

Od Lemaîtrea k reliktnímu záření a Jamesi Peeblesovi

Jiří Chýla

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 1999/2, 182 21 Praha 8; chyla@fzu.cz

Polovina Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2019 byla udělena americkému kosmologovi Jamesu Peeblesovi za „teoretické objevy ve fyzikální kosmologii“. V tiskové zprávě je tato charakteristika rozvedena slovy:

„Peeblesův vhled do fyzikální kosmologie obohatil celý tento obor a během posledních padesáti let položil základy pro transformaci kosmologie ze spekulací na vědu. Teoretický rámec, který vyvinul od poloviny šedesátých let, představuje základ našeho současného chápání vesmíru.

Model velkého třesku popisuje vesmír od jeho prvních okamžiků před téměř 14 miliardami let, kdy byl velmi horký a hustý. Od té doby se vesmír rozpíná a chladne. Necelých 400 000 let po velkém třesku se vesmír stal pro hmotu průhledným a světelné paprsky mohly cestovat prostorem. I dnes je toto pradávnné záření všude kolem nás a zakódováno v něm se skrývá mnoho tajemství vesmíru. S využitím svých teoretických nástrojů a výpočtů James Peebles dokázal interpretovat tyto stopy z doby mládí vesmíru a objevit nové fyzikální procesy.“

Letošní Nobelova cena za fyziku pro Jamese Peeblese (1935) je již třetí Nobelovou cenou spojenou s objevem a vlastnostmi reliktního záření. Po roce 1978, kdy ji získali Robert Wilson a Arno Penzias „za objev kosmického mikrovlnného reliktního záření“ ji v roce 2006 získali John Mather a George Smoot „za objev charakteru a anisotropie kosmického reliktního záření“.

Smyslem tohoto textu je připomenout, jak model velkého třesku vznikl, kdo a jak se na jeho formulaci podílel, proč právě objev reliktního záření v roce 1965 byl pro jeho přijetí zcela zásadní a jak k němu letošní laureát přispěl. Aby přelomový význam tohoto objevu byl pochopitelný a abychom docenili, jak těžko se rodila myšlenka, že vesmír má počátek v čase, musíme začít před sto lety a připomenout dva klíčové objevy, které objevu reliktního záření předcházely, a několik osobností, které při tom hrály klíčové role.

Vesmír je přece stálý

V roce 1917 aplikoval Einstein svou novou obecnou teorii relativity na idealizovaný případ vesmíru, v němž je hmota rozložena v prostoru homogenně. Předpokládal, že ze svých rovnic dostane stacionární řešení, které by odpovídalo tehdejšímu znalostem o stavu vesmíru. Protože hmota na sebe působí přitažlivou silou, musel do svých rovnic přidat tzv. kosmologickou konstantu, která přitažlivost hmoty kompenzuje a efektivně působí jako antigravitace. Jeho řešení odpovídalo troj-



Obr. 1 James Peebles

rozměrnému povrchu čtyřrozměrné koule s konečným poloměrem. S tím byl na čas spokojen.

Ale tak to být nemusí

V roce 1922 leningradský matematik *Alexandr Fridman* (1888–1925) přepsal Einsteinovy rovnice pro homogenní a izotropní vesmír do tvaru, který měl názorný fyzikální význam [1]. V něm vystupuje veličina $R(t)$, která popisuje, jak závisí na čase vzdálenosti kterékoliv dvojice bodů v trojrozměrném prostoru. Jeho krok lze pro případ kladné křivosti prostoru přiblížit jednoduchou analogií s nafukováním míče na obrázku 3. Metriku na povrchu koule, tj. předpis, jak spočítat vzdálenosti dvou bodů, lze napsat různým způsobem, například pomocí úhlů takto

$$d\sigma^2 = R^2(t)(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) = R^2(t)d\Omega_2, \quad (1)$$

kde $R(t)$ je poloměr koule, který může záviset na čase a $0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Souřadnice θ , φ se nazývají „spolupohybující“ (anglicky *comoving*) protože objekty s těmito souřadnicemi na nich zůstávají i při nafukování míče, zatímco vzdálenost dvou bodů na povrchu koule při nafukování roste. Podobný výraz napsal Fridman pro metriku trojrozměrného povrchu čtyřrozměrné koule

$$d\sigma^2 = R^2(t)(d\chi^2 + \sin^2\chi(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)) \quad (2)$$

a pro metriku čtyřrozměrného prostoročasu v rámci obecné teorie relativity

$$ds^2 \equiv c^2 dt^2 - d\sigma^2 = c^2 dt^2 - R^2(t)d\Omega_3, \quad (3)$$

Bez ztráty na obecnosti lze položit $d\varphi = d\theta = 0$ a pro vzdálenost dvou bodů pevně svázaných s povrchem

» Peeblesův vzhled do fyzikální kosmologie obohatil celý tento obor a během posledních padesáti let položil základy pro transformaci kosmologie ze spekulaci na vědu. «

koule dostaneme z (2) výraz $d\sigma = R(t)d\chi$ a integraci vztah mezi fyzikální vzdáleností (*proper distance* v angličtině) $D(t)$ a bezrozměrnou, na čase nezávislou veličinou χ , která se nazývá „spolupohybující“ vzdálenost.

