

Jiří Podolský

James Peebles získal Nobelovu cenu 2019 za svůj celoživotní příspěvek kosmologii

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 65 (2020), No. 1, 1–9

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/148110>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2020

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



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

James Peebles získal Nobelovu cenu 2019 za svůj celoživotní příspěvek kosmologii

Jiří Podolský

Abstrakt. Královská švédská akademie věd udělila Nobelovu cenu za fyziku roku 2019 třem vědcům, kteří významně přispěli ke studiu vesmíru. Polovinu ceny získal jeden z předních žijících kosmologů James Peebles. Od počátku 60. let systematicky a důkladně studuje fyzikální procesy odehrávající se v raném vesmíru i během jeho následné evoluce. Zásadně tím ovlivnil moderní kosmologii, z níž se nyní stala ucelená a věrohodná vědní disciplína opírající se o logický systém teoretických modelů podporovaný velmi přesnými pozorováními. Peebles je odborníkem především na primordiální vznik prvků, reliktní mikrovlnné záření a formování galaktických struktur. Jeho vědecké práce, knihy a učebnice inspirovaly bezpočet kolegů i studentů.

1. Zlatý věk kosmologie

Těmito slovy charakterizovala poslední půlstoletí sama švédská akademie. Vlastně to platí pro celé uplynulé století, období usilovného pátrání po původu a vývoji celého kosmu. Pátrání, ve kterém jsme byli – možná překvapivě – velmi úspěšní. Jistě díky nebyvalému technologickému pokroku, který nám nyní umožňuje podrobně mapovat a studovat i ten nejhlubší vesmír. Ale především zásluhou originální invence mnoha vědců, přímo navazujících na hluboký vhled otců-zakladatelů fyzikální kosmologie: Einsteina, Friedmanna, Lemaître, Hubbla, Gamowa, Hoyla a celé řady dalších, včetně letošního laureáta.

Zde je na místě stručně připomenout dějiny kosmologie 20. století a roli, kterou při tom zmínění aktéři sehráli. Na počátku byl Einstein. V roce 1915 dobudoval své monumentální dílo, relativistickou teorii gravitace známou pod jménem *obecná relativita*. Tato dosud nepřekonaná teorie tvoří koncepční rámec popisu dynamického kosmu. První matematický model celého vesmíru v kontextu obecné relativity vytvořil sám Einstein v roce 1917. Byl to statický kosmos, ani astronomové totiž tehdy ještě nevěděli, že ve vesmíru existují vzdálené galaxie, které se od sebe vzdalují. . . Je pozoruhodné, že právě kvůli dosažení domnělé stacionarity musel Einstein do svých rovnic tenkrát zavést *kosmologickou konstantu*. Podivnou „antigravitační“ ingredienci, která po vytvoření dynamických Friedmannových modelů *expandujícího vesmíru* byla zapomenuta, ale v 21. století se opět ocitla ve světle reflektorů, tentokrát pod líbivým pseudonymem *temná energie*.

Fyzikální důsledky rozpínání vesmíru si jako první uvědomil abbé Lemaître. Expandující vesmír nutně chladne, průměrná hustota hmoty v něm klesá. V minulosti ale naopak musel být nesmírně žhavý a hustý. Tak se zrodila myšlenka *velkého třesku*:

Prof. RNDr. JIŘÍ PODOLSKÝ, CSc., DSc., Ústav teoretické fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, Praha, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8,
e-mail: podolsky@mbx.troja.mff.cuni.cz

vesmír se vynořil ze žhavé výhně, vytryskl z primordiální exploze doslova kosmických dimenzí. Jeho expanze pokračuje dodnes.

