

# Stručný průvodce po kosmologii 20. století

JIŘÍ PODOLSKÝ

Všeobecně uznávaným vědeckým popisem vesmíru je představa vyvíjejícího se hierarchického kosmu, který již více než 10 miliard let expanduje z počátečního žhavého velkého třesku. Tento model dnes poskytuje komplexní a vnitřně ucelený obraz, jenž je v souladu s dobře ověřenými fyzikálními teoriemi mikrosvěta i makrosvěta a s ohromným množstvím rozličných astronomických měření.

Cílem našeho příspěvku je připomenout klíčové etapy a milníky vývoje fyzikální kosmologie 20. století i hlavní osobnosti, jež jsou s nimi spojeny. Zaměříme se zejména na teorii velkého třesku, která (na rozdíl od konkurenční teorie stacionárního vesmíru) byla od počátku 60. let potvrzena řadou pozorování. Ve druhé části příspěvku pak shrneme hlavní soudobé poznatky a fakta o vesmíru jako celku, jeho struktuře a vývoji.

## Kosmologie jako věda o vesmíru

Mezi základní kosmologické otázky patří zejména zjistit:

- jaká je struktura kosmu (jeho uspořádání, hierarchie)
- z čeho je složen (jaká je jeho podstata, elementární prvky)
- rozměry a stáří (otázka nekonečnosti a věčnosti)
- evoluci struktur (jeho vznik, budoucnost)

Vývoj kosmologických představ lze sledovat napříč celými dějinami lidské kultury. V zásadě bychom je mohli charakterizovat jako cestu od fantazií a spekulací k ověřeným vědeckým poznatkům. V hrubém přiblížení lze dějiny kosmologie periodizovat takto:

- mytologie a náboženské představy starověkých civilizací
- antická vzdělanost a její arabští zprostředkovatelé
- středověký scholastický obraz světa
- novověk, vznik vědy a následná cesta racionálního poznání

Klíčový přelom ve vývoji kosmologie přineslo zformulování Einsteinovy teorie gravitace (obecné relativity) v roce 1915. Její následný rozvoj a skloubení s fyzikou a astronomií 20. století do konzistentního obrazu světa poprvé učinilo z kosmologie plnoprávný vědecký obor.

## Obecná relativita, její první aplikace a pozorování

První relevantní kosmologický model sestrojil krátce po vzniku obecné teorie relativity v roce 1917 sám její tvůrce Albert Einstein. Byl to model statického vesmíru rovnoměrně vyplněného hvězdami. Aby se vyvážilo přitažlivé gravitační působení hvězd, bylo nutné do rovnic gravitačního pole dodatečně zavést tzv. kosmologickou konstantu  $\Lambda$  coby „antigravitaci“ prázdného prostoru. Ve stejném roce objevil de Sitter jiné řešení Einsteinových gravitačních rovnic, které popisuje model prázdného rozpínajícího se vesmíru s kosmologickou konstantou  $\Lambda$ .

Ve 20. letech pak byly nalezeny expandující modely s hmotou. Zásluhu na tom měl Friedmann (1922) a následně Lemaître, Robertson, Walker, Tolman a další. Ti objevili a popsali úplnou rodinu prostorově homogenních a izotropních friedmannovských modelů obsahujících obvyklou hmotu, elektromagnetické (fotonové) záření a případně kosmologickou konstantu. Lemaître (1927) navíc přišel s ideou „prvotního atomu“: uvědomil si, že expandující vesmír musel mít svůj časový počátek, dnes nazývaný velký třesk, a byl první, kdo se snažil popsat fyzikální procesy probíhající ve velmi raném vesmíru.

Ve 20. letech se díky rozmachu astronomických pozorování prokázalo, že vesmír je velký, hierarchický a opravdu se rozpíná. Kolem roku 1920 probíhala tzv. „velká debata“, zda spirální mlhoviny jsou vzdálené galaxie či ne. Shapley a další pokládali spirální mlhoviny za útvary patřící do Mléčné dráhy, opačný tábor vedený Curtisem je považoval za vzdálené ostrovy miliard hvězd. Mléčná dráha je jen jednou z mnoha galaxií. To se opravdu prokázalo, když Hubble v roce 1923 změřil vzdálenosti M31 pomocí cefeidy. Následná pozorování dala za pravdu stoupencům velkého strukturovaného vesmíru, jehož hvězdy se seskupují do obřích a navzájem oddělených galaktických rodin.