$$D(t) = R(t)\chi \quad (4)$$

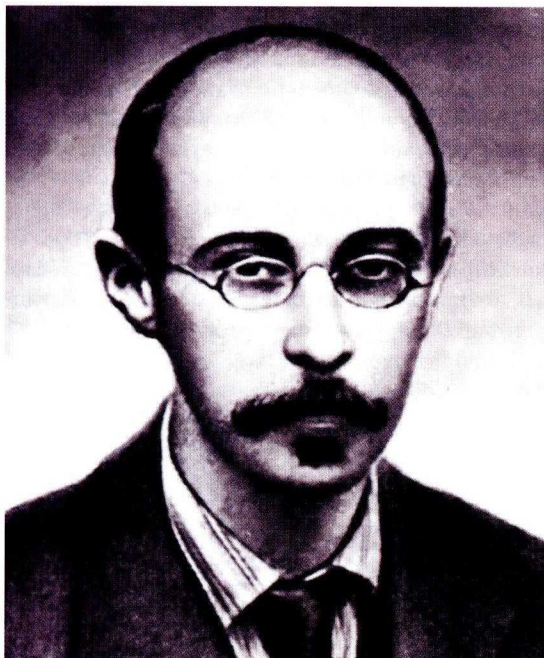
Pro škálovací faktor $R(t)$ Fridman odvodil z Einsteinových rovnic dvě rovnice, které nesou jeho jméno a které jsou dodnes základním nástrojem pro popis vývoje vesmíru:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\lambda c^2}{3}, \quad (5)$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho(t) + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\lambda c^2}{3}, \quad (6)$$

kde tečky nad R znamenají časové derivace, ρ je prostorová hustota energie, p je tlak, G je Newtonova gravitační konstanta, λ je Einsteinova kosmologická konstanta a $k = (1, 0, -1)$ odpovídají trojrozměrnému prostoru s konstantní kladnou křivostí, plochému prostoru a prostoru se zápornou křivostí. Druhá rovnice je analog druhého Newtonova zákona pro pohyb hmotného bodu v gravitačním poli. Zatímco normální hmota působí přitažlivě, tj. způsobuje zpomalování rozpínání, kosmologická konstanta má opačný vliv a rozpínání zrychluje. Einstein ji zavedl právě proto, aby dosáhla rovnováhy mezi těmito dvěma vlivy, protože byl přesvědčen, že vesmír je ve stacionárním stavu. V práci [1] Fridman diskutoval různé možnosti nestacionárního vesmíru, mimo jiné i případ uzavřeného vesmíru plného hmoty, jehož poloměr se po počátečním růstu od nuly zastaví a po konečné době se smřtí zpět až do nuly. Fridman byl ovšem především matematik a jeho práce sice ukázala, že Einsteinovy rovnice připouštějí řešení závislé na čase, ale dosažitelnosti podle něj neumožňovaly určit, jakému řešení Einsteinových rovnic náš vesmír odpovídá. Fridman zjevně neznal již tehdy existující výsledky měření rudého posuvu světla od vzdálených galaxií, které sehrály v dalším vývoji kosmologie klíčovou roli.

Reakce Einsteina na Fridmanův článek na sebe nenechala dlouho čekat a v krátké *Poznámce k práci*



Obr. 2 Alexander Fridman

<https://ccf.fzu.cz>

A. Fridmana [2] Einstein tvrdil, že Fridmanovo řešení není ve skutečnosti s rovnicemi obecné relativity slučitelné. O osm měsíců později Einstein v další krátké notici [3] přiznal, že početní chybu udělal on sám, a, byť nerad, uznal, že jeho rovnice připouštějí kromě statických i dynamická řešení. Představa, že sám prostor se rozpíná nebo smřštuje, byla ovšem pro Einsteina (a nejen pro něj) až do počátku 30. let nepřijatelná a práce Fridmana neměly téměř žádný ohlas.

Vesmír se opravdu rozpíná

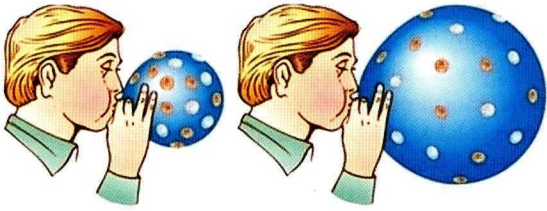
V roce 1927 Fridmanovy rovnice nezávisle znovu objevil belgický kněz a skvělý matematik a fyzik *Georges Lemaître* (1894–1966) v úžasné práci „*Homogenní vesmír s konstantní hmotou a rostoucím poloměrem, který bere v úvahu radiální rychlost extragalaktických mlhovin*“ [4]. Lemaître znal řešení Einsteinových rovnic, které našel v roce 1917 holandský astronom de Sitter a které odpovídalo stacionárnímu vesmíru bez hmoty jen s kosmologickou konstantou. Při vhodné volbě souřadnic, které objevil Cornelius Lanczos, lze ovšem toto řešení přepsat do tvaru (3) s jednoduchým škálovacím faktorem

