

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Alexander Pitňa

Nobelova cena za fyziku za rok 2006

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 52 (2007), No. 1, 1--16

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141336>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2007

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



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

Nobelova cena za fyziku za rok 2006

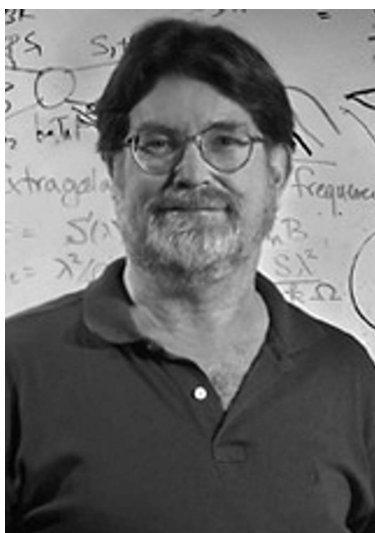
Alexander Pitňa, Praha

1. Úvod

V roku 2006 bola Nobelova cena za fyziku udelená Johnovi C. Matherovi a Georgeovi F. Smootovi za prekázanie planckovského spektra a anizotropie kozmického mikrovlnného žiarenia.



JOHN C. MATHER



GEORGE F. SMOOT

John Cromwell Mather, narodený roku 1946 v Roanoke vo Virgínii, je v súčasnosti vedúcim vedeckým pracovníkom v astrofyzike v Goddardovom centre vesmírnych letov NASA v Marylande a profesorom fyziky na Marylandskej univerzite. V roku 1968 získal titul B. A. vo fyzike na Swathmorskej vyššej odbornej škole. Šesť rokov na to získal titul Ph. D. z fyziky na California University Berkeley. V rokoch 1974–76 bol postgraduálnym študentom na Columbia University (Goddardov inštitút vesmírneho štúdia). V týchto rokoch podal návrh na projekt COBE, potom prešiel do GSFC, aby sa stal vedeckým pracovníkom (1976–88), projektovým pracovníkom (1988–98) a taktiež vedúcim projektu pre prístroj FIRAS. Treba ešte spomenúť, že pri príležitosti konania XXVI. valného zhromaždenia Medzinárodnej astronomickej únie v Prahe

Bc. ALEXANDER PITŇA (1985), Astronomický ústav, Matematicko-fyzikálna fakulta UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: offelius@gmail.com

v dňoch 14.–25. augusta 2006 John C. Mather spoločne s tímom COBE získali na zasadnutí IAU v Prahe Gruberovu cenu za kozmológiu, najvýznamnejšie ocenenie v tomto obore.

George Fitzgerald Smoot III, narodený roku 1945 v Yukone na Floride, je v súčasnosti experimentálnym astrofyzikom a profesorom na Lawrence Berkeley National Laboratory, kde pôsobí od roku 1970. Bakalársky titul z fyziky a matematiky dosiahol v roku 1966 na Massachusettskom technickom inštitúte (MIT), kde neskôr získal aj doktorát (1970). V ďalších rokoch podal návrh na projekt zahrňujúci satelit vybavený prístrojom na meranie jemnej anizotropie mikrovlnného žiarenia (neskôr nazvaný DMR). Stal sa vedúcim tímu spracovávajúceho dáta získané pomocou DMR.

Mather koordinoval celý proces vývoja družice COBE a bol zodpovedný za experiment odhalujúci charakter spektra mikrovlnného žiarenia, zatiaľ čo Smoot bol zodpovedný za merania malých zmien v teplote mikrovlnného žiarenia (zmien pri zmene smeru pohľadu na nebeskú sféru).

2. História objavu mikrovlnného žiarenia

Vôbec prvé pozorovanie mikrovlnného žiarenia bolo prevedené A. McKellarom (McKellar 1940) pomocou medzihviezdneho plynu v roku 1940. Mikrovlnné žiarenie bolo detekované nepriamo pri meraní spektra hviezdy ζ Oph, nachádzajúcej sa v súhvezdí Hadonosa. V spektre tejto hviezdy sa nachádza absorpčná čiara o vlnovej dĺžke 387.5 nm, čo dokazuje prítomnosť aniónov (CN^-). V skutočnosti sa táto čiara skladá z troch zložiek o vlnových dĺžkach 387.4608 nm, 387.5763 nm a 387.3998 nm. Prvá odpovedá prechodu aniónu CN^- zo stavu s najnižšou energiou (základného stavu) do vibračného stavu. Ďalšie dve čiary môžu vzniknúť jedine prechodom z najnižšieho rotačného stavu do iných vibračných stavov. Teda niektoré anióny CN^- sa musia nachádzať v tomto rotačnom stave. Zo znalosti energií základného a najnižšieho rotačného stavu a intenzity absorpčných čiar McKellar odhadol, že na anióny CN^- pôsobila porucha o efektívnej teplote 2.3 K. Po objave mikrovlnného žiarenia v roku 1965 ukázali Field a Hitchcock (1966), že touto poruchou bolo práve mikrovlnné žiarenie o teplote 2.7 K a vlnovej dĺžke 2.64 mm.

V roku 1965 sa rozhodli rádioastronómovia Arno A. Penzias a Robert W. Wilson použiť lievikovú rádiovú anténu k meraniu intenzity rádiových vln vyžarovaných z našej Galaxie na vysokých galaktických šírkach. Svoje merania prevádzali v oblasti mikrovln na vlnovej dĺžke 73.5 mm. Očakávali tiež príspevok od atmosféry v smere antény (tento by mal byť úmerný hrúbke atmosféry v smere antény). Penzias a Wilson očakávali, že vnútri antény by mal vznikáť len zanedbateľne malý elektrický šum. Pri pozorovaní zistili, že signál z antény je väčší, ako sa očakávalo, a nezávisí na smere antény ani na dennej a ročnej dobe. Najprv bolo nutné overiť, či v anténe nevzniká väčší šum, ako sa očakávalo. V hrdle antény totiž hniezdil párik holubov. Tí boli chytení a bolo odstránené znečistenie, ktoré tam spôsobili. Penzias ho nazval „bielym dielektrickým materiálom“. Tento by mohol byť pri pokojovej teplote zdrojom elektrického šumu. Avšak ani po vyčistení antény sa pozorovaný šum výrazne neznižil. Z pozorovaného

rádiového šumu Penzias a Wilson zistili, že mu odpovedá ekvivalentná teplota medzi 2.5 až 4.5 K. Pochopiteľne premýšľali, čo môže byť zdrojom tohto šumu. Vedeli len to, že jeho intenzita nezávisí na galaktickej šírke a dennej či nočnej dobe. Jeho zdroj teda musí ležať mimo našej Galaxie.