V roce 1929 Hubble a Humason objevili rudý posuv spekter galaxií, který díky Dopplerovu jevu odpovídá rychlosti jejich vzdalování. Počátkem 30. let tedy bylo zjevné, že vesmír je plný galaxií a opravdu expanduje, v souladu s příslušným modelem obecné teorie relativity.

## Souboj teorií velkého třesku a stacionárního vesmíru

Řada badatelů považovala za přirozené, že expandující vesmír musel mít v minulosti svůj počátek, dnes zvaný velký třesk. Veškerá existující hmota byla tehdy za vysokých hustot a teplot natěsnána do nepatrného prostoru. Bezprostředně po velkém třesku proto mohly probíhat termojaderné reakce, čímž lze vysvětlit vznik různých prvků. Tuto představu propagoval a od 30. let rozpracovával George Gamow se svými spolupracovníky Ralphem Alpherem a Robertem Hermanem.

Našli se však vědci, kteří s touto myšlenkou nesouhlasili. Nejzarytější odpůrcem teorie žhavého počátku vesmíru byl Fred Hoyle a jeho kolegové Thomas Gold a Herman Bondi. V roce 1949 přišli s vlastním alternativním kosmologickým modelem stacionárního vesmíru. Využili toho, že z pozorovaného rozpínání vesmíru ještě *logicky* neplyne, že by musel mít svůj časový počátek a vývoj. Kdyby ve vesmíru neustále vznikala nová hmota, hustota galaxií by mohla zůstat konstantní i při jeho expanzi. Takový vesmír by byl věčný a neměnný.

Nesmířitelný souboj těchto dvou konkurenčních teorií byl pro rozvoj kosmologie v 50. a 60. letech stimulační. Díky němu se postupně podařilo objasnit spoustu klíčových faktů a souvislostí, zejména:

- **pochopení nukleosyntézy prvků**

S myšlenkou, že hvězdy jsou obrovské koule žhavé plazmy, v jejichž centru dochází k termojadernému slučování jader vodíku na jádra hélia, přišel už ve 20. letech Eddington. Přesný popis příslušných reakcí našli ve 30. letech Atkinson s Houtermansem (tzv. proton-protonový řetězec) a Bethe s Weizsäckerem (tzv. CNO cyklus). Tím byl odhalen zdroj energie hvězd a prokázána produkce hélia z vodíku v nitru hvězd.

Otázkou však zůstávalo, kdy a kde se ve vesmíru vzaly těžší prvky, především uhlík a následně dusík, kyslík a tak dále. Gamow s Alpherem a Hermanem (1935, 1948) se domnívali, že mohly také vzniknout krátce po velkém třesku. Fermi s Turkevichem ale ukázali, že to nebylo možné, protože vesmír se rozpínal velmi rychle, takže příhodné teploty brzo ustaly.

Reakci syntézy uhlíku ze tří jader hélia našli Opik a Salpeter (1951), ale až Hoyle (1954) přišel na to, jak mohou takové reakce probíhat za dostatečně krátkou dobu. Předpověděl existenci

(do té doby neznámého) excitovaného stavu uhlíkového jádra, který Fowler (1957) experimentálně skutečně prokázal. Rychle se pak podařilo najít a pochopit celou síť následných nukleárních reakcí, jimiž hvězdy ve svém nitru syntetizují všechny prvky až po železo. Zásahu na tom měli především manželé Burbidgeovi, Fowler a Hoyle (1957). Ve stejném roce Cameron doplnil poslední velkou chybějící část mozaiky: ukázal, že prvky těžší než železo mohou vznikat záchytem neutronů za obrovských teplot při výbuchu supernov.

- **zpřesnění stáří vesmíru**

Teorie velkého třesku měla od 30. do 50. let minulého století velký problém s časovými škálami. Hubblem stanovená rychlost rozpínání byla příliš velká, takže se vesmír zdál mladší než objekty v něm: vypadalo to, že existuje jen 1,8 miliardy let. To byl zjevný paradox, na který Hoyle oprávněně poukazoval při propagování svého modelu stacionárního (a tedy věčného) světa.