$$R(t) = l \cosh(ct/l), \quad l = \sqrt{1/\lambda},$$

kteřý popisuje uzavřený vesmír s kladnou křivostí, jehož poloměr klesá od nekonečna v čase minus nekonečno do $R(0) = l$ a poté opět roste exponenciálně až do nekonečna v čase plus nekonečno. Lemaître propojil Einsteinovo a de Sitterovo řešení v Lanczosových souřadnicích a našel řešení, které v čase minus nekonečno odpovídalo Einsteinovu stacionárnímu vesmíru, ale s časem jeho poloměr rostl tak, jako ve vesmíru de Sittera. Byl zjevně motivován výsledky měření tzv. rudého posuvu elektromagnetického záření pocházejícího z extragalaktických mlhovin, objevených v roce 1924 americkým astronomem Edwinem Hubblem. Tento posuv lze nejjednodušším způsobem interpretovat jako důsledek toho, že objekt se od nás vzdaluje rychlostí, kterou lze z posuvu snadno spočítat. Tento efekt má přímou analogii v akustice: výška tónu vzdalujícího se vlaku je nižší než stojícího. Lemaître si všiml, že velká většina galaxií se od nás vzdaluje, a to rychlostí, která je velmi zhruba úměrná vzdálenosti, tedy tak, jak plynulo ze vztahu (4)

$$v(t) \equiv \frac{dD(t)}{dt} = \frac{dR(t)}{dt} \chi = \frac{\dot{R}}{R} D(t) = H(t)D(t), \quad (7)$$

kde konstanta H závisí na čase, ale nikoliv na prostorových souřadnicích. To bylo pro Lemaîtrea jasným důkazem, že rudý posuv nebyl důsledkem pohybu galaxií v prostoru, ale právě rozpínání prostoru. Protože tuto lineární závislost vzal vážně, ze známých údajů o rudém posuvu a měření vzdáleností spočítal střední hodnotu rychlosti vzdalování galaxií, podělil ji střední hodnotou vzdáleností a dostal o dva roky před Hubblem to, co se do října roku 2018 nazývalo *Hubbleova konstanta*, ale podle doporučení *Mezinárodní astronomické unie* se nyní zcela oprávněně nazývá *Hubbleova-Lemaîtreova konstanta* a lineární vztah (7) *Hubbleův-Lemaîtreův zákon*. Jeho práce je skutečný skvost, ale protože byla publikována ve francouzském časopise, trvalo čtyři roky, než si slavný britský astronom a Lemaîtreův učitel Arthur Eddington uvědomil, jakou klíčovou myšlenku



Obr. 3 Nafukování míče jako analogie rozpínání prostoru.

obsahuje a zařídil její přeložení do angličtiny. Mezitím Hubble v roce 1929 na základě téměř stejných dat o rudých posuvech vydal práci [5], v níž je graf na obrázku 5 naznačující přibližně lineární závislost rudého posuvu na vzdálenosti. Čtenář si jistě všimne chyby v označení veličiny na ose y . Hubble ovšem tuto závislost neinterpretoval jako projev rozpínání prostoru, ale v rámci původní stacionární interpretace de Sitterova řešení.

Také Einstein stále odmítal přijmout myšlenku, že fyzikální vesmír se rozpíná, i když již uznával, že jeho rovnice připouštějí řešení závislejší na čase. Lemaître ve svých vzpomínkách uvádí, že se Einstein o jeho práci z roku 1927 vyjádřil slovy: „Vaše výpočty jsou v pořádku, ale vaše fyzika je ohavná.“ Lemaîtreovo řešení stejně jako de Sitterovo v Lanczosových souřadnicích mělo tu vlastnost, že v ní neměl vesmír počátek v čase. Je zajímavé, že ještě v jiných souřadnicích má škálovací faktor de Sitterova řešení tvar popisující exponenciální rozpínání plochého prostoru

$$R(t) = l \exp\left(c\sqrt{\lambda/3} t\right),$$

a splňuje tedy rovnici (5) pro $\rho = k = 0$. Toto řešení lze v jistém smyslu interpretovat jako vznik de Sitterova vesmíru z „ničeho“ v minus nekonečno.

Lemaîtreova hypotéza „prvotního atomu“

O čtyři roky později Lemaître přišel s ještě revolučnější hypotézou, když formuloval základní myšlenku modelu velkého třesku. V jednostránkovém článku „Počátek světa z hlediska kvantové teorie“ v časopise Nature [6], v němž není jediný vzorec, reagoval na slova slavného astronoma a svého učitele Arthura Eddingtona. Ten v článku z roku 1931 formuloval svůj postoj k otázce, zda má smysl mluvit o počátku vesmíru, slovy: „Z hlediska filosofie je pro mne pojem počátek ‚současného řádu‘ odpudivý.“ Lemaître naopak vyslovil domněnku, že svět měl počátek, kdy byla veškerá hmota koncentrována v jednom „prvotním kvantu“. Z hlediska matematiky k tomuto závěru vede řešení Fridmanových rovnic pro vesmír s hmotou, jejíž hustota závisí na velikosti rozpínajícího se prostoru jako $1/R^3$ nebo $1/R^4$ podle toho, zda jde o nerelativistické či relativistické částice. Pro malé časy je člen s hustotou dominantní a řešení (5) je ve tvaru $R(t) \sim t^\alpha$, $\alpha = 2/3, 1/2$. Lemaître uvažoval i jako fyzik:

„Jestliže svět vznikl v jednom kvantu, pojmy prostor a čas neměly na samém počátku žádný smysl. Ten mohly nabýt, až když se původní kvantum rozdělilo na dostatečný počet kvant. Je-li tato hypotéza správná, svět vznikl krátce před počátkem prostoru a času. Domnívám se, že takový počátek světa je dost rozdílný od současného přírodního řádu, že vůbec nemusí být odpudivý.“