V tej dobe rozvinul P. J. E. Peebles (Peebles 1965) teóriu raného vesmíru, z ktorej vyplynula existencia kozmického rádiového šumu o ekvivalentnej teplote 10 K. Prostredníctvom rádioastrónoma Burkeho Peebles vedel o meraní rádiového šumu Penziasom a Wilsonom. Medzičasom sa začal Robert H. Dicke zaujímať o to, či by mohlo existovať žiarenie pochádzajúce z raného vesmíru. Spolu s P. G. Rollom a D. T. Wilkinsonom začali stavať nízkošumovú anténu, ktorá by bola schopná toto žiarenie zmerať. Skôr ako dokončili svoje merania, stretli sa Dicke s Penziasom a zistili, že mu objav vyfúkli. Rozhodli sa spoločne publikovať dve správy (Dicke, Peebles, Roll a Wilkinson 1965; Penzias a Wilson 1965) v časopise *Astrophysical Journal*. Penzias a Wilson oznámili výsledky svojich meraní a svoju správu nazvali „Meranie anténovej teploty na frekvencii 4080 MHz“, čím sa vyhli kozmologickým úvahám o pôvode prebytočného žiarenia, ktoré boli uvedené v druhej správe od Dicka, Peeblesa, Rolla a Wilkinsona.

Je dôležité podotknúť, že Peeblesov článok nebol prvý, ktorý predpovedal žiarenie vzniknuté v raných štádiách vývoja vesmíru. Snáď najdôležitejšiu prácu na toto téma vypracovali George Gamow, Ralph Alpher a Robert Herman (Alpher, Bethe a Gamow 1948). V roku 1948 ich hypotéza o syntéze jadier v kozmologickej teórii veľkého tresku predpovedala reliktové žiarenie o teplote asi 5 K. K podobným výsledkom dospeli aj Fred Hoyle a R. J. Taylor (Hoyle a Taylor 1964).

Je teda divné, že sa hypotetické reliktové žiarenie nezačalo hľadať už pred rokom 1965. Možnou príčinou mohla byť zlá komunikácia medzi teoretickými a experimentálnymi fyzikmi. Penzias a Wilson vôbec nevedeli o práci Gamowa, Alphera a Hermana a naopak teoretickí fyzici nevedeli o tom, že bolo vôbec možné zachytiť žiarenie o tak nízkej teplote. Ďalším dôvodom by mohla byť skutočnosť, že „fyzici nebrali vážne žiadnu teóriu raného vesmíru“¹⁾.

3. Žiarenie čierneho telesa

3.1. Historický úvod

Koncom 19. storočia boli objavené zákony popisujúce elektromagnetické žiarenie, resp. vlnenie. Toto malo rôzny zdroj, ako napríklad slnko, oheň, pevné látky (roztavené železo pri rôznej teplote) a pod. Ich podrobnou analýzou sa dospelo k zákonom, ktoré sú platné dodnes. Práca, ktorá zhrnula poznatky o elektromagnetickom žiarení v tej dobe, bola vypracovaná J. C. Maxwellom a vydaná v roku 1873 (*Treatise on Electricity and Magnetism*).

¹⁾ WEINBERG, S.: *První tři minuty*. 2. vydání. Mladá fronta, Praha 1998, str. 117.

Na prelome 19. a 20. storočia sa začala rozvíjať kvantová teória, ktorá priniesla vysvetlenie paradoxu objaveného pri popise žiarenia absolútne čierneho telesa ako žiarenia spojitého. Paradox spočíval v teoretickom modeli, v ktorom sa predpokladalo spojité rozloženie energie pre celé spektrum elektromagnetického žiarenia. Táto predstava viedla ku nezmyselnému záveru (ako napr. koľko energie obsahuje elektrická trúba zahriata na istú teplotu), a to, že táto energia je nekonečná. Zjavne bol problém v popise spektra elektromagnetického žiarenia. Tento problém ako prvý objasnil Max Planck v roku 1900. Planck objavil kvantovanie elektromagnetického spektra (každé teleso absorbuje a vyžaruje len nejaký počet fotónov žiarenia s určitými energiami). Objavil zákon, ktorý charakterizuje rozdelenie energie v spektre žiarenia absolútne čierneho telesa v závislosti na vlnovej dĺžke a teplote. Tento zákon je pomenovaný po ňom (Planckov zákon žiarenia čierneho telesa). Predtým boli objavené aj ďalšie zákony popisujúce elektromagnetické žiarenie (Wienov posunovací zákon, Stefanov-Boltzmannov zákon, Rayleighov-Jeansov zákon).

3.2. Teoretický úvod

V tomto článku sa budeme zaoberať popisom vlastností reliktového, resp. mikrovlnného žiarenia. A ako sa ukáže ďalej, toto žiarenie má vlastnosti žiarenia absolútne čierneho telesa. Z tohto dôvodu popíšeme vlastnosti žiarenia čierneho telesa. K tomu je potrebné zdefinovať isté fyzikálne veličiny, ktoré charakterizujú toto žiarenie:

- *Žiarivý tok* Φ [W]:
Je celková energia vyžiarená povrchom telesa o teplote T za sekundu.
- *Spektrálny žiarivý tok* Φ_λ [W · m⁻¹]:
 $\Phi_\lambda d\lambda$ je energia vyžiarená povrchom telesa teploty T za jednotku času v intervale vlnových dĺžok $\langle \lambda, \lambda + d\lambda \rangle$.
- *Intenzita vyžarovania* M [W · m⁻²]:
Je energia vyžiarená jednotkou plochy za sekundu.
- *Spektrálna hustota intenzity vyžarovania* M_λ [W · m⁻³]:
 $M_\lambda d\lambda$ je energia vyžiarená jednotkou plochy telesa o teplote T za sekundu v intervale vlnových dĺžok $\langle \lambda, \lambda + d\lambda \rangle$.
- *Spektrálna hustota počtu vyžiarených fotónov* N_λ :
 $N_\lambda d\lambda$ je počet fotónov vyžiarených jednotkou plochy telesa o teplote T za sekundu v intervale vlnových dĺžok $\langle \lambda, \lambda + d\lambda \rangle$.
- *Absorpcia* α :
Je podiel energie pohltenej telesom a energie dopadajúcej na teleso za jednotku času.
- *Spektrálna absorpcia* α_λ :
 $\alpha_\lambda d\lambda$ je podiel energie absorbovanej telesom a dopadajúcej energie v intervale vlnových dĺžok $\langle \lambda, \lambda + d\lambda \rangle$.

