítky let na teorii bez nových dat.

Ukažme si, jaké experimentální údaje lze v oblasti ověřování teorií sjednocení interakcí očekávat v dohledné době. Podle předpokladů by se hmotnosti supersymetrických partnerů mohly dostat do dosahu právě budovaných největších urychlovačů (např. budovaný urychlovač LHC v CERNu). Tyto částice jsou sice součástí každé supersymetrické teorie, ale jejich konkrétní vlastnosti by měly umožnit výběr mezi nimi. Na LHC by se mohly objevit i takové exotické jevy, jako je vznik mikroskopické černé díry, které předpovídají superstrunové teorie. S hledáním takových exotických jevů se počítá.

Některé projevy jevů, které jsou za hranicemi standardního modelu, by mohly být pozorovatelné i v oblasti nízkých energií. Rozpad protonu už byl zmiňován. Pozorován zatím nebyl, ale experimentální určení dolní hranice doby života protonu už vyloučilo některé z nejjednodušších variant teorií velkého sjednocení. Hledají se i další exotické typy rozpadů. Také velmi přesná měření oscilací neutrin, vlastností různých částic, narušení zákonů zachování v různých reakcích by mohla vnést světlo do této oblasti. Důležité údaje by mohlo přinést i studium gravitace při stále menší vzdálenosti interagujících těles.

Pokud se však chceme dostat k nejvyšším energiím, máme v současnosti jedinou možnost. Musíme se obrátit k vesmíru a hlavně k jeho počátku. Studium disperze světla ve vakuu — různá doba přiletu fotonů s různou energií z gama záblesku, kosmická neutrina s vysokou energií, vlastnosti temné látky a temné „energie“, reliktního mikrovlnného pozadí, reliktních neutrin a případně gravitačních vln. Právě proto je pozornost teoretiků, kteří pracují v oblasti hledání jednotné teorie částic a interakcí, upřena na kosmologii.

Kdo by se chtěl o superstrunových teoriích dozvědět více z pohledu teoretika pracujícího v této oblasti fyziky, může sáhnout po populární knize B. Greena *Elegantní vesmír*, kterou do češtiny přeložil L. Motl.

## **Inflace nebo srážka dvou bran?**

Standardní inflační hypotéza poměrně dobře vysvětluje řadu pozorovaných skutečností. Přesto však N. Turok vyzývá k tomu, abychom měli hlavu otevřenou i pro jiné koncepty. V jím podporovaném scénáři ekpyrotického vesmíru je inflace nahrazena hypotézou, že náš rozpínající se vesmír vznikl ve srážce dvou čtyřrozměrných bran, které se pohybují v pátém rozměru. Taková hypotéza by skutečnosti, které objasňuje inflační etapa, vysvětlila také. V ekpyrotickém vesmíru neexistuje singularita. Při srážce bran je dosažena pouze konečná hustota a teplota, která je navíc tak nízká, že v ní vznikají monopóly jen s velmi malou pravděpodobností (pravděpodobnost, že se srazí dvě částice s kinetickou energií takovou, aby se vyprodukovala částice s klidovou hmotností předpokládaného monopólu).

Rozhodující test, který by rozhodl mezi hypotézou inflačního vesmíru a vesmíru ekpyrotického, by mohlo přinést pozorování reliktního pozadí gravitačních vln. Ampli-