Tato jeho slova byla více než jasnozřivá a daleko předběhla dobu. Pro zajímavost, Lemaîtreův „prvotní atom“, v němž by byla naskládána těsně vedle sebe všechna atomová jádra dnešního vesmíru, by zaplnil naši Sluneční soustavu až po Jupiter. Myšlenka prvot-

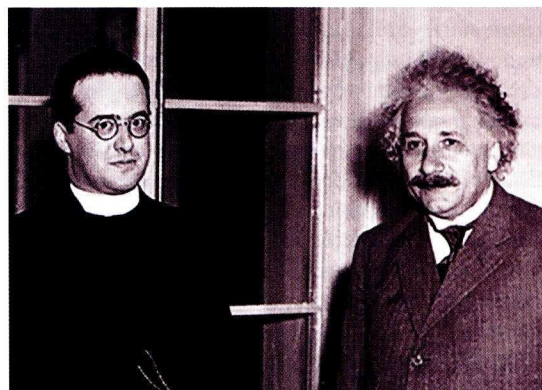
ního atomu byla ovšem natolik revoluční, že ji téměř nikdo nepřijal. Je až neuvěřitelné, jak i po kvantitativní stránce byl Lemaîtreův model vývoje vesmíru blízký našim dnešním představám včetně éry inflace. Zajímavá byla reakce Einsteina, s nímž se Lemaître sešel v roce 1934 v Kalifornii. Po Lemaîtreově semináři o prvotním atomu mu Einstein řekl, že tuto hypotézu nemá rád, protože „příliš naznačuje teologickou myšlenku kreationu“. A potom, pravděpodobně trochu ironicky, dodal: „Tohle je nejkrásnější a nejuspokojivější vysvětlení stvoření světa, jež jsem kdy slyšel.“

Hloubku Lemaîtreova chápání nejen kosmologie, ale také teprve se rodící kvantové teorie ilustruje skutečnost, že v práci [7] jako první interpretoval fyzikální význam kosmologické konstanty jako hustoty energie vakua ρc^2 v kvantové teorii pole, které má záporný tlak $p = -\rho c^2$ a chová se v důsledku toho jako antigravitující médium.

Model ustáleného vesmíru

Koncem 40. let minulého století se do módy na čas dostal model „ustáleného vesmíru“ (*steady state universe*) [8], který do jisté míry resuscitoval Einsteinův stacionární vesmír. Jeho hlavním advokátem byl významný britský astronom Fred Hoyle, který práce Lemaîtrea zjevně znal, ale považoval jeho popis vesmíru za nepřijatelný. Myšlenku „prvotního vesmíru“ ze stejných důvodů jako Eddington či Einstein a Lemaîtreův model z roku 1927 odmítal, protože obsahoval kosmologickou konstantu, kterou v té době Einstein zavrhl. Hoyle nepopíral rozpínání vesmíru a tedy vzdalování galaxií, ale v jeho modelu je rozpínání vesmíru kompenzováno předpokladem, že se přitom v prostoru mezi vzdalujícími se galaxiemi kontinuálně rodí hmota, takže vesmír vypadá pořád stejně. To bylo podle Hoyleho realizací základního kosmologického principu, tj. že vesmír vypadá všude a v každý časový okamžik stejně. Do Einsteinových rovnic zavedl místo kosmologické konstanty člen, který tento efekt popisuje a vede, stejně jako kosmologická konstanta, na exponenciální tvar škálovacího faktoru.

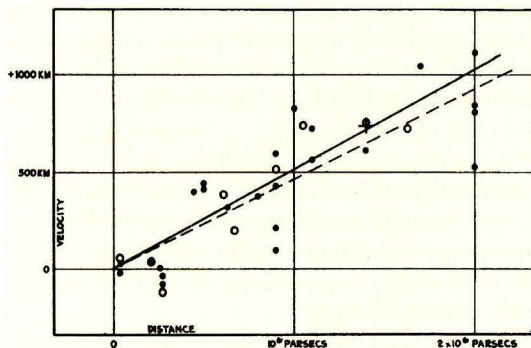
Zde je vhodné připomenout důležitý pojem plynoucí ze vztahu (7). Vezmeme-li za rychlost rozpínání prostoru rychlost světla, dostaneme pro odpovídající vzdálenost, která se nazývá Hubbleův poloměr, výraz $D_H = c/H$. Jeho význam spočívá v tom, že od vzdálenějších objektů k nám nemůže doletět nic, ani světlo, protože rozpínání prostoru mu „unáší prostor pod nohama“. Pro mocninné závislosti škálovacího faktoru t^α na čase $R(t) \sim t^\alpha$, $\alpha = 2/3, 1/2$ se Hubbleův poloměr $D_H = ct/\alpha > ct$ vzdaluje s rychlostí větší, než je rychlost světla, a v dů-



Obr. 4 Georges E. Lemaître (1894–1966) a Albert Einstein.

» O čtyři roky později Lemaître přišel s ještě revolučnější hypotézou, když formuloval základní myšlenku modelu velkého třesku. «

» Objev reliktního záření zasadil smrtelnou ránu konkurenčnímu modelu ustáleného vesmíru a znamenal také konec pochybnosti o realitě rozpínání vesmíru. «



Obr. 5 Závislost rychlosti vzdalování galaxií na jejich vzdálenosti z původní práce E. Hubblea [5].

sledku toho s námi může komunikovat stále větší objem prostoru. Pro exponenciální závislost škálovacího faktoru je ovšem Hubbleův poloměr v čase konstantní, takže vzdalující se galaxie spojitě mizí nenávratně za horizontem. Místo nich se ovšem v prostoru mezi nimi rodí hmota, z níž podle Hoyleho vznikají nové galaxie, a díky tomu vesmír vypadá pořád stejně. Tato myšlenka nebyla sice absurdní, ale konkrétní mechanismus, jak k tomu dochází, však Hoyle nedokázal specifikovat.