Kirchhoffov zákon hovorí, že podiel spektrálnej hustoty intenzity vyžarovania a spektrálnej absorpcie je nezávislý na povrchu telesa. Platí teda

$$\frac{M_\lambda}{\alpha_\lambda} = f(T, \lambda). \quad (1)$$

Tento pomer je preto závislý len na teplote a vlnovej dĺžke.

3.3. Charakteristiky žiarenia absolútne čierneho telesa

Absolútne čierne teleso je teleso s koeficientom spektrálnej absorpcie rovným 1. Pre takéto teleso s teplotou T platí Planckov zákon vyžarovania:

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (2)$$

resp.

$$N_\lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left(e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (3)$$

kde: h je Planckova konštanta,

c je rýchlosť svetla vo vákuu,

k je Boltzmannova konštanta.

Derivovaním (2) a (3) a úpravou sa odvodí Wienov posunovací zákon pre vlnovú dĺžku žiarenia λ_{\max} , pri ktorej sa vyžiari najviac energie a fotónov v intervale $\langle \lambda_{\max}, \lambda_{\max} + d\lambda \rangle$, pri určitej teplote T :

$$\lambda_{\max} T = 2.8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad \text{pre (2)}, \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} T = 3.6697 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad \text{pre (3)}. \quad (5)$$

Integrovaním (2) a (3) cez vlnové dĺžky odvodíme Stefanov-Boltzmannov zákon

$$M = \sigma T^4 \quad \text{pre (2)}, \quad (6)$$

kde

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.6705 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

je Stefanova-Boltzmannova konštanta, a

$$N = \varrho T^3 \quad \text{pre (3)}, \quad (7)$$

kde

$$\varrho = \frac{4\pi\zeta(3)k^3}{h^3 c^2} = 1.5205 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-3},$$

$$\zeta(3) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} = 1.202057.$$

4. Popis anizotropie teploty definovanej na sfére

Mikrovlnné žiarenie nám prichádza zo všetkých smerov nebeskej sféry. V prípade, že je žiarenie dokonale izotropné, nie sú žiadne problémy a popis je triviálny. Avšak pri prípadnej anizotropii mikrovlnného žiarenia musíme pristúpiť k nižšie uvedenému popisu.

Merania teploty mikrovlnného žiarenia od roku 1990 dokázali, že jeho teplota nie je úplne izotropná. Prvé merania odhalili dipólovú anizotropiu a ďalšie, s vyšším uhlovým rozlíšením, zistili rovnomerné rozloženie škvŕniiek s rôznym uhlovým priemerom a s teplotou líšiacou sa od priemernej teploty žiarenia. Efektívny popis takého rozloženia podáva rozklad funkčnej závislosti teploty na smere pozorovania $\vec{\vartheta}$ do sférických harmonických funkcií $Y_l^m(\vec{\vartheta})$, pretože na sfére tvoria ortogonálny systém funkcií v L^2 : $T(\vec{\vartheta}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_l^m(\vec{\vartheta})$ s koeficientmi a_{lm} . Celkový výkon, ktorý obsahuje multipól l , je daný výrazom: $l(l+1)C_l$, kde $C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$ závisí len na multipóle l kvôli izotropnosti, pričom $a_{lm} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin(\vartheta) d\vartheta \cdot T(\vartheta, \varphi) \cdot Y_l^m(\vartheta, \varphi)$. Závislosť $l(l+1)C_l$ na multipóle l sa nazýva multipólové výkonové spektrum²⁾. Súčasné merania sa sústreďujú hlavne na presné určenie tohto spektra.

5. Meranie mikrovlnného žiarenia

5.1. Prvé experimenty

Po „oficiálnom“ objave mikrovlnného žiarenia (Penzias a Wilson 1965), za ktorý získali Nobelovu cenu v roku 1978, začali rádioastronómovia merať jeho vlastnosti. V prvom rade sa merala jeho teplota na rôznych vlnových dĺžkach od 0.33 cm do 73 cm rádioteleskopmi pozemnými alebo umiestnenými na výškových balónoch. Výsledky meraní od roku 1965 do roku 1972 zhrnul Thaddeus (1972) (viď tab. 1). Teplota bola stanovená na ~ 3 K.

Určovali sa aj možné anizotropie v teplote mikrovlnného žiarenia. Penzias a Wilson (1967) zistili, že odchýlka od izotropie žiarenia na frekvencii 4080 MHz nie je väčšia ako 0.1 K. Ďalej napr. Carpenter, Gulkis a Sato (1973) určili hornú hranicu anizotropie v malom merítke (uhlový rozmer poľa rádioteleskopu bol 4.6 arcmin) na $|\Delta T/T| < 7.15 \cdot 10^{-4}$ na hladine významnosti 90 %. S vývojom technicky vyspelejších rádiových prijímačov sa merania spresňovali. Nástup raketovej techniky dovolil minimalizovať vplyv atmosféry na meranie. Atmosféra totiž prepúšťa elektromagnetické žiarenie pre vlnové dĺžky väčšie ako 1 až 3 mm. Okrem družíc sa merania uskutočňovali aj na lietadlách s maximálnymi výškovými hladinami a na balónoch, aby bol vplyv atmosféry čo najmenší.

Meranie na kratších vlnových dĺžkach bolo veľmi dôležité kvôli overeniu, či mikrovlnné žiarenie má vlastnosti žiarenia absolútne čierneho telesa s teplotou 3 K. Pre

²⁾ Angl. *angular power spectrum*.

TAB. 1. Výsledky priamych meraní mikrovlnného žiarenia medzi rokmi 1967 a 1971. Ref. Thaddeus (1972).

