

Byly pozorovány inflační gravitační vlny?

Tomáš Ledvinka

Ústav teoretické fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, Praha; tomas.ledvinka@mff.cuni.cz

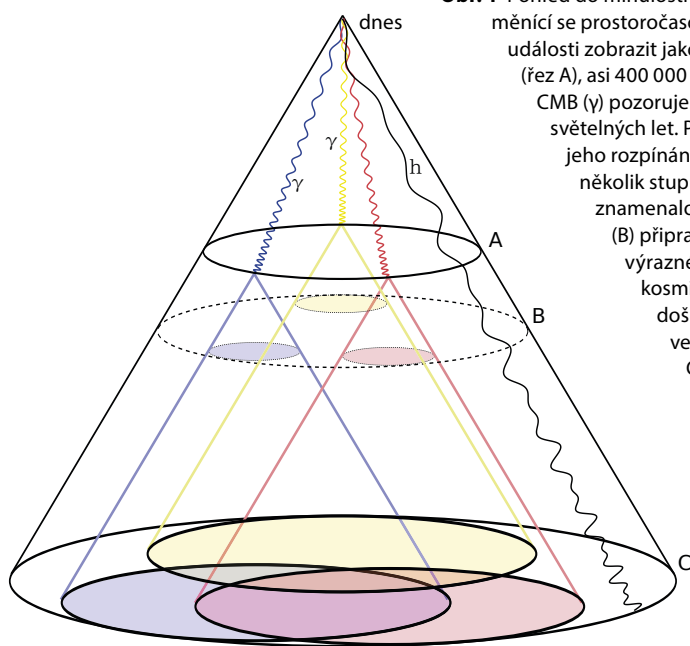
Nebylo asi možné vyhnout se v posledních týdnech informacím o nejnovějších výsledcích experimentu BICEP2 (*Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization*), které by měly potvrzovat přítomnost gravitačních vln v raném vesmíru [1]. Protože během příštích měsíců bude tento výsledek konfrontován s výstupy analýzy měření polarizace kosmického mikrovlnného pozadí (CMB – *Cosmic Microwave Background*) pořízených sondou Planck a poté i dalších pozemských pozorování, stojí za to podívat se, co, jak a proč se vlastně (na)měřilo.

Teorie velkého třesku představuje důslednou aplikaci dnes pozorovaných fyzikálních zákonů na celou dobu trvání vesmíru. Aby je bylo možné sledit se stále rostoucím množstvím informací o počátku vesmíru, bylo známou fyziku zatím potřeba doplnit jen o tři ingredience – temnou hmotu, temnou energii a konečně i inflaci. Právě tu by mělo podpořit oznámené potvrzení existence primordiálních gravitačních vln, které by měly představovat doposud nejčitelnější otisk toho, jaké podmínky v raném vesmíru panovaly v době, kdy děj určovala fyzika v blízkosti Planckovy škály $M_{\text{pl}} = 2,4 \times 10^{18}$ GeV.

Obecná teorie relativity popisuje vztah mezi hmotou a zakřivením prostoročasu. V kosmologii pak ze-

jména konkrétně určuje časový vývoj rozměru vesmíru v závislosti na chování hmoty, která jej vyplňuje. Expanzi vesmíru dnes potvrzují spousty pozorování, tím nejvýstižnějším však je právě CMB. Jde o světlo pocházející ze žhavé látky, kterou byl vesmír vyplněn, když byl asi 1 100× menší než dnes. Tehdy vesmír vychladl natolik, že se stal průhledným pro elektromagnetické vlny. Ty od té doby v rozpínajícím se vesmíru vychladly až na dnešních 2,7 K. Radiová obloha v oblasti milimetrových vln tak představuje nejvzdálenější možný pohled do minulosti prostřednictvím elektromagnetického záření. Někjaké informace o tom, co se odehrávalo předtím, však lze vyčíst z drobných variací intenzity a polarizace CMB.