Hoyle je také autorem názvu „velký třesk“ (Big Bang). V pořadu BBC 28. 3. 1949 Hoyle popsal podstatu svého modelu ustáleného vesmíru a konfrontoval ho s „hypotézou, že všechna hmota ve vesmíru vznikla v jednom velkém třesku ve vzdálené minulosti“, kterou považoval za „nepřijatelnou z fyzikálních i filosofických důvodů“.

Jak (ne)vznikaly prvky

Jeden z mála, kdo bral myšlenky Fridmana a Lemaîtrea o rozpínání vesmíru vážně, byl rusko-americký teoretický jaderný fyzik *George Gamow* (1904–1968), který byl krátkou dobu i Fridmanovým žákem. Společně se svým doktorem Ralphem Alpherem a Robertem Hermanem se v letech 1946–1950 zabývali otázkou, jak ve vesmíru vznikly prvky, z nichž se časem vyvinuly celé galaxie. Nezajímalo je, jak konkrétně vesmír vznikl, ale přijali základní rámec Lemaîtreova modelu a předpokládali, že vesmír byl v prvních okamžicích své existence zaplněn „polévkou“ (vysoce stlačeným a horkým plynem) složenou z neutronů, které se rozpadaly na protony a elektrony, a ta v důsledku rozpínání prostoru chladla [9]. Kromě hmoty bylo přítomno i záření (fotony), které interagovalo s elektrony a protony. Je zajímavé, že používali Fridmanovy rovnice, ale ve všech svých pracích se odkazovali na pozoruhodnou monografii amerického fyzikálního chemika a matematika Richarda Tolmana *Relativita, termodynamika a kosmologie* z roku 1934 [10], jejíž část je věnována velmi podrobnému popisu Lemaîtreových prací.

Gamow se původně domníval, že během tohoto procesu postupným záchytem neutronů na protonech vzniknou všechny prvky ve vesmíru, ale později se ukázalo, že tímto způsobem mohlo vzniknout jen několik nejlehčích prvků, především deuterium a helium, zatímco těžší jádra vznikala až ve hvězdách. V práci [11] Alpher s Hermanem vyšetřovali v rámci modelu rozpínajícího se vesmíru časový vývoj systému hmoty a záření od počátku až po současnou dobu a došli k závěru, že záření, tedy světlo pocházející z té doby, by dnes mělo mít teplotu kolem 5 kelvinů. Odhad byl správný, ale argumenty nikoliv. Tato éra vývoje vesmíru

je popsána ve skvělé knížce Stevena Weinberga *První tři minuty* [12], kde je také vysvětleno, proč v husté polévce první etapy vývoje vesmíru nemohla vzniknout těžší jádra, proč a kdy se z této polévky oddělilo reliktní záření a jak tyto skutečnosti citlivě závisí na vlastnostech jader a atomu vodíku a pravděpodobnosti srážek protonů a neutronů při nízkých energiích.

Šťěstí přeje připraveným

Počátkem 60. let minulého století existovaly minimálně dva konkurenční modely vesmíru, ale prakticky žádná data, která by rozhodla o tom, zda některý, resp. který je blíže skutečnosti. A do této situace přišel objev záření, které svou anténou v roce 1964 pozorovali dva američtí radioastronomové Robert Wilson a Arno Penzias z Bellových laboratoří a jehož původu nerozuměli. Jejich anténa byla vyladěna na detekci elektromagnetických vln s vlnovou délkou 7 cm a šum, který zaznamenávali, i když odstranili všechny známé možné zdroje pozadí, odpovídal intenzitou teplotě $3,5 \pm 1$ K. Po roce marného hledání příčiny šumu se obrátili na skupiny fyziků na nedaleké Princetonské univerzitě, kterou vedl Robert Dicke a jejímž členem byl i mladý teoretik James Peebles. Podobně jako Alpher s Hermanem i Peebles s Dickem uvažovali rozpínající se horkou polévku, které říkali „prvotní ohnivá koule (fireball)“, a nezávisle na nich došli k závěru, že by po této etapě ve vesmíru mělo zůstat svědectví ve formě elektromagnetického záření s vlastnostmi záření absolutně černého tělesa o teplotě maximálně 40 K. Dickeho skupina proto připravovala anténu pro měření takového záření při vlnové délce 3 cm. Po informaci o výsledku měření Wilsona a Penziasa Dicke s Peeblesem okamžitě pochopili, že detekovali to, co hledali i oni. Výsledkem diskuze obou skupin byly dva články, které vyšly hned za sebou. Je zajímavé, že nejdříve vyšel článek Dickeho skupiny o teoretické interpretaci [13], a teprve po něm Wilsonův a Penziasův o výsledcích jejich měření [14]. Objev reliktního záření zasadil smrtelnou ránu konkurenčnímu modelu ustáleného vesmíru a znamenal také konec pochybnosti o realitě rozpínání vesmíru. Na druhé straně tento objev byl jen začátkem cesty k podrobnému zkoumání vlastností reliktního záření a jejich využití pro pochopení vzniku a vývoje vesmíru.