tuda fluktuací gravitačního reliktního záření by měla v ekpyrotickém vesmíru velmi prudce klesat s růstem vlnové délky tohoto záření (spektrum fluktuací bude silně modré). V inflačním vesmíru je tomu naopak. Amplituda fluktuací s vlnovou délkou (i když jen slabě) stoupá (spektrum fluktuací bude slabě rudé). Pokud by se nám podařilo tyto fluktuace gravitačního pozadí měřit, pak by jejich absence v dlouhovlnné oblasti byla známkou ekpyrotického vesmíru a jejich přítomnost by hovořila ve prospěch inflace. Takové pozorování je však v současnosti neuskutečnitelné a i v budoucnu bude jeho provedení velmi obtížné. Vliv gravitačního pozadí by se však měl promítnout do vlastností mikrovlnného reliktního záření (jeho polarizace). První úspěšné měření polarizace mikrovlnného záření již zmíněným experimentem DASI bylo publikováno v září 2002. Ovšem přesnost měření je zatím malá. Vliv modelu na fluktuace hustoty vesmíru (tedy i na teplotu reliktního záření) už není tak jednoznačný a pozorování modrého nebo rudého spektra fluktuací nám neumožní jednoznačně se přiklonit k inflačnímu či ekpyrotickému modelu vesmíru. Pozorování fluktuací reliktního záření by ovšem mohlo omezit počet variant těchto hypotéz. Příslušná měření už by mohla být v dosahu experimentů, které začaly fungovat nebo se pro nejbližší desetiletí připravují (sondy MAP a PLANCK). Vůbec je momentálně studium různých vlastností reliktního mikrovlnného pozadí (jeho fluktuace, polarizace, ...) jedním z nejperspektivnějších zdrojů dat pro testování různých kosmologických hypotéz.

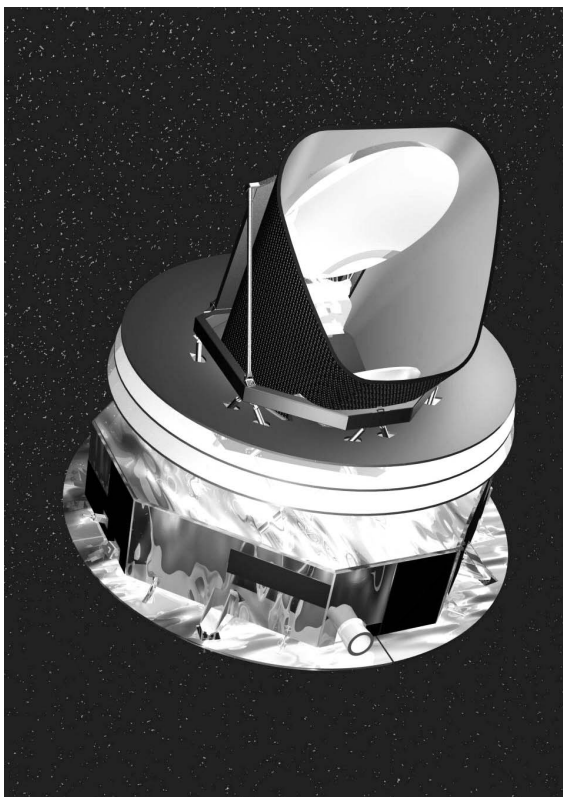
Dalším z možných experimentálních testů by například bylo určení časového vývoje poměru hustoty různých složek hmoty v našem vesmíru.

Ovšem představy ekpyrotického vesmíru se s představou inflace nemusí striktně vylučovat. Jak poznamenal A. Linde, i v ekpyrotickém vesmíru by mohla proběhnout inflace. To by pochopitelně mělo vliv i na možnosti využití různých testů pro určení správné teorie počátečních stadií vesmíru.

## **Můj názor na odpověď na titulní otázku**

Jak to s tou kosmologií tedy je? V předchozích částech jsem se pokusil o poměrně obsáhlý přehled experimentálních dat, na kterých jsou postaveny naše současné kosmologické představy. Snažil jsem se zdůvodnit svůj názor, že kosmologie je dnes standardní vědecký obor s velice pevnou vazbou na jadernou a částicovou fyziku. Její hypotézy a modely jsou konfrontovány s širokou škálou experimentálních údajů. Zatímco popis pozdějších fází velkého třesku je opravdu standardním modelem, který stojí na pevných základech standardního modelu částic a interakcí a je velmi dobře prověřen experimentálními daty, představy raného vývoje v podobě inflačního či ekpyrotického vesmíru jsou zatím pouze hypotézy. Snažil jsem se také ukázat, že i ty nejdivočejší z uvedených hypotéz dávají ověřitelné předpovědi, které by umožnily vybrat správnou, i když ve většině případů bude provedení potřebných měření velmi náročné a u některých se dá o jejich proveditelnosti značně pochybovat.