Rozpínání vesmíru potvrdila astronomická pozorování. Rudý posuv spektrálních čar ve světle galaxií, který je kvůli kosmologickému Dopplerovu jevu úměrný rychlosti jejich vzdalování od nás, pozoroval Slipher už v roce 1912. Jeho měření doplnili koncem 20. let Hubble s Humasonem na několik desítek objektů. A v těchto letech Hubble objevil *přímou úměrnost* mezi vzdáleností dané galaxie a jejím rudým posuvem. Tato univerzální korelace, dnes nazývaná *Hubbleův-Lemaîtreův zákon*, byla explicitně zformulována roku 1929 a následně čím dále přesněji ověřována.

Změříme-li takto *rychlost rozpínání* vesmíru, můžeme odhadnout jeho *stáří*. Těžkým problémem ale je správně určit vzdálenosti galaxií. Dnes víme, že Hubble kosmické vzdálenosti podcenil zhruba 7krát. Konstantu úměrnosti tehdy stanovil na 500 km/s na jeden megaparsek, přičemž dnešní správná hodnota je přibližně 70 km/s. To mělo nepříjemný následek: *zdálo se, že vesmír je starý jenom 2 miliardy let*. A to bylo pro astronomy opravdu málo, také geologové v té době už věděli, že Země je starší.

Teorii velkého třesku proto zpočátku téměř nikdo nevěřil. Musela tvrdě bojovat o své přežití. Díky enormnímu úsilí hrstky odhodlaných jedinců, přesvědčených o správnosti myšlenky žhavého počátku našeho vesmíru, byly krok za krokem odstraňovány chyby a odhalována pravda. V čele této vědecké bitvy stanul Gamow. Se svými žáky Alpherem a Hermanem začali systematicky budovat *fyzikální teorii* velkého třesku. Použili tehdy čerstvě nalezené zákony kvantové mechaniky a postupně objevované zákonitosti jaderné fyziky. Soustředili se na otázku *prvotní nukleosyntézy*, tedy problém vzniku jader všech prvků a izotopů. Správně vytušili, že většina kosmického helia vznikla fúzí vodíkových jader ihned po velkém třesku, předpověděli dokonce správný poměr vodíku a helia. Měli však problém objasnit takto zastoupení těžších prvků.

Zcela správně si též uvědomili, že jakmile při rozpínání vesmíru došlo k ochlazení vodíkového a heliového plazmatu pod teplotu zhruba 3 tisíce stupňů, musela nastat rekombinace volných elektronů a jader v elektricky *neutrální atomy*. Vesmír náhle zprůhledněl: od hmoty se oddělilo elektromagnetické záření a od té doby rovnoměrně zaplňuje celý kosmický prostor. Toto *reliktní záření* je „světelnou ozvěnou velkého třesku“, jasným svědectvím o žhavém počátku vesmíru. Alpher s Hermanem a Gamow v roce 1948 odhadli (jejich předpověď se ukázala být až překvapivě přesná), že toto záření se vynořilo z „prvotní mlhy“ asi 300 tisíc let po velkém třesku a že jeho dnešní teplota by měla být kolem 5 K. Kdyby se ho podařilo zachytit pomocí radioteleskopů, teorie žhavého velkého třesku by byla nezpochybnitelným způsobem prokázána.

2. Triumf velkého třesku

V příběhu kosmologie 20. století se ocitáme na konci 40. let. Skončila světová válka, která přinesla utrpení stovkám milionů lidí. Stala se však i katalyzátorem technologického vývoje, z něhož mohla začít těžit fyzika a astronomie. Vylepšení vojenských radarů napomohlo enormnímu rozvoji *radioastronomie*, která záhy pomohla stanovit jednoznačného vítěze *v souboji teorie velkého třesku* s konkurenční teorií *stacionárního vesmíru*, se kterou v té době přišli britští vědci Hoyle, Gold a Bondi. Podle ní se vesmír sice rozpíná, ale jeho hustota přesto zůstává stejná, protože se prý všude stále „rodí nová hmota“. Takový vesmír by byl věčný a v průměru stále stejný.