Předně bylo třeba prokázat, že reliktní záření má opravdu charakter záření absolutně černého tělesa, jeho hustota $u(\nu)$ závisí na frekvenci ν podle Planckovy formule

$$\frac{du}{d\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Penzias a Wilson detegovali reliktní záření při jediné vlnové délce 7 cm, a proto bylo velmi důležité, že měření Dickeho skupiny při vlnové délce 3 cm již v roce 1966 leželo na stejné křivce, odpovídající teplotě 3,5 K jako měření Wilsona a Penziasa. Všechna měření, která od té doby proběhla v širokém rozsahu frekvencí, tuto klíčovou vlastnost reliktního záření potvrdila.

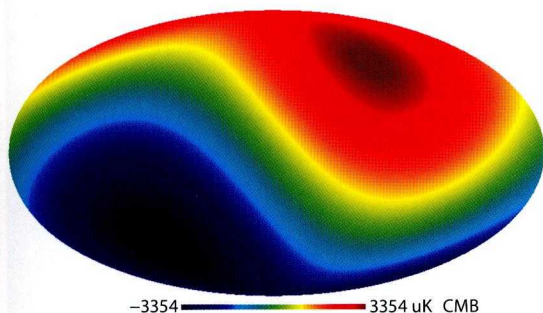
Návrat éteru

Měření Wilsona a Penziasa pokrývalo jen část nebeské sféry a při uvedené přesnosti nevykazovalo žádnou závislost na směru, odkud záření přicházelo. Na tomto místě je třeba připomenout jednu důležitou vlastnost modelu rozpínajícího se vesmíru: Fyzikální procesy můžeme popisovat v libovolném referenčním systému,

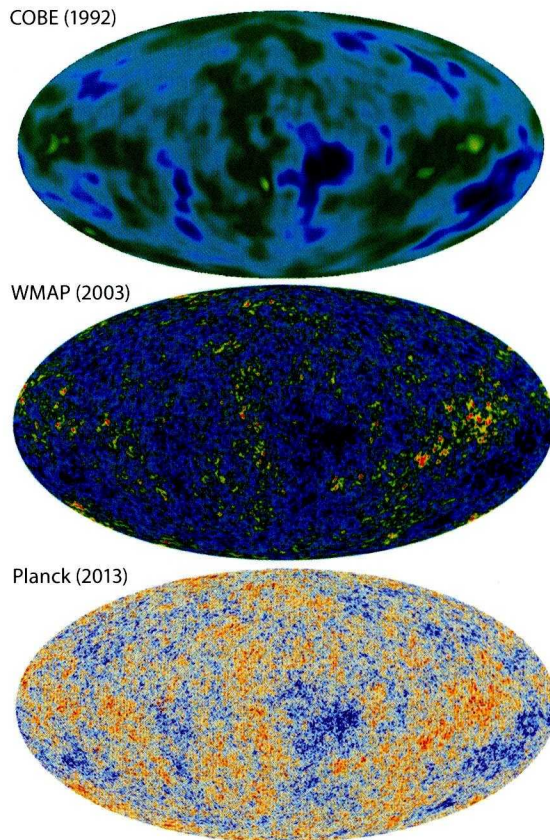
ale vztahy (2–7) platí v jediném, který do jisté míry připomíná absolutní prostor Newtona. Na pozadí rozpínajícího se prostoru (například povrchu nafukovaného míče na obr. 3) se mohou pohybovat objekty, ale v referenčních soustavách spojených s nimi nebude platit Hubbleův-Lemaîtreův zákon, například některé blízké galaxie se k nám mohou přibližovat. Tak je tomu i ostatně i na obrázku 5. Stanovit rychlost pohybu naší Země, resp. Sluneční soustavy vůči této referenční soustavě měřením rudého posuvu je prakticky nemožné, protože galaxie se vůči němu pohybují. Potřebné stabilní okolí však poskytuje právě reliktní záření, které se šířilo rozpínajícím se prostorem téměř volně od okamžiku, kdy se oddělilo od nabitých částic, a mělo by mít ve všech směrech přesně stejné vlastnosti, tedy teplotu. Referenční systém, v němž je reliktní záření přesně izotropní (dále „reliktní pozadí“) je analog éteru 19. století, v němž se podle představ fyziků 19. století mělo šířit světlo, tak jako se zvuk šíří vzduchem. Nalézt projevy pohybu objektů vůči éteru se Michelsonovi a dalším fyzikům nepodařilo a Einstein na základě toho vytvořil speciální teorii relativity. James Peebles jako jeden z prvních pochopil, že je-li představa o první etapě vývoje vesmíru správná, mělo by být možné detegovat projevy pohybu naší Země vůči reliktnímu pozadí, a proto by neměla být teplota reliktního záření úplně stejná ve všech směrech. V práci z roku 1968 [15] odvodil vztah pro závislost teploty reliktního záření na směru v důsledku pohybu Země vůči reliktnímu pozadí, která měla charakter dipólu, tj. vyšší teplota v jednom směru a nižší v opačném. Změření této závislosti bylo pro potvrzení modelu klíčové. Je dobré připomenout, že rychlost oběhu Země kolem Slunce je 30 km za vteřinu a rychlost oběhu Slunce kolem středu Mléčné dráhy je asi 300 km za vteřinu. Trvalo ovšem zhruba deset let, než se přesnost měření teploty reliktního záření dostala na úroveň milikelvinů a efekt byl potvrzen: naše Sluneční soustava se pohybuje vůči reliktnímu pozadí rychlostí cca 370 km/s zhruba ve směru souhvězdí Lva a celá naše Galaxie rychlostí cca 600 km/s ve směru souhvězdí Hydry. Moderní vizualizace tohoto efektu, jak ho změřila sonda COBE v roce 1992, je na obr. 6, kde je zachycena teplota mikrovlnného záření přicházející z celé nebeské sféry v tzv. Mollweidově projekci, v níž pravý a levý okraj elipsy na sebe navazují.