Nápravu přinesla až pečlivá měření, která od 40. let prováděl Baade. V roce 1952 objevil, že existují *dvě různé* populace cefeid. Příslušná revize mezigalaktických vzdáleností „zvětšila“ vesmír  $2,6\times$  oproti Hubbleovým měřením. Následně Sandage (1958) zjistil, že některé velmi zářivé zdroje v galaxiích nejsou hvězdy, ale oblasti excitovaného vodíku. Zásluhou této opravy vesmírné vzdáleností narostly ještě  $2,2\times$ . Další drobnější upřesňování skutečné velikosti vesmíru probíhala i později.

Ukázalo se, že vesmír je asi osmkrát starší, než plynulo z původních Hubbleových měření. Je mu více než 10 miliard let, což pro teorii velkého třesku již nepředstavuje žádný problém.

- **prokázání evoluce vesmíru**

Zásluhou prudkého rozvoje radioastronomie po druhé světové válce byly v 50. a 60. letech objeveny úplně nové kosmické objekty, především velmi aktivní rádiové galaxie, kvasary a pulsary.

Systematickým hledáním a katalogizací rádiových galaxií se zabýval Ryle, který v roce 1961 ukázal, že nejsou v prostoru rozloženy uniformně. Nacházejí se především ve velkých vzdálenostech a v hojně míře tedy existovaly jen v raném vesmíru.

V roce 1963 Schmidt identifikoval první kvasar 3C 273. Ukázalo se, že jeho spektrální čáry vykazují obrovský rudý posuv, což znamená, že to je relativně malý objekt s obrovskou svítivostí, nacházející se velice daleko.

Důsledkem těchto nových objevů bylo zjištění, že v mladém vesmíru byly galaxie i jiné astronomické objekty daleko aktivnější než v dnešní době. Tento evoluční efekt byl v plném souladu s teorií velkého třesku a současně zasadil tvrdou ránu Hoyleho představě stacionárního, neměnného vesmíru.

- **existence reliktního mikrovlnného záření**

Již v roce 1948 učinili Alpher, Gamow a Herman teoretickou předpověď existence rádiového reliktního záření coby „ozvěny“ horkého velkého třesku. Vesmír byl po svém zrodu zaplněn hmotou v plazmatickém stavu. Jak se však rozpínal, rychle chladnul. Zhruba 400 tisíc let po velkém třesku teplota klesla natolik, že vznikly neutrální atomy. Od toho okamžiku mohly reliktní fotony volně putovat „průhledným“ vesmírem. Zachovaly si své původní Planckovo spektrum (záření absolutně černého tělesa), jen jeho teplota díky expanzi vesmíru dnes klesla na pouhých několik kelvinů.

Toto reliktní mikrovlnné záření přicházející rovnoměrně z celé oblohy bylo experimentálně prokázáno Penziasem a Wilsonem (1965). Ukázalo se, že je velice izotropní, planckovské a má teplotu  $T = 2,7 K$ . Objev se stal triumfem teorie velkého třesku, zatímco pro model stacionárního vesmíru byl fatální.

Pečlivé studium reliktního záření je nesmírně důležité. V roce 1989 například družice COBE změřila jeho nepatrné anizotropie řádu  $10^{-5}$ , jež v plném souladu s teorií velkého třesku odpovídají „zárodkům“ dnešních kup galaxií a pozorovaných vesmírných voidů.

## Shrnutí klíčových pozorování

V této druhé části příspěvku podáme stručný přehled základním faktů o vesmíru jako celku. Nepůjde nám již o chronologický popis zjištěných

skutečností, ale o jejich shrnutí z pohledu soudobé kosmologie počátku 21. století.

- **vesmír je popsatelný známými fyzikálními zákony**

Hlavní argument pro toto tvrzení poskytuje spektroskopie. Bezbytku se podařilo identifikovat spektrální čáry vysílané všemožnými nebeskými objekty s příslušnými čarami látek zjištěnými v pozemských laboratořích. Z toho plyne, že pozorovaná vesmírná tělesa jsou složena z téže hmoty jako Země a sluneční soustava. I ve vzdálených hvězdách, galaxiích či kvasarech nacházíme stejné chemické prvky a sloučeniny. To znamená, že tam platí i stejně fyzikální zákony (elektromagnetizmu, kvantové mechaniky, statistické fyziky atd.), jinak by struktura atomů a molekul (a tudíž i jejich spektra) byla odlišná. Samozřejmě, při extrapolaci „pozemských“ fyzikálních zákonů je nutná obezřetnost, zatím ale vše nasvědčuje tomu, že celý pozorovaný vesmír je pozoruhodně jednotný: je ovládán stejnými zákony a existují v něm stejné formy hmoty.