Jak je podrobně popsáno například v knize *Velký třesk* od Simona Singha [15], která skvěle rozvíjí klasické Weinbergovo dílo *První tři minuty* [16], nejprve se podařilo *objasnit paradox stáří vesmíru*. Astronom Baade a po něm Sandage upřesnili škálu vzdáleností galaxií a ukázali, že velký třesk se odehrál mnohem dříve, než se domníval Hubble: zhruba před 10 miliardami let, což je plně v souladu se stářím Země, hvězd a galaxií.

Vyřešila se i *otázka vzniku těžkých prvků*. Hoyle se spolupracovníky ukázal, že tyto prvky vznikají postupnou jadernou fúzí v nitrech hvězd. Problém nukleosyntézy tak byl koncepčně vyřešen: lehké prvky vznikají především v raném vesmíru, velmi krátce po velkém třesku (jak se správně domníval Gamow), těžké prvky ale vznikají až později v umírajících hvězdách (jak tvrdil a prokázal Hoyle).

Zásluhou prudce se rozvíjející radioastronomie byly počátkem 60. let *objeveny mladé aktivní galaxie a kvazary*. Ty se ovšem nacházely *pouze ve vzdáleném vesmíru*. Nerovnoměrné rozložení velmi zářivých objektů bylo ve zjevném rozporu s modelem stacionárního vesmíru, podle kterého by vesmír měl být všude a všdycky zhruba stejný. Naopak ho lze zcela přirozeně vysvětlit evolučními procesy ve vesmíru, který expanduje ze žhavého velkého třesku.

Definitivní porážka teorie stacionárního vesmíru přišla vzápětí. V roce 1964 objevili zaměstnanci Bellových laboratoří Penzias a Wilson pomocí velmi citlivé antény v Crawford Hillu, New Jersey, *reliktní mikrovlnné záření*, které v roce 1948 předpověděli Alpher, Gamow a Herman. Mělo přesně očekávaný charakter: přicházelo rovnoměrně z celé oblohy a jeho teplota byla 3 K. To byl naprostý triumf teorie velkého třesku. Pod tíhou nových experimentálních důkazů téměř všichni kosmologové pak přešli do tábora stoupců tohoto modelu vesmíru.

Penzias s Wilsonem získali v roce 1978 Nobelovu cenu. Jejich objev při tom byl dílem náhody. Primárně měli za úkol zkoumat zdroje rušení telekomunikačních signálů, pak měli provést rutinní přehlídku rádiových zdrojů na obloze. O teoretické předpovědi reliktního mikrovlnného záření nic netušili. Kdyby nebyli trpěliví, precizní a nepřálo jim štěstí, záření z raného vesmíru by objevili (možná o rok či dva později) vynikající kosmologové a astrofyzici z jen 50 kilometrů vzdálené Princetonské univerzity: Robert Dicke a James Peebles. Stačilo málo, a Peebles se mohl stát laureátem Nobelovy ceny nikoli letos (viz obr. 1), ale už před čtyřiceti či padesáti lety...

3. Přínos Jamese Peeblese kosmologii

Skutečný běh událostí byl ale jiný: koncem roku 1964 se Penzias zúčastnil astronomické konference, kde se o problému šumu v jejich anténě náhodou zmínil kolegovi Burkemu z MIT. Ten ho o pár měsíců později informoval, že se mu do ruky dostala pracovní verze připravovaného článku kosmologů Dickeho a Peeblese, ve kterém (zcela nezávisle na předchozí práci Gamowa a jeho studentů) předpověděli všudypřítomné reliktní záření jako pozůstatek žhavého velkého třesku. I to, že by mělo být zachytitelné na vlnových délkách řádově jeden milimetr. Penzias Dickemu zavolal a sdělil mu, že právě takové záření s Wilsonem již detekovali. Dicke byl v šoku. Jeho skupina totiž zrovna měla jednání, na němž diskutovali o konstrukci detektoru reliktního záření. Položil telefon, otočil se k mladším kolegům a prohlásil: „Chlapci, tak už nás předběhli.“