Vlnová dĺžka (cm)	T_b (K)	referencia
73.5	3.7 ± 1.2	Howell & Shakeshaft (1967)
49.2	3.7 ± 1.2	Howell & Shakeshaft (1967)
21.1	3.2 ± 1.0	Penzias & Wilson (1967)
20.9	2.5 ± 0.3	Pelyushenko & Stankevich (1969)
20.7	2.8 ± 0.6	Howell & Shakeshaft (1966)
7.35	3.3 ± 1.0	Penzias & Wilson (1965); Penzias (1968)
3.2	3.0 ± 0.5	Roll & Wilkinson (1966; 1967)
3.2	$2.69^{+0.16}_{-0.21}$	Stokes, Partridge & Wilkinson (1967)
1.58	$2.78^{+0.12}_{-0.17}$	Stokes, Partridge & Wilkinson (1967)
1.5	2.0 ± 0.8	Welch, Keachie, Thornton & Wrixon (1967)
0.924	3.16 ± 0.26	Ewing, Burke & Staelin (1967)
0.856	$2.56^{+0.17}_{-0.22}$	Wilkinson (1967)
0.82	2.9 ± 0.7	Puzanov, Salomonovich & Stankevich (1967)
0.33	$2.46^{+0.40}_{-0.44}$	Boyton, Stokes & Wilkinson (1968)
0.33	2.61 ± 0.25	Millea, McColl, Pedersen & Vernon (1971)

$T = 3\text{ K}$ je maximum vyžarovania na vlnovej dĺžke $\lambda = 0.97\text{ mm}$ podľa (4). V Rayleighovej-Jeansovej oblasti žiarenia absolútne čierneho telesa bolo mnoho presných meraní, ale vo Wienovej oblasti ani jedno. Z tohto dôvodu boli nutné merania mimo zemskú atmosféru.

Ďalšie merania anizotropie mikrovlnného žiarenia sa prevádzali na univerzitách Berkeley a Princeton. Podľa Smoota (1980) bola jednoznačne potvrdená anizotropia mikrovlnného žiarenia. Nameraná anizotropia má vlastnosti prvého rádu multipólového rozvoja (teda dipól). Vysvetlenie bolo zrejmé, rýchlosť pohybu Zeme vzhľadom ku žiareniu. V Berkeley namerali anizotropiu teploty $\Delta T = 3.5 \pm 0.5\text{ mK}$ (Smoot, Gorenstein a Muller 1977) a v Princetone $\Delta T = 3.0 \pm 0.3\text{ mK}$ (Cheng, Saulson, Wilkinson a Corey 1979). Veľkosť rýchlosti Zeme bola určená na $v = 300 \pm 40\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Paralelne s meraniami anizotropie sa prevádzali merania polarizácie mikrovlnného žiarenia. Jedno z prvých meraní previedli Lubin a Smoot (1979). Nenamerali žiadnu polarizáciu mikrovlnného žiarenia, či lineárnu alebo kruhovú. Ich merania určili hornú hranicu polarizácie. Ďalšie experimenty len spresňovali túto hranicu. Údaje o prvej nameranej polarizácii podali Kovac et al. (2002) (experiment DASI). Presné merania polarizácie vykonala až družica WMAP (<http://wmap.gsfc.nasa.gov/>).

5.2. Pozemné merania

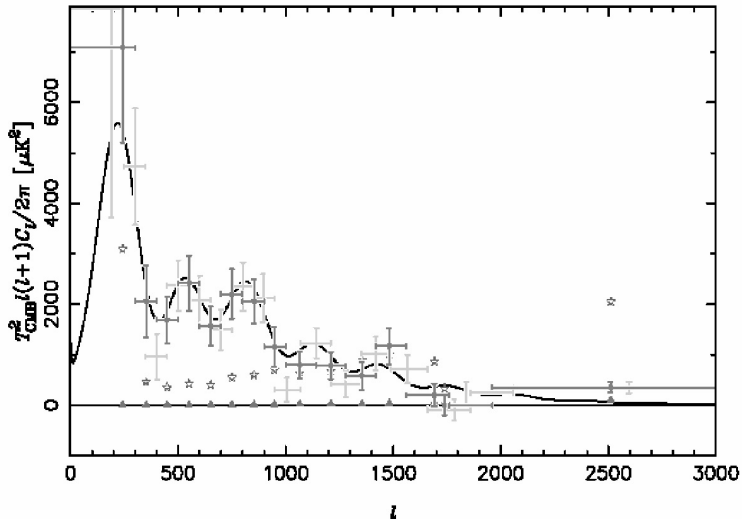
Merania mikrovlnného žiarenia z povrchu Zeme majú tu výhodu, že môžeme detekčné zariadenie obsluhovať priamo počas merania a riešiť prípadné problémy. Nie sme

obmedzení ani rozmermi prijímacieho zariadenia v rámci technických možností. Ale majú viaceré nevýhody. V prvom rade atmosféra Zeme neprepúšťa vlnové dĺžky pod 1 až 2 mm a je tu mnoho nepriaznivých vplyvov na prijímač. Z povrchu Zeme teda nemôžeme pozorovať Wienovu oblasť spektra mikrovlnného žiarenia a tým potvrdiť, že má vlastnosti absolútne čierneho telesa. Meraní zo Zeme bolo pochopiteľne veľké množstvo, vyberieme teda len tie najdôležitejšie.

CBI (Cosmic Background Imager)

CBI (<http://www.astro.caltech.edu/~tjp/CBI/>) je rádio-interferometer skladajúci sa z 13 elementov, operujúci v intervale frekvencií 26 až 36 GHz. Každý element tvorí 90cm Cassegrainova anténa. Všetky elementy sú umiestnené na jednej riadenej plošine. Úlohou interferometra je meranie multipólového výkonového spektra anizotropie teploty mikrovlnného žiarenia. Merania CBI pokrývajú výkonové spektrum pre multipóly v rozsahu $l \approx 200$ až 3500.

Interferometer vykonal v roku 2000 dva typy meraní mikrovlnného žiarenia: 1. Meranie s dlhými expozíciami (8h, 14h, 20h): Mason et al. (2003), 2. Mozaikové merania: Pearson et al. (2003). Meranie multipólového výkonového spektra anizotropie teploty je veľmi dôležité. Tvar tohto spektra výrazne obmedzuje voľbu vhodných kozmologických modelov. Teda čím presnejšie ho zmeriame, tým presnejšie vymedzíme hodnoty kozmologických parametrov. Na obr. 1 je znázornená teoretická krivka spektra a namerané hodnoty v rokoch 2001–2002.



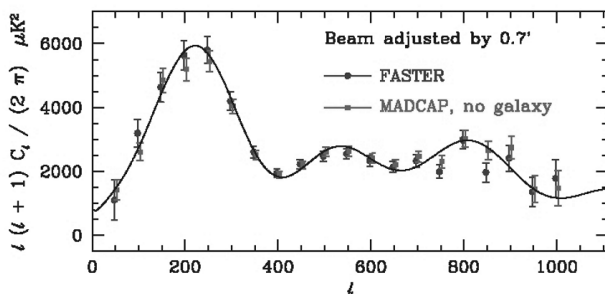
Obr. 1. Multipólové výkonové spektrum CBI. Čierna čiara znázorňuje teoretickú krivku spektra pre model WMAP Λ CDM (<http://lambda.gsfc.nasa.gov>, súbor `wmap_lcdm_pl_model_yri_vi.txt`). (Readhead et al. 2004).