Rozpínajícímu se vesmíru běžná hmota předurčuje takový průběh expanze, že oblasti na obloze vzdálené i jen několik stupňů od sebe byly v okamžiku vzniku CMB kauzálně izolované (obr. 1). To znamená, že za pomoci fyzikálních zákonů není možné vysvětlit, proč měl všude, kam se prostřednictvím mikrovln podíváme (tzv. sféra posledního rozptylu), vesmír podobné vlastnosti. Před metafyzickým konstatováním, že tomu tak prostě je, dostala přednost hypotéza, že po jistý čas měla expanze raného vesmíru exponenciální povahu, takže veškerá pozorovaná hmota vesmíru nej-



Obr. 1 Pohled do minulosti v rozpínajícím se vesmíru v souřadnicích, v nichž měnící se prostoročasové měřítko dovolí kauzální minulost každé události zobrazit jako kužel. Vesmír byl v době, ze které pochází CMB (řez A), asi 400 000 let starý ale část vesmíru, kterou prostřednictvím CMB (γ) pozorujeme, má podobu sféry o obvodu asi 260 milionů světelných let. Pokud by celou dobu od vzniku vesmíru dynamiku jeho rozpínání určovala běžná hmota, místa na obloze i jen několik stupňů vzdálená by byla kauzálně izolovaná. To by znamenalo, že vesmír musel být již v okamžiku svého vzniku (B) připraven tak, abychom nikde na obloze neviděli výrazné odlišnosti. Fyzikální vysvětlení přináší hypotéza kosmické inflace – v úplných počátcích historie vesmíru došlo k exponenciální expanzi vesmíru, díky níž sdílí veškerý pozorovaný vesmír společnou minulost (řez C o rozměru zhruba 10–30m; správně by ovšem v daných souřadnicích exponenciální průběh inflace vyžadoval jej vykreslit cca 1030 krát níž). Z této doby by měly pocházet i primordiální gravitační vlny (h). Cílem řady experimentů je nalézt v b-módu polarizace reliktního záření fluktuace na tak velké škále, aby je bylo možno považovat za otisk inflačních gravitačních vln.

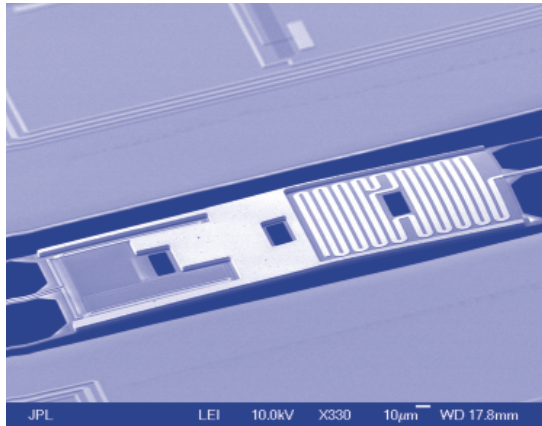
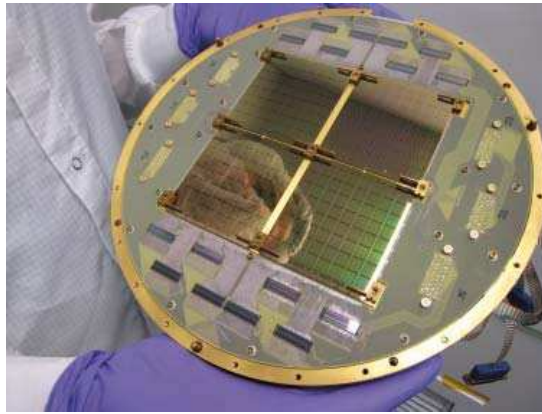
prve dostatečně dlouho společně bublala v dostatečně malém objemu. Taková rychlá exponenciální expanze vesmíru (faktor několika desítek řádů) navíc vysvětlí i některé další (ne)pozorované vlastnosti našeho vesmíru [2].