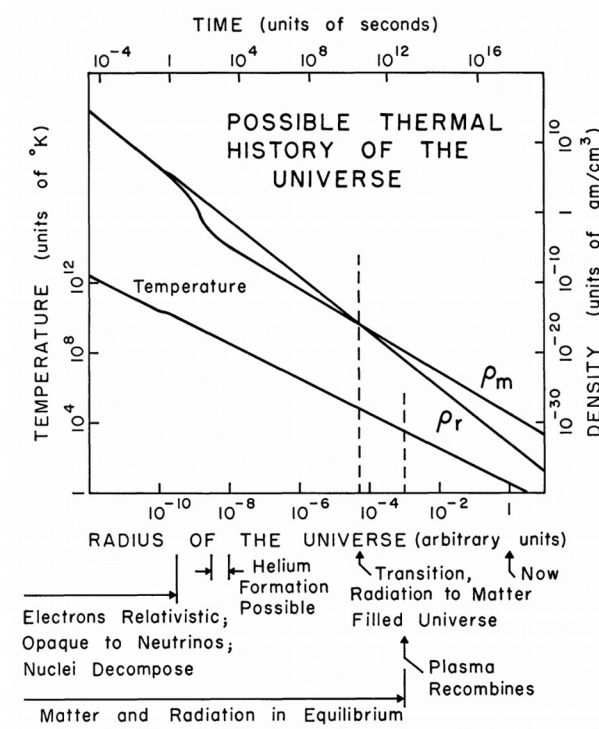
Obr. 1. James Peebles, jeden ze tří laureátů Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2019, získal polovinu ceny „za teoretické objevy ve fyzikální kosmologii“ (Autoři fotografií A. Mahmoud a N. Adachi, © Nobel Media)

Hned druhý den Dickeho tým navštívil Penziase a Wilsona. Prohlédli si jejich radioteleskop, prostudovali data. Vše souhlasilo. Výsledky, referující o objevu izotropního mikrovlnného záření z oblohy o teplotě 3,5 K, pak obě skupiny publikovaly současně, a to v létě roku 1965 v časopisu *Astrophysical Journal*. Článek Penziase a Wilsona [13] jen skromně na pouhých třech stránkách oznamoval, co přesně naměřili, objevitelé se nepouštěli do vlastních interpretací. To bylo ponecháno Dickemu s Peeblesem a jejich spolupracovníkům-experimentátorům Rollovi a Wilkinsonovi, kteří ve stejném čísle časopisu otiskli sesterský článek [1]. Ten dával do souvislosti nová měření s teoretickou předpovědí mnoho miliard let staré světelné ozvěny velkého třesku (klíčový graf článku je na obr. 2). Bylo to krásné finále: Dickeho a Peeblesův tým měl teorii, ale zatím žádná pozorovací data, zatímco Penzias s Wilsonem měli pozorování, ale bez teoretického vysvětlení. Spojení práce obou týmů přineslo fantastický triumf kosmologického modelu velkého třesku. Peebles později označil objev reliktního záření za nepochybně největší úspěch během celé své kariéry.

V polovině 60. let se Peebles soustředil také na problematiku nukleosyntézy ve velkém třesku. Významné jsou zejména jeho dvě práce [4], [5] z roku 1966 věnované *prvotnímu zastoupení helia* a fyzikálnímu rozboru *okolností jeho vzniku* v prvních minutách existence vesmíru.

Současně začal systematicky studovat i problém *formování kosmických struktur*, zejména *vznik galaxií a jejich kup*. Už v práci [3] z roku 1965 Peebles ukázal, že reliktní mikrovlnné záření v tom hraje významnou roli. Mezi prvními také pochopil, že jeho podrobná analýza poskytuje klíč k poznání tohoto hlavního evolučního procesu shlukování hmoty.