5.3. Merania pomocou vzdušných balónov

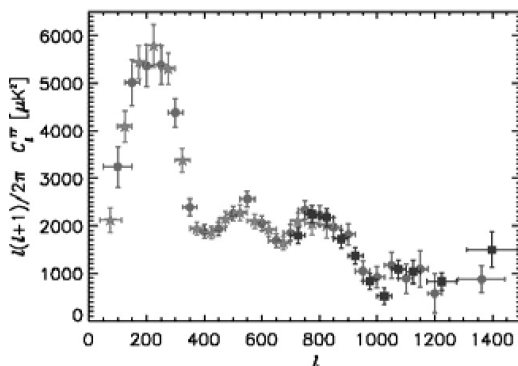
Meranie mimo atmosféru Zeme, resp. vo vysokých výškach nad jej povrchom pomocou balónov má jednu veľkú výhodu. Vplyv atmosféry je skoro zanedbateľný, teda prijímač môže prijímať elektromagnetické žiarenie s vlnovou dĺžkou pod 1 mm. Ďalšou výhodou je nízkosť nákladov na meranie. Tieto sú o mnoho menšie ako na vynesenie družice na obežnú dráhu.

BOOMERanG (Baloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation And Geophysics)

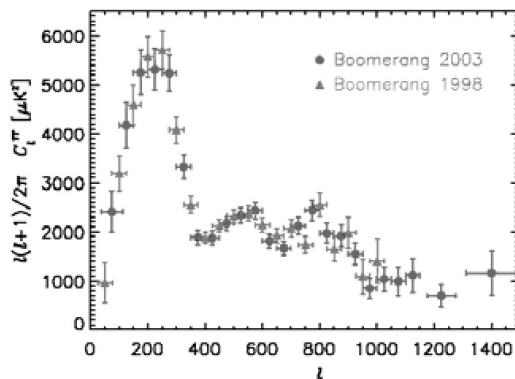
Srdcom experimentu BOOMERanG (<http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang/>) je teleskop pracujúci s elektromagnetickým žiarením s milimetrovými vlnovými dĺžkami. Hlavné zrkadlo teleskopu je mimoosý paraboloid s priemerom 1.3 m a ohniskovou vzdialenosťou 1.5 m. Detekčným zariadením je bolometrický prijímač pracujúci pri teplote 0.3 K. Detektor pracuje na štyroch frekvenciách (90; 150; 240; 400 GHz) pri uhlovom rozlíšení 0.3; 0.17; 0.23; 0.22 stupňa.



Obr. 2. Multipólové výkonové spektrum anizotropie teploty mikrovlnného žiarenia získané z meraní BOOMERanGu v roku 1998 (Ruhl et al. 2003).



Obr. 3. Multipólové výkonové spektrum anizotropie teploty mikrovlnného žiarenia získané z meraní BOOMERanGu v roku 2003 (Jones et al. 2005).



Obr. 4. Porovnanie multipólového výkonového spektra anizotropie teploty mikrovlnného žiarenia získaného z meraní BOOMERanGu v roku 1998 a 2003 (Jones et al. 2005).

Experimentálne zariadenie BOOMERanGu bolo vynesené do výšky cca 37 km nad povrch Zeme stratosférickým balónom s dlhou dobou letu. Meranie BOOMERanGu prebehlo zatiaľ dvakrát: Na prelome rokov 1998/1999 (12 dní letu) a v januári 2003 (14 dní letu). Cieľom BOOMERanGu bolo zmerať multipólové výkonové spektrum anizotropie teploty mikrovlnného žiarenia pre multipóly $50 \leq l \leq 1500$. Výsledky meraní z roku 1998 podali Ruhl et al. (2003) (obr. 2) a výsledky z roku 2003 Jones et al. (2005) (obr. 3, 4).

5.4. Merania pomocou družíc

Pozorovaním mikrovlnného žiarenia mimo atmosféru Zeme pomocou satelitov sa úplne odstráni vplyv atmosféry na meranie. Dovoľuje nám to merať mikrovlnné žiarenie na všetkých vhodných vlnových dĺžkach, ktoré nás zaujímajú.

COBE (Cosmic Background Explorer)

Projekt COBE sa pripravoval od roku 1974. Hlavná osoba, ktorá za celým projektom stála, bol John C. Mather, ktorý bol v tom čase postgraduálnym študentom na Columbijskej univerzite (Goddardovom inštitúte vesmírneho štúdia). Mather viedol celý organizačný tím a sám bol vedúcim vývoja prístroja FIRAS.

Družica COBE (<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>) bola vypustená 18. novembra 1989. Na jej palube sa nachádzali 3 vedecké prístroje:

DIRBE (Diffuze InfraRed Background Experiment) bol určený pre hľadanie kozmického infračerveného žiarenia pozadia oblohy. Pracoval v rozsahu vlnových dĺžok 1.25 až 240 μm . Veľkosť zorného poľa teleskopu bola $42' \times 42'$.

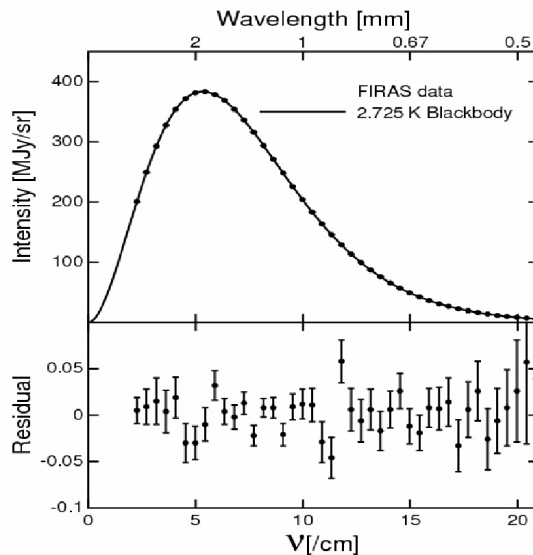
DMR (Differential Microwave Radiometer) mal zmapovať anizotropie teploty v mikrovlnnom žiarení. Detektory pracovali na frekvenciách 31.5, 53 a 90 GHz a zorné pole antény bolo 7° .

FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer) mal porovnať spektrum mikrovlnného žiarenia so spektrom absolútne čierneho telesa. Meral v rozmedzí vlnových dĺžok 0.1 až 10 mm.