Zlatý důl

Otázka, jak se z prvotní husté polévky zrodila dnešní struktura vesmíru, tedy hvězdy, galaxie a jejich shluky, sice stále zůstala nezodpovězena, ale bylo zřejmé, že odpověď spočívá v tom, že se již v prvotní husté polévce



Obr. 6 Dipólová anizotropie reliktního záření, jak ji změřila sonda COBE. Červená barva představuje směry, odkud přichází záření s vyšší teplotou, než je průměrná, modrá s nižší.



Obr. 7 Mapy anizotropie reliktního záření změřené sondami COBE, WMAP a Planck.

v raném stadiu vývoje vesmíru nějakým mechanismem vytvořily nehomogenity hustoty hmoty, které se staly zárodky pro vznik struktur v dnešním, na první pohled velmi nehomogenním vesmíru.

Zlatým dolem při hledání odpovědi na tuto otázku se ukázalo být ještě přesnější měření teplotních anizotropií reliktního záření, které provedly tři sondy: COBE v roce 1992, WMAP v roce 2003 a PLANCK v roce 2013. Obrázky zachycující mapy těchto anizotropií ve zmíněné projekci jsou na obr. 7. Je zřejmé, že mapy jsou s postupem doby podrobnější a přesnější: uvnitř spojitě červených nebo modrých oblastí na mapě COBE rozeznaly WMAP a PLANCK jemnější struktury, které se od střední hodnoty 2,725 K liší zhruba o desetitisícinu, tj. jsou asi desetkrát citlivější než mapa COBE. Na všech třech mapách byla dipólová anizotropie odečtena.

Předpoklad, že vesmír byl na začátku homogenní a izotropní, se zdá přirozený, ale ve skutečnosti to v případě rozpínajícího se vesmíru předpokládá velmi speciální počáteční podmínky. Problém lze ilustrovat právě na téměř přesné izotropii reliktního záření. Ve vesmíru je asi miliarda fotonů na jeden proton (toto číslo je velmi důležité, ale jeho vysvětlení je mimo rámec tohoto článku) a při tomto poměru ztratily fotony schopnost rozbíjet atomy vodíku, které vznikaly spojením elektronů a protonů při teplotě cca 3000 K a dál se mohly šířit téměř volně. Teplota dnešních reliktních fotonů znamená, že se vesmír zvětšil od okamžiku, kdy se fotony oddělily od neutrálních atomů asi 1000krát. Standardní výpočty chladnutí prvotní polévky složené z hmoty a záření dávají pro tento okamžik čas cca 400 tisíc let od počátku, aniž specifikujeme, co konkrétně jím bylo. Oblasti prostoru, které mohly v té době spolu komunikovat, tzn. byly uvnitř Hubbleova poloměru a mohly tedy mít stejnou teplotu, by dnes na

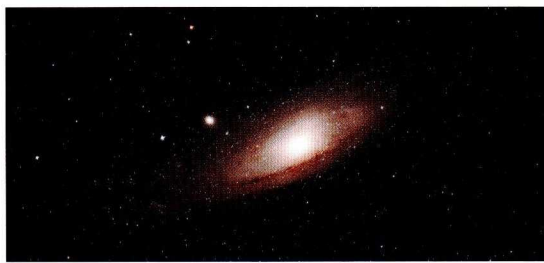
» Po více než padesáti letech můžeme říci, že reliktní záření hraje pro pochopení vývoje a současného stavu vesmíru podobnou roli, jako měla Rosettská deska pro rozluštění egyptských hieroglyfů. «

nebeské sféře zabíraly maximálně 2 prostorové stupně. Skutečnost, že reliktní záření je tak izotropní ve všech směrech, bylo proto tehdy nepochopitelné a vyžadovalo tzv. jemné naladění počátečních podmínek. To nemají fyzikové rádi.

Návrh řešení tohoto a dalších problémů tehdejší standardní kosmologie (založené na Fridmanových rovnicích pro vesmír s hmotou a zářením) přinesla myšlenka z přelomu 70. a 80. let minulého století, že v počáteční fázi prostor prošel velmi krátkou dobou extrémně rychlého rozpínání, během níž se nafoukl o několik desítek řádů. V důsledku toho oblasti, které podle standardních představ o vývoji vesmíru spolu při vzniku reliktního záření komunikovat nemohly a jejich vlastnosti by tedy neměly být stejné, byly před inflací uvnitř Hubbleova poloměru a komunikovat spolu mohly. Toto prudké nafouknutí, kterému se říká *kosmologická inflace* a které lze označit za „velký třesk“ velkého třesku, také „narovnal“ prostor, takže dnes se jeví jako plochý. A také vygenerovalo z kvantových fluktuací nehomogenity hustoty hmoty. Všechny tyto skutečnosti se obtiskly do vlastností reliktního záření, především jeho jemné anizotropie.