Když bylo reliktní záření v roce 1964 objeveno, prokázalo *nebývale velkou uniformitu celého pozorovaného vesmíru*. Teplota záření byla totiž *stejná ve všech směrech na obloze*. To nezvratně prokázalo, že vesmír starý ani ne 400 tisíc let byl jako celek



Obr. 2. Klíčový graf článku [1]. Díky s Peeblesem na něm reprezentují historii vesmíru. Vodorovně je vynášén čas od velkého třesku (v sekundách) respektive velikost vesmíru. Svisle je vynášena klesající teplota záření T (škála vlevo) a klesající hustota hmoty ρ_m a hustota reliktního záření ρ_r (škála vpravo). Oddělení reliktního záření přibližně 400 tisíc let po velkém třesku je vyznačeno svislou čárkovanou čarou napravo dole (šipka s popisem „Plasma Recombines“)

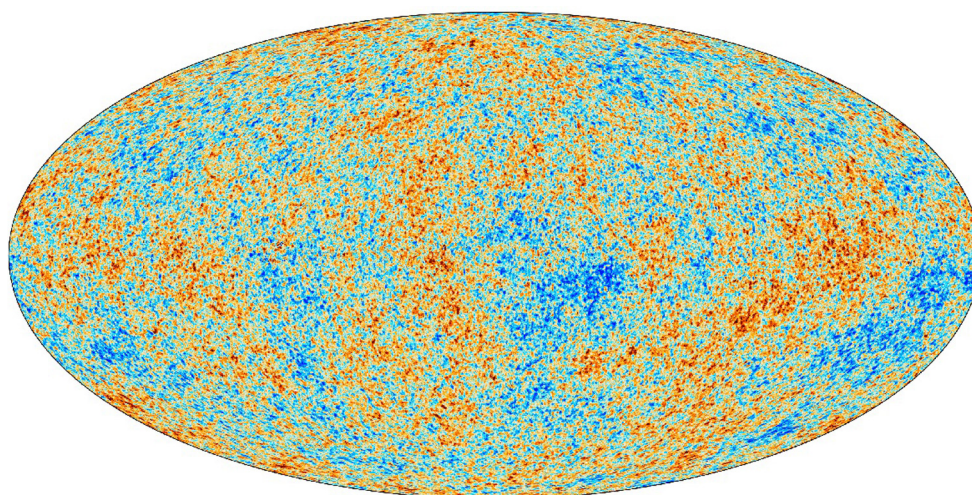
homogenní. A také že jeho hmotný obsah byl v termodynamické rovnováze, protože detekované reliktní záření mělo *dokonalé planckovský charakter*. James Peebles si ale uvědomil, že toto záření by přesto mělo vykazovat nepatrné fluktuace, *drobné teplotní anizotropie*. Při velmi pečlivém měření bychom na obloze měli spatřit spoustu teplejších a naopak chladnější skvrnek, odchylek od průměrné teploty záření 2,7 K. Tyto teplotní skvrnky by měly odpovídat *oblastem s menší anebo větší hustotou hmoty* v tehdejší vesmíru (takzvaný Sachsův–Wolfův efekt). V oblastech s větší hustotou se hmota postupem času stále více koncentrovala díky vlastní gravitační přitažlivosti. Tak vznikaly zárodky hvězd, galaxií a jejich kup.

Tento proces vzniku hierarchických struktur hmoty je hodně složitý a Peebles se jako jeden z prvních pustil do jeho pečlivého studia, popisu a numerického simulování. Již v roce 1970 publikoval průkopnickou práci [12] o prvotních *adiabatických fluktuacích v rozpínajícím se vesmíru*. V práci [2] z roku 1973 zase s kolegou zformulovali takzvané *Ostrikerovo–Peeblesovo kritérium*, které charakterizuje stabilitu zformovaných galaxií obklopených rozsáhlým halem temné hmoty.