Trochu bych proto pozměnil závěr článku [2]. V příslušném případě není třeba čekat na nového Kopernika. Hypotézy inflace, ekpyrotického vesmíru i řada dalších



Obr. 5. Návrh sondy Planck, připravované pro zkoumání reliktního mikrovlnného záření (převzato ze zdrojů NASA).

jsou na stole. Nyní je třeba čekat na nového Tychona Brahe, který získá dostatečně přesná data, která umožní najít mezi hypotézami tu správnou, a dovolí tak novému Keplerovi vytvořit model popisující vývoj vesmíru v době před platností standardního modelu. Hlavně pak čekáme na nového Newtona, který by vypracoval sjednocenou teorii interakcí (pravděpodobně ve formě superstrunové teorie) a její matematické postupy, které umožní přesný popis celého vývoje vesmíru a vytvoření kosmologické teorie. I když není úplně vyloučeno, že i ten nový Koperník bude potřeba, protože správná hypotéza může být jiná než ty, které se zatím objevily.

## Dodatek

Článek byl dopsán koncem roku 2002. Od té doby v oblasti experimentálního kosmologického výzkumu přibyla řada nových údajů. Především byly 11. 2. 2003 slavnostně zveřejněny první výsledky měření reliktního záření sondou MAP (přitom byla sonda přejmenována na Wilkinson MAP). Ty umožnily značné zpřesnění řady kosmologických parametrů a parametrů určujících složení hmoty ve vesmíru. V následující tabulce jsou uvedeny publikované výsledky sondy MAP. Je vidět, že hodnoty získané sondou MAP jsou přesnější, ale dřívější hodnoty uvedené v předchozích částech článku jsou

v mezích experimentálních chyb v soulasu s těmi novými. I tento fakt velmi dobře potvrzuje skutečnost uváděnou v závěru, že naše současné kosmologické představy jsou podloženy velice solidními experimentálními základy.

<b>Základní kosmologické parametry — WMAP 11. 2. 2003</b>	
Hubbleova konstanta	$(71 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
stáří vesmíru	$(13 \pm 0,2)$ miliard let
doba oddělení reliktního záření od hmoty	380 000 let
vznik prvních hvězd	200 000 000 let
křivost vesmíru	plochý
kosmologická konstanta	$(0,73 \pm 0,04)$
<b>Složení vesmíru — WMAP 11. 2. 2003</b>	
vakuová energie (skrytá, temná energie)	$(73 \pm 4) \%$
skrytá hmota (nebaryonová, temná hmota)	$(23 \pm 2) \%$
baryonová hmota (atomární, svítící hmota)	$(4,0 \pm 0,2) \%$

#### L i t e r a t u r a

- [1] KHOURY, J. M. et al.: Phys. Rev. *D64* (2001) 123522, populárně S. NADIS: Astronomy, květen 2002, s. 34.
- [2] Redakční článek podle článku v New Scientist, Kozmos č. 4 (2002) s. 3.
- [3] HAGIWARA, K. et al.: Phys. Rev. *D66* (2002) 010001, možno i na WWW: [http://pdg.lbl.gov/2002/contents\\_sports.html](http://pdg.lbl.gov/2002/contents_sports.html)
- [4] MCGAUGH, S. S.: Astroph. J. *523* (1999), L99.
- [5] NADIS, S.: Kozmos č. 6 (2001), s. 3, převzato z časopisu Astronomy, srpen 2001.
- [6] JAMES P. PEEBLES E.: Scientific American Nr. 2, Volume 12 (2002), s. 3.
- [7] WAGNER, V.: Kozmos č. 6 (2000), s. 14.