- **vesmír obsahuje na různých škálách množství struktur**

Všechno kolem nás je uspořádáno do bohaté hierarchie struktur, od částic přes jádra, atomy, chemické sloučeniny, buňky, rostliny, živočichy a lidi, jejich ekosystémy, Zemi a ostatní planety, Slunce a spoustu podobných hvězd, galaxie až po kupy galaxií. Vše dohromady tvoří opravdový kosmos (z řeckého *kosmos*, což znamená „uspořádat, srovnat“). Námi popsaný hierarchický vesmír zahrnuje obrovskou rozměrovou škálu. Její rozsah dnes přesahuje 40 řádů: proton ( $10^{-15} m$ ), atom ( $10^{-10} m$ ), buňka ( $10^{-5} m$ ), člověk ( $1 m$ ), Země ( $10^7 m$ ), sluneční soustava ( $10^{13} m$ ), galaxie ( $10^{21} m$ ), pozorovaný vesmír ( $10^{26} m$ ).

- **všechny dnes pozorované struktury jsou složeny z kvarků a leptonů navzájem spojených jen čtyřmi interakcemi**

Z pohledu dnešní fyziky jsou základními „cihličkami“ všech struktur vesmíru kvarky a leptony, plus jejich antičástice. Kvarků, stejně jako leptonů, je jen 6 druhů a jsou po dvojicích řazeny do 3 rodiny. Nejdůležitějšími kvarky jsou *u* a *d*, protože se z nich

skládají protony a neutrony (a tudíž atomová jádra). Nejdůležitějším leptonem je elektron (neboť spolu s jádry tvoří strukturu atomů). V základech komplikované hierarchie struktur kosmu tedy stojí nesmírně elegantní jednota!

Zmíněné elementární stavební prvky a struktury z nich složené jsou navzájem svázány pouze 4 fundamentálními fyzikálními interakcemi: silnou jadernou, slabou jadernou, elektromagnetickou a gravitační. Existence a složitost všemožných struktur je dána souhrou těchto čtyř sil, jež závisí především na rozměrech objektů a jejich teplotě. Zatímco obě jaderné interakce se omezují na mikrosvět, vesmír ve velkém je naopak ovládán gravitací.

- **vesmír je na největších rozměrech uniformní, nemá tedy globální strukturu**

Víme, co je dnes nejmenší strukturou přírody. Co je však její největší strukturou? Všechna dosavadní pozorování svědčí o tom, že vesmír *jako celek* je

izotropní: ve všech směrech vypadá v průměru stejně

homogenní: ve všech místech vypadá v průměru stejně

Zatímco na běžných rozměrech pozorujeme nesmírné bohatství struktur (viz výše), na opravdu velkých škálách se odlišnosti smývají. Konkrétně to znamená, že oblasti vesmíru o rozměrech větších než 200 Mpc jsou v průměru stejné. Vesmír ve velkém se tedy jeví velmi „fádní“. Tato skutečnost je potvrzena pozorovaným rozložením vzdálených galaxií, kvasarů i reliktního záření.

- **vesmír jako celek se rozpíná**

Je prokázaným faktem, že daleké galaxie a kvasary se vzdalují, což se projevuje Dopplerovým rudým posuvem jejich spekter. Jak objevil Hubble už v roce 1929, rychlost vzdalování  $v$  je přitom úměrná jejich vzdálenosti  $d$ , tedy  $v = H d$  (pro velké hodnoty  $d$  se pozorují jisté odchylky od této lineární závislosti). Dnešní hodnota Hubbleova parametru úměrnosti je  $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$  (připomeňme že  $1 \text{ Mpc} = 30,9 \times 10^{18} \text{ km}$ ). V souladu s teorií velkého třesku tedy před asi 14 miliardami let při vzniku vesmíru byly všechny objekty vesmíru „na tomtéž místě“ za obrovských teplot, tlaků a hustot.

- **vesmír má specifické složení chemických prvků**

Pokud jde o „běžnou hmotu“ (tzv. baryonovou), vesmír obsahuje hlavně vodík, méně hélia (zhruba 25%), a jen nepatrné množství ostatních prvků (deuteria, lithia, uhlíku, dusíku, kyslíku atd.).