Otázka vzniku galaktických struktur ve standardním modelu velkého třesku byla zásluhou Jamese Peeblesa a dalších fyzikálních kosmologů v principu ujasněna na počátku 90. let. V roce 1992 americká družice *COBE* opravdu naměřila anizotropie teploty reliktního záření. Byly skutečně nepatrné: teplotní fluktuace v různých směrech na obloze se od průměrné hodnoty lišily řádově jenom o $\delta T/T \sim 10^{-5}$. Což byla přesně hodnota (ani menší, ani větší), jakou předpověděl Peeblesem studovaný model vzniku kosmických struktur z prvotních adiabatických fluktuací.

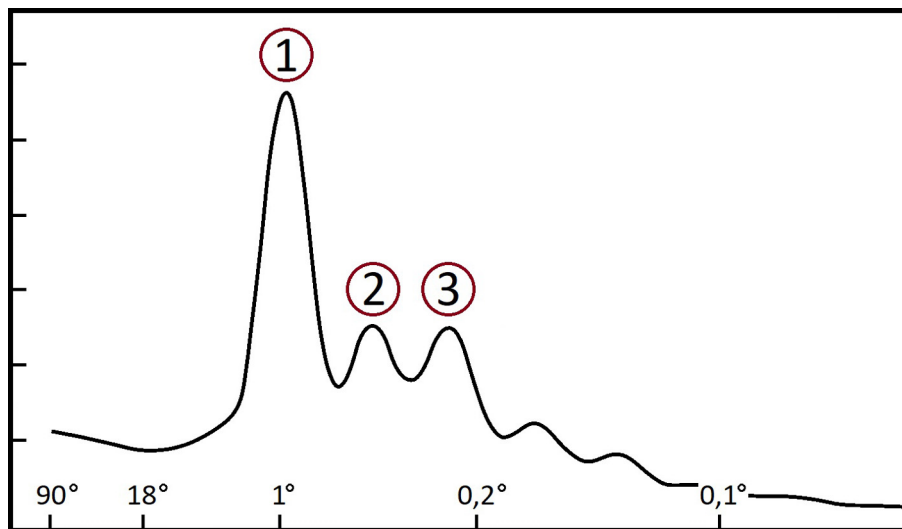
Ve velmi raném vesmíru zaplněném horkým plazmatem se v důsledku perturbací šířily akustické vlny. S ohledem na konkrétní fyzikální podmínky měly charakteristické vlnové délky, hustotní vibrace oscilovaly tam a zase zpět. Tyto hmotnostní vlny byly poté *otřítěny* do anizotropií teploty reliktního záření a zůstaly v něm po miliardy let uchovány jako poselství, svědectví o stavu tehdejšího vesmíru. Stačí toto poselství jen zachytit a umět správně dešifrovat. Což oboje se podařilo.

Po *COBE* proměřila anizotropie reliktního mikrovlnného záření mnohem přesněji americká družice *WMAP* vypuštěná v roce 2001 (dosáhla rozlišení 0,3 úhlového stupně a citlivosti 20 μK) a po ní s ještě větší přesností evropská družice *Planck* vypuštěná v roce 2009 (rozlišení 0,1 úhlového stupně, citlivost až 3 μK). Obě tyto technologicky pokročilé družice nám poskytly dokonalý obraz celého vesmíru, když mu bylo jen 379 tisíc let (dnes je starý 13,8 miliardy let), viz obr. 3.



Obr. 3. Velmi detailní mapa teplotních anizotropií reliktního záření, které přichází z celé oblohy, jak ji v nedávné době pořídila družice *Planck* Evropské kosmické agentury ESA. Podrobné informace lze najít ve volně dostupném přehledovém článku *Planck 2018 results I*, arXiv:1807.06205, červenec 2018 © ESA/Planck Collaboration

Na snímku vidíme spoustu teplejších a studenějších skvrnek, které mají různé velikosti. Lze provést jejich statistickou analýzu, zjistit *kolik je na obloze skvrn určité velikosti* neboli určit spektrum teplotních korelací mezi různými směry. Výsledek této analýzy pečlivě naměřených dat je schematicky znázorněn na obr. 4.