Výsledky merania COBE: Bola určená teplota mikrovlnného žiarenia. DMR určil jeho teplotu na $T_0 = 2.725 \pm 0.020$ K (Kogut et al. 1996). Meranie FIRASu určilo teplotu na $T_0 = 2.725 \pm 0.002$ K (Mather et al. 1999). DMR určil dipólovú anizotropiu teploty mikrovlnného žiarenia s amplitúdou 3.353 ± 0.024 mK v smere súradníc $(\alpha, \delta)_{J2000} = (11^{\text{h}}12.2^{\text{m}} \pm 0.8^{\text{m}}, -7.06^\circ \pm 0.16^\circ)$ (Bennett et al. 1996). Ďalej sa pomocou DMR odhalila jemná anizotropia určená na 15.7 ± 2.2 μK na uhlovej škále 10° (Smoot et al. 1994). Výsledky FIRASu sú podobné: anizotropia teploty bola určená na 3.343 ± 0.006 mK v smere súradníc $(\alpha, \delta)_{J2000} = (11^{\text{h}}15.6^{\text{m}} \pm 0.4^{\text{m}}, -7.50^\circ \pm 0.15^\circ)$ (Fixsen et al. 1994). Z hodnoty dipólovej anizotropie teploty spôsobenej Dopplerovým efektom sa dá vypočítať rýchlosť Zeme vzhľadom na „absolútne“ pozadie: 371 ± 1 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ (Fixsen et al. 1996).

COBE FIRAS premeral intenzitu mikrovlnného žiarenia s veľkou presnosťou pre vlnové dĺžky 0.1 až 10 mm (viď obr. 5). Namerané hodnoty kopírujú v rámci chyby spektrum žiarenia čierneho telesa s teplotou 2.728 K. Tieto výsledky podporujú Einsteinov kozmologický princíp izotropnosti a homogenity.

COBE DMR zmeral anizotropiu mikrovlnného žiarenia s rozlíšením 7 uhlových stupňov. Namerané hodnoty podporujú predpovede o fluktuáciách hustoty v ranom vesmíre. Dôsledkom tejto nehomogenity primordiálnej látky sa mohli vytvoriť nehomogenity na kozmologických škálach (galaxie, kopy a superkopy galaxií).



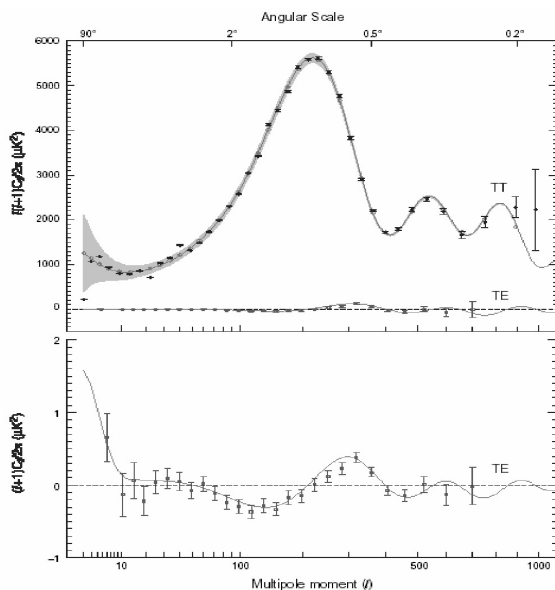
Obr. 5. Vrchná časť obrázku: Spektrum mikrovlnného žiarenia namerané prístrojom FIRAS COBE porovnané so spektrom žiarenia absolútne čierneho telesa. Spodná časť obrázku: Rozdiel medzi nameranými hodnotami a spektrom absolútne čierneho telesa (Fixsen et al. 1996).

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

WMAP (<http://wmap.gsfc.nasa.gov/>) je v súčasnosti najprecíznejšie experimentálne zariadenie na meranie mikrovlnného žiarenia. Je 45-krát citlivejšie a má 33-krát väčšie multipólové rozlíšenie ako COBE DMR. Družica je umiestnená v Lagrangeovom bode L_2 ($1.5 \cdot 10^6$ km od Zeme v smere od Slnka). Táto poloha bola vybraná kvôli minimalizovaniu pozemných zdrojov žiarenia a zvýšeniu efektivity merania (Slnko, Zem a Mesiac sa nachádzajú vždy mimo zorného poľa teleskopu). WMAP odštartovala v júni 2001 a jej úlohou bolo určenie mapy tepelných fluktuácií mikrovlnného žiarenia s rozlíšením 0.3° a citlivosťou $20 \mu\text{K}$. Charakteristiky detekčného systému sú uvedené v tabuľke 2 (http://wmap.gsfc.nasa.gov/m_mm/ob_techsummary.html).

TAB. 2.

Frekvencia (GHz)	22	30	40	60	90
Vlnová dĺžka (mm)	13.6	10.0	7.5	5.0	3.3
Počet kanálov	4	4	8	8	16
Rozlíšenie (FWHM, v stupňoch)	0.93	0.68	0.53	0.35	< 0.23
Citlivosť (μK , $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ pixel)	35	35	35	35	35
Rádiometer	diferenc. pseudo-korelačný s detekciou polarizácie				
Reflektor	duálny Gregoryho; 1.6×1.4 m primárne zrkadlo				



Obr. 6. Multipólové výkonové spektrá C_l^{TT} a C_l^{TE} určené trojročným meraním WMAP. Na hornom obrázku je pre porovnanie vynesené TE spektrum spolu s TT spektrom s rovnakými jednotkami $l(l+1)C_l/(2\pi)$ (μK^2). Na dolnom obrázku je TE spektrum v jednotkách $(l+1)C_l/(2\pi)$ (μK^2) (Bennett et al. 2003, Hinshaw et al. 2006).

Výsledky merania WMAP: WMAP zmeral multipólové výkonové spektrum anizotropie teploty mikrovlnného žiarenia s veľkou presnosťou pre multipóly $l = 2$ až 1000. Ďalej premeriaval polarizáciu mikrovlnného žiarenia. Výsledky priniesli obmedzenia na kozmologické parametre, a tým pádom aj na rôzne kozmologické modely vesmíru.

Určila sa mapa teplotných anizotropií mikrovlnného žiarenia s rozlíšením cca 0.3° a mapa polarizácie pokrývajúca celú oblohu pre päť frekvencií. Z mapy teplotnej anizotropie a polarizácie sa určilo multipólové výkonové spektrum TT a TE (viď obr. 6). Charakteristiky spektra sú uvedené v tabuľke 3.