Jak předpokládal už Eddington a dokázali Atkinson s Houtermansem a Bethe s Weizsäckerem, hélium vzniká termojadernými reakcemi v nitru hvězd. Za celou dobu existence vesmíru nemohly však ani všechny hvězdy vyrobit tolik hélia, kolik skutečně pozorujeme. Z toho plyne, že většina nejlehčích prvků (He, D, Li) nutně musela vzniknout na samotném počátku vesmíru při prvotní nukleosyntéze, v naprostém souladu s teorií Gamowa, Alphera a Hermana.

Středně těžké prvky od uhlíku po železo se naopak postupně syntetizují jen v nitru hvězd, jak ukázali Opik, Salpeter, Hoyle, Fowler a manželé Burbidgeovi.

Všechny prvky těžší než železo (včetně transuranů) pak vznikají při výbuchu supernov.

- **vesmír vyplňuje reliktní mikrovlnné záření**

Z celé oblohy přichází rádiové záření, které je velmi izotropní a má spektrum absolutně černého tělesa o teplotě  $T = 2,728 K$ , jeho maximum tedy spadá do mikrovlnné oblasti.

Teoreticky ho v roce 1948 předpověděli Alpher, Gamow a Herman jako důsledek žhavého velkého třesku (později nezávisle též Dicke, Peebles, Roll a Wilkinson). Skutečně bylo pozorováno roku 1965 Penziasem a Wilsonem, za což jim byla v roce 1978 udělena Nobelova cena.

- **detailní měření nepatrných anizotropií reliktního záření**

Reliktní záření, jež v sobě nese informaci o podmínkách panujících ve velmi raném vesmíru, přece jen vykazuje drobné teplotní odchylky. Nejprve byla v roce 1976 měřením ze špionážního letadla U-2 objevena dipólová anizotropie o velikosti  $\Delta T \sim 3 mK$ . Ta je způsobena Dopplerovým jevem v důsledku vlastního pohybu Země rychlostí zhruba  $300 km/s$ .



Dne 18. 11. 1989 startovala družice COBE, první sonda určená k přesnému zmapování teploty reliktního záření v různých směrech. Objevila „zrnité“ odchylky o velikosti jen  $\Delta T \sim 20 \mu K$ . V teorii velkého třesku je lze přirozeně identifikovat jako dávné zárodky struktur, které díky gravitaci postupně vedly ke vzniku hvězd, galaxií a jejich kup. Za tento význačný objev získali Smoot a Mather Nobelovou cenu za rok 2006.

Měření družice COBE byla skvěle potvrzena a zpřesněna počátkem tohoto století družicí WMAP, která startovala 30. 6. 2001. Z naměřených odchylek reliktního záření na různých úhlových škálách (z polohy a výšky tzv. akustických píků) bylo možné dost přesně určit skutečné parametry našeho vesmíru: jeho stáří, rychlost rozpínání, složení a další cenné informace.

- **základní parametry vesmíru**

Výsledkem pětiletého měření družice WMAP a dalších projektů, jako je měření vzdálených supernov či mapování velkorozměrových struktur, jsou následující hodnoty některých klíčových parametrů našeho vesmíru:

- velký třesk se odehrál před  $13,7 \pm 0,1$  miliardami let
- Hubbleova konstanta  $H$  je dnes  $70,1 \pm 1,3 \text{ km/s/Mpc}$
- parametr prostorové plochosti je  $-0,02 < \Omega_k < 0,01$
- rudý posuv oddělení reliktního záření od hmoty  $z = 1091 \pm 1$
- toto oddělení nastalo  $376 \pm 3$  tisíc let po velkém třesku
- zážeh prvních hvězd  $432 \pm 90$  milionů let po velkém třesku

- **přítomnost „temné hmoty“ a „temné energie“**

Tato nejnovější měření přinesla i velmi překvapivé zjištění: zdá se, že ve vesmíru se kromě obvyklé hmoty (ve formě známých částic a atomů) vyskytují i „temná hmota“ a „temná energie“, a to v následujících poměrech:

- atomy a částice:  $4,6 \pm 0,1 \%$
- temná hmota:  $22,6 \pm 0,6 \%$
- temná energie:  $72,1 \pm 1,5 \%$

Obvyklá hmota tedy utváří jen nepatrnou část celého vesmíru!

Temnou hmotu (jejíž projevy pozorujeme jak na kosmologických škálách tak v dynamice hvězd a galaxií) by snad mohly tvořit dosud neznámé elektricky neutrální hmotné částice. Konkrétní kandidáty lze hledat mezi příslušnými částicemi nových (zatím ale neproověřených) jednotných teorií interakcí, supersymetrických teorií atd.