Obr. 4. Spektrum malých anizotropií v teplotě reliktního mikrovlnného záření. Z polohy a výšky lokálních maxim 1, 2 a 3 lze určit poměrové zastoupení běžné hmoty, temné hmoty a temné energie v našem vesmíru. První lokální maximum je největší a leží na škále přibližně jednoho úhlového stupně

Křivka má pěkný spojitý průběh, je na ní několik maxim a minim. *Z polohy a relativní velikosti těchto lokálních extrémů lze určit fyzikální parametry vesmíru*, především jeho stáří a složení. Velmi zhruba platí toto: První maximum ukazuje, že geometrie kosmického prostoru je *globálně plochá*, tedy že na největších vzdálenostech je prostě eukleidovská (rovnoběžky se neprotínají). Druhé maximum říká, že *obvyklá* (baryonová) viditelná hmota tvoří jenom 5 % obsahu vesmíru. Charakter třetího maxima pak implikuje, že přibližně 26 % vesmíru tvoří nesvítilící *temná hmota*. Jenom 31 % vesmíru je tedy složeno z hmoty, zbylých 69 % musí mít zcela jiný charakter. Tato dominantní složka vesmíru se dnes módně nazývá *temná energie*. Ukazuje se ale, že její účinky jsou efektivně úplně stejné, jako kdyby se v prázdném vesmírném prostoru všude uplatňovala *kladná kosmologická konstanta*. Ta, kterou Einstein zavedl ve vůbec prvním kosmologickém článku z roku 1917. Má antigravitační účinky, způsobuje *zrychlování kosmické expanze*.

Za tyto kosmologické objevy z poslední doby, jež vedly k přesnému určení hlavních parametrů vesmíru, byly nedávno uděleny již *dvě Nobelovy ceny*, a to v letech 2006 a 2011. Také k tomuto zásadnímu průlomů v poznání kosmu přispěl James Peebles. Už v roce 1982 let přišel s myšlenkou [8], že by vesmír mohl být vyplněn *studenou temnou hmotou*, kterou nemůžeme běžným způsobem pozorovat, protože nesvítilí. Měla by být tvořena pomalu se pohybujícími těžkými částicemi, které neinteragují elektromagneticky. Jejich gravitační účinky ale v raném vesmíru pomáhaly zformovat galaktické struktury. A v roce 1984 do dnešního standardního modelu světa integroval i temnou energii [9], znovu oživil Einsteinovu kosmologickou konstantu. Více o tom lze najít v jeho významném přehledovém článku [14].

Peeblesovu stopu tedy najdeme ve všech významných pokrocích kosmologie od objevu reliktního mikrovlnného záření v roce 1965 dodnes. Po celou dobu – téměř šedesát let – stojí v čele tohoto fascinujícího oboru.

4. Život a dílo Jamese Peeblese: shrnutí

Jim Peebles (plným jménem Phillip James Edwin Peebles) se narodil 25. dubna 1935 ve Winnipegu, hlavním městě kanadské provincie Manitoba. Po bakalářském studiu na tamní univerzitě přešel v roce 1958 na Princetonskou univerzitu, kde v roce 1962 získal doktorát pod vedením Roberta Dickeho (1916–1997), který se v té době proslavil jako přední odborník na testy obecné teorie relativity, především principu ekvivalence. S Princetonom pak Peebles spojil celý svůj profesní život. V některých letech působil i v proslulém Ústavu pro pokročilá studia, u jehož zrodu stál kdysi Albert Einstein.

Od svých studentských let se systematicky zabývá různými aspekty fyzikální kosmologie, zejména procesy odehrávajícími se na samém počátku vesmíru, problematikou následného formování hmotných struktur a celkové evoluce kosmu. Svou celoživotní prací napomohl tomu, že ze spekulativní kosmologie se stala exaktní přírodní věda.