Inflační model raného vesmíru v nejjednodušší podobě předpokládá, že během inflační éry dynamiku rozpínání určuje skalární, tzv. inflatonové pole. Zatímco obyčejná hmota podle obecné relativity svým přitahováním rozpínání vesmíru brzdí, skalární pole se chová jako látka s dostatečně záporným tlakem a rozpínání vesmíru urychluje. Podobného účinku lze ovšem dosáhnout i modifikací rovnic gravitace či s použitím dalších, ještě exotičtějších polí. Jak analýzou CMB určit, která z teorií je blíže skutečnosti? Spolu s rostoucí přesností měření CMB se vyvíjela i teorie popisující časový vývoj fluktuací v raném vesmíru. Ukazuje se, že klíčovou roli hrají poruchy gravitačního pole. Jedny mají podobu skalární veličiny, poruchy v rovnoměrném rozpínání vesmíru a přímo souvisejí i s fluktuacemi inflatonového pole. Samotný osud inflatonového pole je sice nejasný, ale jeho fluktuace se později otisknou do fluktuací teploty a hustoty a nakonec i do pozorovaných fluktuací teploty CMB. Přímé svědky dějů z epochy inflace by ovšem měly představovat tzv. tenzorové perturbace, tedy gravitační vlny, protože se po celou dobu mohou poměrně nerušeně šířit vesmírem. I když během rozpínání vesmíru zesláblý natolik, že nejsou v dosahu současných pokusů o přímou detekci gravitačních vln, primordiální gravitační vlny mohou zanechat měřitelný otisk v polarizaci CMB [3].

Jednotlivé inflační modely předpovídají jednak charakter (spektrum) fluktuací, ale zejména poměr mezi intenzitou fluktuací tenzorových a skalárních [4]. Pokud by byly výsledky BICEP2 potvrzeny, měly by přinášet informaci o hodnotě tohoto poměru pro fluktuace na úhlové škále jednotek stupňů, tedy milionů světelných let na sféře posledního rozptylu. Způsob, jak se fluktuace této vlnové délky vynořily z kvantových počátků vesmíru, není přesně znám, ovšem značná podobnost mezi známými rovnicemi polí v plochem prostoru a rovnicemi v rozpínajícím se vesmíru poskytuje základní model vývoje těchto fluktuací. Pro mnoho teoretických fyziků tak výsledky BICEP2 znamenají především možnost omezit možné inflační teorie jen na ty, po kterých ve vesmíru zůstane vhodné množství gravitačních vln.

Radioteleskop BICEP2 je umístěn na observatoři na jižním pólu a svojí konstrukcí se podobá dnešnímu digitálnímu fotoaparátu upravenému tak, aby pořizoval mapu polarizace přicházejícího reliktního záření mezi 130 a 170 GHz, v oblasti maxima Planckovy křivky CMB. Optika mikrovlnného refraktoru vytváří obraz oblohy na matici 256 detektorů, které měří dopadající výkon pro dvě polarizace. Měření intenzity přicházejícího záření probíhá za pomoci TES (*Transition Edge Sensor*), tedy prvků založených na chování supravodivého materiálu v okolí kritické teploty (asi 400 mK). Detekce spočívá v tom, že elektromagnetické vlny přiváděné z konkrétního pixelu antény se v detektoru přeměňují na teplo, a protože TES je udržován blízko kritické teploty, i nepatrné změny přicházejícího výkonu se projeví měřitelnou změnou odporu TES (obr. 2).

Nasbíraná data byla pořizována během tří let a představují 590 dní čistého pozorovacího času. Během nich



Obr. 2 Na této matici 16×16 detektorů (obrázek nahoře) udržovaných na teplotě 250 mK vytváří mikrovlnná optika obraz oblohy v pásmu 150 GHz. Na detailu (dole) je vidět vlastní detektor. V meandrujícím páskovém vedení se přicházející elektromagnetické vlny mění na teplo, které měří prvek TES v levé části detektoru. (Snímky: NASA/JPL-Caltech)