Pokud jde o temnou energii, její povaha je dosud zcela neznámá. Tato „energie vakua“ efektivně vykazuje kladnou hustotu  $\rho$  ale záporný tlak  $p$ . Podle dnešních měření je její stavová rovnice  $p = w\rho$ , kde  $w = -0,97 \pm 0,06$ . To je velmi pozoruhodné, protože hodnota  $w = -1$  přesně odpovídá kosmologické konstantě  $\Lambda$  zavedené Einsteinem už v roce 1917 jako „antigravitační efekt prázdného prostoru“. Díky této „temné energii“ alias kosmologické konstantě vesmír nyní zrychluje své rozpínání.

## Dnešní model vesmíru: $\Lambda$ CDM

V současné době tedy vše nasvědčuje tomu, že velmi dobrým popisem našeho vesmíru je globálně homogenní a izotropní model s téměř plochým euklidovským prostorem, dominantní kladnou kosmologickou konstantou ( $\Lambda$  alias temnou energií) a chladnou nebaryonovou temnou hmotou (CDM z anglického Cold Dark Matter), který z počátečního velkého třesku už téměř 14 miliard let expanduje, v této epoše dokonce čím dál rychleji. Jeho prvotní fluktuace teploty a hustoty byly adiabatické, gaussovské a téměř nezávislé na škále a postupně vedly ke vzniku celé hierarchie pozorovaných struktur a objektů.

V kontextu obecné teorie relativity tento model spadá do kategorie friedmannovských prostoročasů, které v roce 1933 popsal Lemaître. Příslušná funkce expanze  $R(t)$  je řešením diferenciální rovnice

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{8\pi G}{3c^4} \left(\frac{\rho_{\text{látka}}}{R^3} + \frac{\rho_{\text{záření}}}{R^4}\right),$$

kde  $\Lambda > 0$  je kosmologická konstanta,  $k \approx 0$  charakterizuje prostorovou křivost,  $G$  je gravitační konstanta,  $c$  je rychlost světla, konstanta  $\rho_{\text{látka}}$  určuje množství běžné hmoty a temné hmoty ve vesmíru, zatímco  $\rho_{\text{záření}}$  určuje množství reliktního záření.

Je vidět, že v blízkosti počáteční singularity velkého třesku, tedy pro  $R \rightarrow 0$ , je pro dynamiku rozpínání vesmíru dominantní poslední člen odpovídající záření, takže  $R(t) \sim \sqrt{t}$ . Naopak, pro  $R \rightarrow \infty$  převažuje kosmologická konstanta  $\Lambda$  a příslušné asymptotické řešení rovnice je  $R(t) \sim \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t\right)$ . Na počátku se tedy vesmír rozpínal velkou rychlostí, přičemž vlivem gravitace hmoty tato rychlost klesala. Postupně ale čím dál více přicházel ke slovu antigravitační účinek kosmologické konstanty (temné energie vakua), a vesmír proto naopak začal zrychlovat. Nakonec přejde do fáze exponenciálně rychlé expanze odpovídající de Sitterově modelu z roku 1917.

Zdá se, že uvedený kosmologický scénář souhlasí s řadou podrobných a pečlivých astronomických měření velkorozměrové struktury vesmíru, svítivostmi vzdálených supernov či s anizotropiemi reliktního mikrovlnného záření. Uvidíme, zda tento model vesmíru bude potvrzen a upřesněn i dalšími pozorováními, která dnes probíhají anebo se připravují. Především lze dychtivě očekávat výsledky evropské družice *Planck*, která 14. května 2009 úspěšně odstartovala s úkolem o řád přesněji proměřit teploty reliktního záření.

## Doporučená literatura

SIMON SINGH: *Velký třesk*, Argo/Dokořán, Praha, 2007.

PETER COLES: *Kosmologie*, Dokořán, Praha, 2007.

ROBERT KIRSHNER: *Výstřední vesmír*, Paseka, Praha, 2005.

JAN HORSKÝ, JAN NOVOTNÝ, MILAN ŠTEFANÍK: *Úvod do fyzikální kosmologie*, Academia, Praha, 2004.

JOSEPH MCÉVOY, OSCAR ZARATE: *Stephen Hawking*, Portál, Praha, 2002.

JOSIP KLECZEK: *Vesmír kolem nás*, Albatros, Praha, 1986.