TAB. 3. Hodnoty maxim a miním v multipólovom výkonovom spektre TT s ich nominálnymi hodnotami (Hinshaw et al. 2006).

	Multipólový moment l	ΔT_l^2 (μK^2)
Prvé maximum	220.7 ± 0.7	5619 ± 30
Prvé minimum	412.8 ± 1.9	1704 ± 27
Druhé maximum	531.3 ± 3.5	2476 ± 40
Druhé minimum	674.6 ± 12.1	1668 ± 85
Tretie maximum	1143 ± 167	2442 ± 355

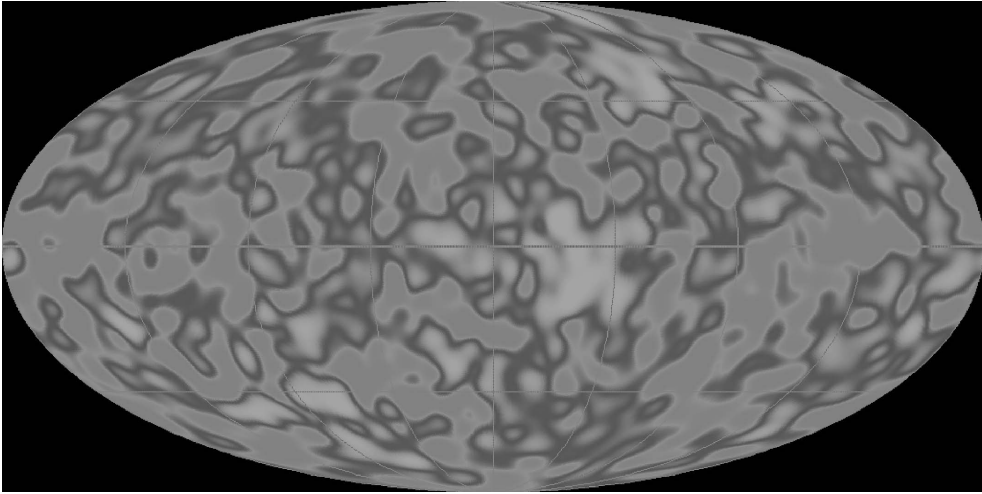
Ďalšie experimenty, ktoré merali anizotropiu teploty mikrovlnného žiarenia, boli napr.:

- ACBAR (Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver – <http://cosmology.berkeley.edu/group/swlh/acbar/>),
- BIMA (Berkeley Illinois Maryland Associations – <http://bima.astro.umd.edu/>),
- DASI (Degree Angular Scale Interferometer – <http://astro.uchicago.edu/dasi/>),
- MAXIMA (Milimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array – <http://cosmology.berkeley.edu/group/cmb/>),
- VSA (Very Small Array – <http://www.mrao.cam.ac.uk/telescopes/vsa/index.html>),
- CAPMAP (Cosmic Anisotropy Polarization Mapper – <http://www.phy.princeton.edu/cosmology/capmap/>),
- Relikt (<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/relikt/>).

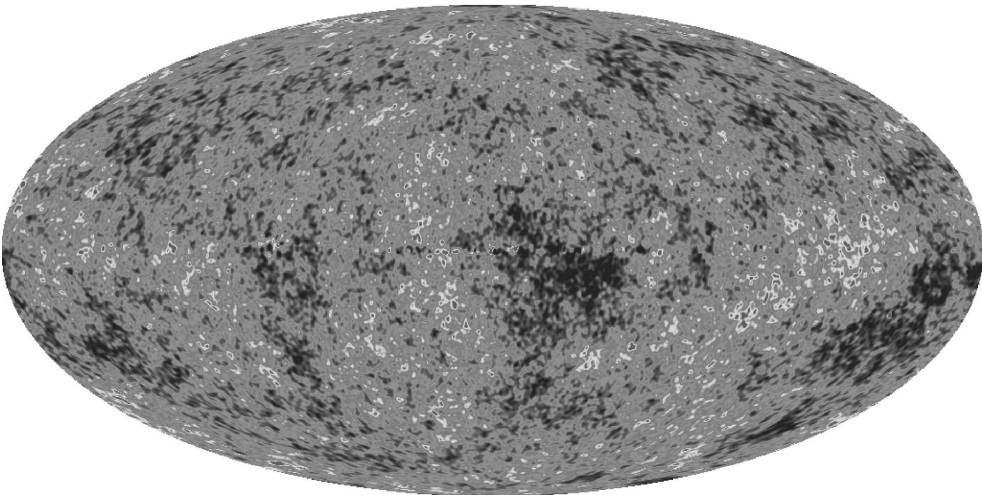
WMAP určila multipólové výkonové spektrum s veľkou presnosťou, no len pre multipóly 2 až 900. Dnešné experimenty sú zamerané skôr na oblasť $l > 1000$, kde by sa mali nachádzať ďalšie maximá a minimá v spektre.

Jeden z budúcich experimentov určených na meranie anizotropie mikrovlnného žiarenia je družica Planck. Jej merania majú spresniť a rozšíriť výsledky projektu WMAP.

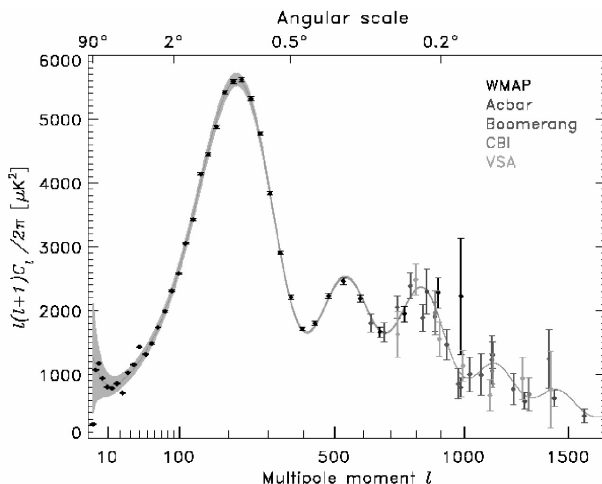
Porovnanie máp anizotropií mikrovlnného žiarenia získané pomocou COBE a WMAP



Obr. 7. Mapa teplotných anizotropií získaná pomocou zariadenia DMR na družici COBE (na mape je odstránená dipólová anizotropia, ktorá by vlastné jemné fluktácie mikrovlnného žiarenia prekryla, a taktiež je odstránený signál Galaxie). Mapa vznikla kombináciou dát získaných pre tri frekvencie 31, 53 a 90 GHz. Foto NASA (http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/dmr_image.cfm)



Obr. 8. Mapa teplotných anizotropií získaná spracovaním meraní z WMAP. Mapa vznikla lineárnou kombináciou máp pre päť frekvencií 22, 30, 40, 60 a 90 GHz. Váhy boli určené tak, aby minimalizovali galaktické pozadie. Samozrejme aj pri na tejto mape je odstránená dipólová anizotropia a následne galaktické žiarenie. Foto NASA (http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/map_images/ilc_gal_moll_1024.png)



Obr. 9. Multipólové výkonové spektrum získané pomocou experimentov WMAP, ACBAR, BOOMERanG, CBI a VSA (Hinshaw et al. 2006).