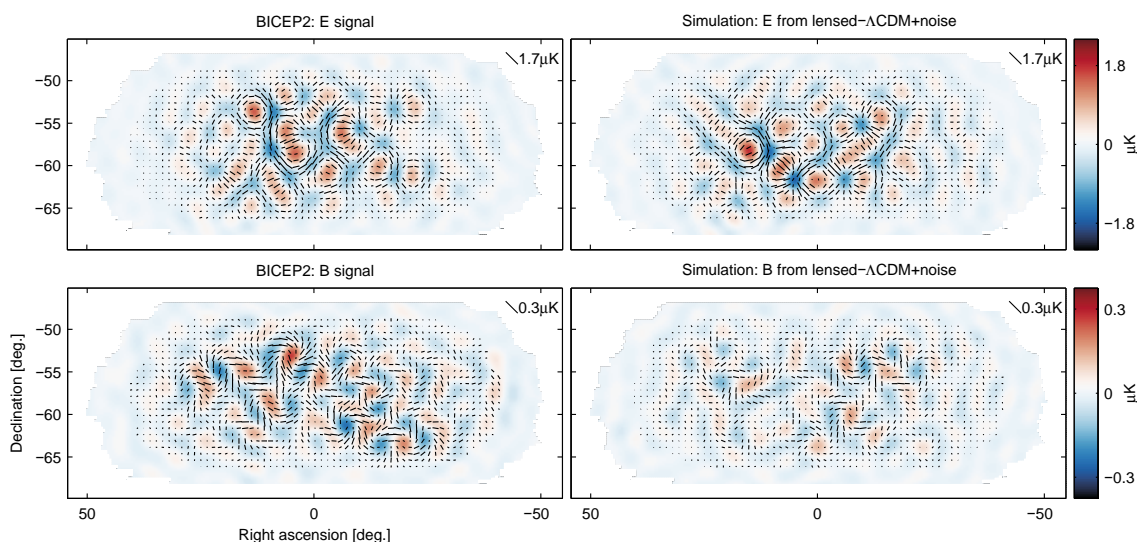
byla vybraná část oblohy opakovaně pozorována s několika vhodně zvolenými orientacemi antény tak, aby bylo možné rekonstruovat reálnou část 2×2 matice polarizace

$$P_{ab} = \langle E_a E_b^* \rangle = \begin{pmatrix} T+Q & U \\ U & T-Q \end{pmatrix}.$$

Matice 2×2 proto, že na obloze máme dvě souřadnice a elektromagnetické vlny (E_a je elektrická intenzita) jsou příčné – projekce $P_{ab} n^a n^b$ tedy představuje intenzitu zachycenou anténou s orientací charakterizovanou vektorem n^a . Díky dlouhé řadě měření (COBE, WMAP a Planck) představují rozdíly v intenzitě CMB záření přicházejícího z různých míst oblohy dnes již dobře známou informaci. Je obvyklé tuto intenzitu charakterizovat teplotou. Fluktuace této teploty představují nepolarizovaný, diagonální člen T o velikosti asi 100 μ K. Informace o polarizaci přicházejícího záření přináší ona nová data, amplitudy Q, U o velikosti asi 3 μ K. Pro potřeby interpretace jsou však data vyjádřena pomocí Helmholtzova rozkladu matice polarizace do potenciálů

$$P_{ab} = T \delta_{ab} + (\nabla_a \nabla_b)^{TF} P_E + \epsilon_{(a}^c \nabla_b) \nabla_c P_B$$

(dvojměrný Levi-Civítův tenzor ϵ_a^c má dva indexy, TF označuje bezstopou část a ∇_a představuje gradient, v analogii s elektrodynamikou jsou zvoleny indexy E a B). Rekonstrukce těchto potenciálů z naměřených dat s vyznačenými směry polarizací je na



Obr. 3 Mapy polarizace zkoumaného pruhu oblohy rozložené do P_E a P_B (vpravo). Zatímco zde viditelné fluktuační P_E (nahore) měly vzniknout v důsledku (kvadrupólových) neizotropií zářivého pole v okamžiku vzniku CMB, mnohem slabší P_B (dole) by mělo představovat otisk gravitačních vln v poli polarizací. Pro srovnání je vpravo vykreslen výsledek simulace, jak by podle autorů měl vypadat naměřený signál P_E a šum P_B v případě, že by v době vzniku CMB nebyly gravitační vlny přítomny. Zobrazeny jsou jen fluktuační svlnovou délkou 3° – 7° . (Převzato z [1].)

obr. 3. Důležitost rozkladu do těchto potenciálů se odráží i v názvu [1]: *Detection of B-mode polarization at degree angular scales*.