Peebles je všeobecně považován za jednoho z nejvýznamnějších žijících astrofyziků a teoretických kosmologů. Zásadním způsobem přispěl k poznání primordiální nukleosyntézy, charakteru reliktního mikrovlnného záření, formování galaktických struktur a k prokázání existence temné hmoty i temné energie.

Neméně významná je i jeho dlouholetá práce pedagogická. Je autorem několika unikátních učebnic a odborných monografií. Peeblesovy knihy o fyzikální kosmologii [6], [11], ve kterých jsou ověřené zákony fyziky aplikovány na celý vesmír, se staly doslova legendami, prostudovat je musí každý nový adept oboru. Totéž platí o monografii věnované velkorozměrové struktuře vesmíru [7]. Mimo jiné napsal i učebnici kvantové mechaniky [10]. Bez přehánění lze říci, že inspiroval celou generaci teoretiků i pozorovatelů.

Peebles je nositelem dlouhé řady prestižních ocenění za fyziku a astronomii. Nyní k nim tedy přibyl i to nejvýznamnější: „za teoretické objevy ve fyzikální kosmologii“ získal Nobelovu cenu. Není pochyb o tom, že plným právem.

Poděkování. Děkuji Grantové agentuře České republiky za dlouholetou podporu mého výzkumu, aktuálně projektu číslo 20-05421S *Přesné prostoročasy v Einsteinově teorii, kvadratické gravitaci a dalších zobecněních*.

L i t e r a t u r a

- [1] DICKE, R. H., PEEBLES, P. J. E., ROLL, P. G., WILKINSON, D. T.: *Cosmic black-body radiation*. *Astrophys. J.* 142 (1965) 414–419.
- [2] OSTRIKER, J. P., PEEBLES, P. J. E.: *A numerical study of the stability of flattened galaxies: or, can cold galaxies survive?* *Astrophys. J.* 186 (1973) 467–480.
- [3] PEEBLES, P. J. E.: *The black-body radiation content of the Universe and the formation of galaxies*. *Astrophys. J.* 142 (1965) 1317–1326.
- [4] PEEBLES, P. J. E.: *Primordial helium abundance and the primordial fireball I*. *Phys. Rev. Lett.* 16 (1966) 410–413.

- [5] PEEBLES, P. J. E.: *Primordial helium abundance and the primordial fireball II*. Astrophys. J. 146 (1966) 542–552.
- [6] PEEBLES, P. J. E.: *Physical cosmology*. Princeton University Press, Princeton, 1971.
- [7] PEEBLES, P. J. E.: *The large-scale structure of the Universe*. Princeton University Press, Princeton, 1980.
- [8] PEEBLES, P. J. E.: *Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations*. Astrophys. J. 263 (1982) L1–L5.
- [9] PEEBLES, P. J. E.: *Tests of cosmological models constrained by inflation*. Astrophys. J. 284 (1984) 439–444.
- [10] PEEBLES, P. J. E.: *Quantum mechanics*. Princeton University Press, Princeton, 1992.
- [11] PEEBLES, P. J. E.: *Principles of physical cosmology*. Princeton University Press, Princeton, 1993.
- [12] PEEBLES, P. J. E., YU, J. T.: *Primeval adiabatic perturbation in expanding universe*. Astrophys. J. 162 (1970) 815–836.
- [13] PENZIAS, A. A., WILSON, R. W.: *A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s*. Astrophys. J. 142 (1965) 419–421.
- [14] RATRA, B., PEEBLES, P. J. E.: *The cosmological constant and dark energy*. Rev. Modern Phys. 75 (2003) 559–606.
- [15] SINGH, S.: *Velký třesk*. Dokořán a Argo, Praha, 2007.
- [16] WEINBERG, S.: *První tři minuty*. Mladá fronta, Praha, 1983.