Podrobná a netriviální analýza map anizotropií změřených sondami COBE, WMAP a Planck svědčí o tom, že současný vesmír má tyto vlastnosti:

- prostor je plochý;
- známé baryony (protony a neutrony) představují asi 4 % celkové hustoty energie;
- kromě těchto baryonů musí být přítomna i tzv. temná hmota, tj. částice, které zatím neznáme a jež činí cca 23 % hustoty energie;
- zbytek, tj. cca 73 % současné hustoty energie, nese tzv. temná energie, jejíž působení odpovídá kosmologické konstantě, ale o jejíž podstatě nevíme nic;
- dnešní struktura vesmíru na velkých vzdálenostech je důsledkem nehomogenit hustoty hmoty, které vznikly v prvních cca 400 tisících letech po inflačním stadiu vývoje vesmíru.



James Peebles a současná kosmologie

Po více než padesáti letech můžeme říci, že reliktní záření hraje pro pochopení vývoje a současného stavu vesmíru podobnou roli, jako měla Rosettská deska pro rozluštění egyptských hieroglyfů. Rozluštění tajemství skrytého v reliktním záření bylo výsledkem kombinace přesných měření a výrazného pokroku v teoretickém popisu vývoje prvotní polévky, která připravila podmínky a stavební kameny pro tvorbu hvězd a galaxií. James Peebles k tomu přispěl v téměř všech klíčových aspektech a svými pracemi během uplynulých více než padesáti let zásadním způsobem přispěl k transformaci kosmologie z oblasti spekulací na skutečnou vědu. Jeho monografie *Physical Cosmology* z roku 1972 a výrazně doplněné *Principles of Physical Cosmology* z roku 1993 se staly biblí moderní kosmo-

logie. O dipólové anizotropii reliktního záření jsem se již zmínil, o dalších jen krátce.

- Peebles jako první kvantitativně ukázal, že v prvotní polévce mohly vzniknout jen lehké prvky. Jeho výpočet z roku 1966, že 26–30 % procent hmotnosti vesmíru je tvořeno héliem, je až překvapivě blízko dnešním hodnotám.
- Zabýval se vlivem reliktního záření na formaci galaxií.
- Přispěl zásadním způsobem ke kvantitativnímu pochopení šíření nehomogenit hustoty hmoty v prvotní polévce a ukázal, jak by se měly tyto nehomogenity projevit v anizotropii reliktního záření.
- Zabýval se možnou dominancí temné hmoty na teplotní anizotropie reliktního záření a nehomogenit „normální“ hmoty, z níž vznikaly galaxie.
- Jako jeden z prvních uvažoval scénář, v němž je současný vesmír dominován vlivem kosmologické konstanty. Je zajímavé, že v jedné své práci na toto téma citoval práci Lemaître z roku 1933.

Podrobnější komentář k zásadním pracím Jamese Peeblese je v materiálu *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2019* [16], vydaném Švédskou akademií věd k uděleným cenám.

Díky Peeblesovi toho o vzniku a vývoji vesmíru víme hodně, ale dvě klíčové otázky zůstávají stále nezodpovězené: co tvoří temnou hmotu a co je podstatou temné energie? James Peebles má stále o čem přemýšlet.

Literatura

- [1] A. Friedman: „Über die Krümmung des Raumes“, *Z. Phys.* **10**, 377 (1922).
- [2] A. Einstein: „Bemerkungen zu der Arbeit von A. Friedman ‚Über die Krümmung des Raumes‘“, *Z. Phys.* **11**, 326 (1922).
- [3] A. Einstein: „Notiz zu der Arbeit von A. Friedman ‚Über die Krümmung des Raumes‘“, *Z. Phys.* **16**, 228 (1922).
- [4] G. Lemaître: „Un Univers homogène de masse constant et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques“, *Ann. Soc. Sci. Bruxelles* **47A**, 49 (1927), anglický překlad: G. Lemaître: „A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae“, *M.N.R.A.S.* **41**, 483 (1931).
- [5] E. A. Hubble: „A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae“, *PNAS* **15**, 168–173 (1929).
- [6] G. Lemaître: „The beginning of the world from the point of view of quantum theory“, *Nature* **127**, 706 (1931).
- [7] G. Lemaître: „Evolution of the expanding universe“, *M.N.R.A.S.* **20**, 12 (1934).
- [8] F. Hoyle: „A new model for the expanding universe“, *M.N.R.A.S.* **108**, 372 (1948).
- [9] R. Alpher, H. Bethe, G. Gamow: „The Origin of Chemical Elements“, *Phys. Rev.* **73**, 803 (1948).
- [10] R. Tolman: *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*. Clarendon Press, Oxford 1934.
- [11] R. Alpher, R. Herman: „Remarks on the Evolution of the Expanding Universe“, *Phys. Rev.* **74**, 1089 (1949).
- [12] S. Weinberg: *První tři minuty*. Mladá fronta, Edice Kolumbus, Praha 1998.
- [13] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll a D. T. Wilkinson: „Cosmic black-body radiation“, *Astrophys. J.* **142**, 414 (1965).
- [14] A. A. Penzias a R. W. Wilson: „A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s“, *Astrophys. J.* **142**, 419 (1965).
- [15] P. J. E. Peebles, D. Wilkinson: „Comment on the Anisotropy of the Primeval Fireball“, *Phys. Rev.* **174**, 174 (1968).
- [16] <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-physicsprize2019-3.pdf>