B-mód a gravitační vlny spolu souvisejí kvůli způsobu vzniku polarizace CMB záření. Ta vzniká tím, že v okamžiku, kdy pozorované reliktní záření vznikalo rozptylem na volných elektronech, nebylo rozptylující se zářivé pole přesně izotropní. (Pokud na oblak elektronů dopadá více záření z vertikálního směru, v rozptýleném světle zaznamenáme přebytek horizontální polarizace a naopak). Klíčové však je, že takto vzniklé polarizační pole lze vyjádřit jen s pomocí E-módu. Nulová amplituda B-módu vznikne až deformací pole polarizací gravitačním polem. Zatímco na nejmenších úhlových škálách je důležitým zdrojem gravitační čočkování, má se za to, že hodnoty naměřené pro velké úhly jsou vysvětlitelné jen jako projev přítomnosti gravitačních vln zbylých po inflaci [3]. Srovnáním pozorovaného spektra B-módu s výsledky simulací vývoje perturbací v kosmologických modelech s různými hodnotami klíčových parametrů byla konkrétní hodnota poměru tenzorových a skalárních perturbací stanovena na $r = 0,20^{(+0,07)}_{(-0,05)}$.

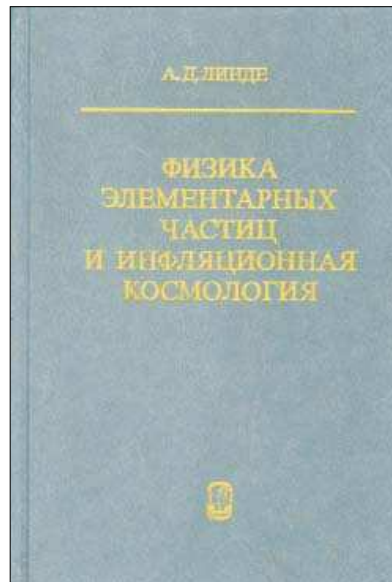
Za použití statistické analýzy i výsledků předcházejícího experimentu BICEP1 autoři argumentují, že zdrojem měřené polarizace není ani chyba měření ani kontaminace ostatními zdroji polarizovaného mikrovlnného záření a že naměřené P_E a zejména P_B představují skutečně obraz polarizace CMB. Za povšimnutí stojí, že P_B představuje 10^{-7} teploty CBR. Proto jsou pozoruhodné i použité metody zpracování naměřených dat, které umožnily tak malý příspěvek v datech nalézt. I tak museli autoři sdružit data do poměrně malého počtu košů s tím, že hlavní výsledek – fit hodnoty parametru r – se opírá o tři čtyři body spektra s vlnovou délkou asi 2° – 7° . To, že zpracování měření není vůbec snadné, ukazuje srovnání s týmem mise Planck, který sběr dat ukončil o půl roku dříve (leden 2012), ale výsledky měření polarizace se očekávají až v druhé polovině letošního roku. Nabízí se i srovnání s výsledky *South Pole Telescope*, který jako první nedávno dokázal B-mód v polarizaci CMB nalézt, ovšem jen pro vlnou

delší fluktuační délkou kratší než $0,7^\circ$ [5]. Ty vzniknou gravitačním čočkováním, tedy ohybem CMB v důsledku nehomogenit hustoty vesmírné látky během jeho letu k nám.

Doufejme, že se dočkáme potvrzení tohoto objevu a že nám gravitační vlny brzy začnou přinášet nové informace, a to nejen z počátku vesmíru.

Literatura

- [1] BICEP2 collaboration: „BICEP2 I: Detection of B-mode polarization at degree angular scales“, arXiv:1403.3985 (2014).
- [2] D. Langlois: „Lectures on inflation and cosmological perturbations“, in: *Lectures on Cosmology*. Springer 2010. Dostupné z WWW: arXiv:1001.5259.
- [3] U. Seljak, M. Zaldarriaga: „Signature of gravity waves in the polarization of the microwave background“, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2054 (1997).
- [4] Planck collaboration: „Planck 2013 results. XXII. Constraints on inflation“, arXiv: 1303.5082 (2013).
- [5] D. Hanson a kol.: „Detection of B-mode polarization in the cosmic microwave background with data from the south pole telescope“, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 141301 (2013).



Monografie Andreje Lindeho o částicové fyzice a inflační kosmologii vydaná v Moskvě v roce 1990.