Doterajšie merania anizotropie teploty mikrovlnného žiarenia môžeme zhrnúť do obr. 9, kde sú vynesené najkvalitnejšie údaje multipólového výkonového spektra.

L i t e r a t ú r a

- [1] ALPHER, R. A., BETHE, H., GAMOW, G.: *The Origin of Chemical Elements*. Physical Review, Vol. 73 (1948), Issue 7, 803–804.
- [2] BENNETT, C. L., et al.: *Four-Year COBE DMR Cosmic Microwave Background Observations: Maps and Basic Results*. Astrophysical Journal Letters, Vol. 464 (1996), L1.
- [3] BENNETT, C. L., et al.: *First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basics Results*. Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 148 (2003), Issue 1, 1–27.
- [4] CARPENTER, R. L., GULKIS, S., SATO, T.: *Search for Small-Scale Anisotropy in the 2.7° K Background Radiation at a Wavelength of 3.56 Centimetres*. Astrophysical Journal, Vol. 182 (1973), p. L61.
- [5] CHENG, E. S., SAULSON, P. R., WILKINSON, D. T., COREY, B. E.: *Large-Scale Anisotropy in the 2.7° K Radiation*. Astrophysical Journal, Part 2, Vol. 232 (1979), p. L139–L143.
- [6] DICKE, R. H., PEEBLES, P. J. E., ROLL, P. G., WILKINSON, D. T.: *Cosmic Black-Body Radiation*. Astrophysical Journal, Vol. 142 (1965), 414–419.
- [7] FIXSEN, D. J., et al.: *Cosmic Microwave Background Dipole Spectrum Measured by the COBE FIRAS Instrument*. Astrophysical Journal, Part 1, Vol. 420, no. 2 (1994), 445–449.
- [8] FIXSEN, D. J., et al. (1996): *The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE FIRAS Data Set*. Astrophysical Journal, Vol. 473 (1996), 576.
- [9] FIELD, G. B., HITCHCOCK, J. L.: *The Radiation Temperature of Space at λ 2.6 MM and Excitation of Interstellar CN*. Astrophysical Journal, Vol. 146 (1996), 1.
- [10] HINSHAW, G., et al.: *Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature Analysis*. eprint arXiv:astro-ph/0603451 (2006).

- [11] HOYLE, F., TAYLER, R. J.: *The Mystery of the Cosmic Helium Abundance*. Nature, Vol. 203 (1964), 1108.
- [12] JONES, W. C., et al.: *A Measurement of the Angular Power Spectrum of the CMB Temperature Anisotropy from the 2003 Flight of BOOMERanG*. eprint arXiv:astro-ph/0507494 (2005).
- [13] KOGUT, A., et al.: *Microwave Emission at High Galactic Latitudes in the Four-Year DMR Sky Maps*. Astrophysical Journal Letters, Vol. 464 (1996), L5.
- [14] KOVAC, J. M., et al.: *Detection of Polarization in the Cosmic Microwave Background using DASI*. Nature, Vol. 420 (2002), Issue 6917, 772–787.
- [15] LUBIN, P. M., SMOOT, G. F.: *Search for Linear Polarization of the Cosmic Background Radiation*. Physical Review Letters, Vol. 42 (1979), Issue 2, 129–132.
- [16] MASON, B. S., et al.: *The Anisotropy of the Microwave Background to $l = 3500$: Deep Field Observations with the Cosmic Background Imager*. Astrophysical Journal, Vol. 591 (2003), Issue 2, 540–555.
- [17] MATHER, J. C., FIXSEN, D. J., SHAFER, R. A., MOSIER, C., WILKINSON, D. T.: *Calibrator Design for the COBE Far-Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS)*. Astronomical Journal, Vol. 512 (1999), Issue 2, 511–520.
- [18] MCKELLAR, A.: *Wave Lengths of the CH Band Lines*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 52 (1940), No. 309, 312.
- [19] PEARSON, T. J., et al.: *The Anisotropy of the Microwave Background to $l = 3500$: Mosaic Observations with the Cosmic Background Imager*. Astrophysical Journal, Vol. 591 (2003), Issue 2, 556–574.
- [20] PEEBLES, P. J. E.: *The Blackbody Radiation Content of the Universe and the Fomation of Galaxies*. Astrophysical Journal, Vol. 142 (1965), 1317.
- [21] PENZIAS, A. A., WILSON, R. W.: *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*. Astrophysical Journal, Vol. 142 (1965), 419–421.
- [22] PENZIAS, A. A., WILSON, R. W.: *Isotropy of Cosmic Background Radiation at 4080 Megahertz*. Science, Vol. 156 (1967), Issue 3778, 1100–1101.
- [23] READHEAD, A. C. S., et al.: *Extended Mosaic Observations with the Cosmic Background Imager*. Astrophysical Journal, Vol. 609 (2004), Issue 2, 498–512.
- [24] RUHL, J. E., et al.: *Improved Measurement of the Angular Power Spectrum of Temperature Anisotropy in the Cosmic Microwave Background from Two New Analyses of BOOMERanG Observations*. Astrophysical Journal, Vol. 599 (2003), Issue 2, 786–805.
- [25] SMOOT, G. F., GORENSTEIN, M. V., MULLER, R. A.: *Detection of Anisotropy in the Cosmic Blackbody Radiation*. Physical Review Letters, Vol. 39 (1977), 898–901.
- [26] SMOOT, G. F.: *Large-Angular-Scale Anisotropy in the Cosmic Background Radiation*. D. Reidel Publishing Co. (1980), 321–328.
- [27] SMOOT, G. F.: *Statistics and topology of the COBE differential microwave radiometer first-year sky maps*. Astrophysical Journal, Part 1, Vol. 437 (1994), no. 1, 1–11.
- [28] THADDEUS, P.: *The Short-Wavelength Spectrum of the Microwave Background*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 10 (1972), 305.