

Nobelova cena za fyziku 2006

Pohled na okraj nedohledna

JIŘÍ LANGER

Doc. RNDr. Jiří Langer, CSc., (*1939) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu UK. V Ústavu teoretické fyziky se zabývá teorií relativity, historií fyziky a filozofií přírodních věd.

Pozn. redakce: Čtenáři, kteří se zajímají podrobněji o historii COBE, mohou sáhnout hned po dvou knihách:

George Smoot a Keay Davidson: Wrinkles in Time.

John C. Mather a John Boslough: "The Very First Light: The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the Dawn of the Universe".

Mezi oběma laureáty zřejmě nepanovaly vždy neharmoničtější vztahy. John Mather ve své knize uvádí, že George Smoot porušil zásady výzkumné skupiny a oznámil tisku zprávu o objevech sám dříve, než ji formálně oznámila NASA, což Mather pokládal nejen za sebechválu ale za zradu. Ivan Boháček

John C. Mather (*1946).



Letošní Nobelova cena byla udělena dvěma americkým fyzikům, Johnu C. Matherovi z Goddardova centra pro kosmické lety NASA a Georgu F. Smootovi z Kalifornské univerzity za prokázání planckovského spektra a anizotropie mikrovlnného kosmického záření. Abychom pochopili význam jejich práce, řekněme si nejdříve něco o původu tohoto záření, často označovaného jako „reliktní“.

Jak studovat minulost vesmíru

V romanetu „Newtonův mozek“ popsal Jakub Arbes skvělou metodu pro studium historie. Jeho hrdina se vzdaluje od Země nadsvětelnou rychlostí, světlo tedy předbíhá a pozoruje obrazy z historie lidstva. Cestu k vývoji takové přímé metody studia pozemských dějin bohužel uzavřela teorie relativity, podle níž se nic rychleji než světlo pohybovat nemůže. Uplatňuje se však velmi účinně v kosmologii. Na dávnou historii té části vesmíru, ve které žijeme, se sice také podívat nemůžeme, jenže pozorování ukazují, že se značnou přesností platí kosmologický princip, podle nějž vypadají na velkých škálách všechny části pozorovatelného vesmíru v průměru stejně. Hledíme-li tedy mohutným dalekohledem do vzdálenosti miliardy světelných let, vidíme, jak to před miliardou let vypadalo na našem vesmírném dvorku.

Má to ale své problémy. Od Hubblova objevu koncem dvacátých let minulého století víme, že se vesmír rozpíná – průměrné vzdálenosti kosmických objektů se od sebe navzájem vzdalují. V důsledku toho utíkáme před světlem vyslaným vzdálenými galaxiemi, za jednotku času proto prochází naším okem méně vrcholů vln, než zdroj pozorovaného světla za stejnou dobu vyslal. Pozorujeme tedy větší vlnovou délku než pozorovatel v blízkosti zdroje, hovoříme o Dopplerově jevu. V „malých“ kosmických vzdálenostech, řekněme desítek milionů světelných let, se to projeví „rudým posuvem“, spektrum je posunuto ke svému červenému konci, tedy k nižším frekvencím či větším vlnovým délkám. Pro opravdu velké vzdálenosti, tedy v miliardách světelných let, je posuv už tak velký, že vyjde z oblasti viditelného světla a dostane se do oblasti ultrakrátkých radiových vln – jak víme, různé typy elektromagnetického záření se od sebe odlišují právě jen vlnovou délkou. Místo optického dalekohledu musí tedy přijít ke slovu radioteleskop, ale při dobrém zesílení stále můžeme v principu vidět obraz

zdroje (není to zdaleka tak jednoduché, jak zde líčím).

Chceme-li se však podívat opravdu hodně daleko, či (což je totéž) do hodně vzdálené minulosti, o něco více než před 13 miliardami let, narazíme na opravdové „nedohledno“. V bližší minulosti vidíme galaxie podobné našim, dále pozorujeme protohvězdy a protogalaxie, naše „nedohledno“ pak leží za „sférou posledního rozptylu“. Proč „nedohledno“?

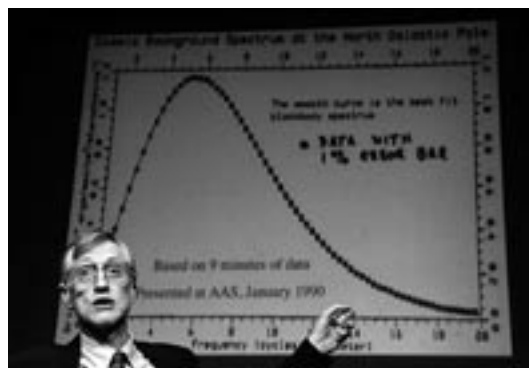
Jestliže se díváme na oblohu, když je zamračeno, nevidíme Slunce, přesto však není kolem nás tma. Světlo ze Slunce se rozptyluje na drobných kapičkách vody v mracích, ve kterých už dost dobře nemohou být přímočaré paprsky, jež by vykreslily optický obraz. Podobné difuzní prostředí, i když z jiných důvodů, panovalo v dávné minulosti ve vesmíru a vcelku snadno pochopíme proč.

Gamow a raný vesmír

Fyzikou raného vesmíru se jako první konzistentně zabýval George Gamow (či Jurij Gamov), ruský fyzik, který emigroval do USA před druhou světovou válkou. Své průkopnické kosmologické práce z konce čtyřicátých let však už podepisoval anglickým přepisem svého jména. Scénář vývoje vesmíru z velkého třesku předpokládá, že v raném vesmíru panovaly vysoké hustoty, a tím i teploty, jež se expanzí vesmíru stále snižují. Teplota vyjadřuje z mikroskopického hlediska střední energii částic a snadno nahlédneme, že za vysokých teplot, tedy za energií, které jsou větší než ionizační energie vodíku, nemohou existovat neutrální atomy – elektrony se odtrhnou od jader. V určitém údobí máme tedy místo atomů nabitě plazma, v němž částice navzájem elektromagneticky interagují, takže se obecně pohybují s velkým zrychlením. Urychlený náboj elektromagneticky září a energie produkovaného záření jde na úkor jeho kinetické energie. Záření naopak působí na nabitě částice a energii jim zase předává. Vytvoří se tedy rovnovážný stav: mezi částicemi, které mají určitou střední energii a tím určitou teplotu, a zářením. Záření, jež je v rovnováze s nabitými částicemi, můžeme přiřadit teplotu částic, s nimiž je v rovnováze. Záření se v tomto prostředí šíří neuspořádaně ve všech možných směrech, můžeme hovořit o fotonovém plynu, jeho směr se však neustále mění, fotony vznikají a zanikají. Šíření světla v mlze či v mraku je dobrým obrazem tohoto stavu.

Vesmír se ale rozpíná, hustota částic i fotonů klesá a zároveň klesá i jejich teplota. V určitém okamžiku poklesne střední energie fotonů pod ionizační energii vodíku, resp. helia, to jsou v té době jediné hojněji zastoupené prvky, a vytvoří se neutrální atomy. Ty už záření nerozptylují, látka, která se předtím chovala jako hustá mlha, je najednou krásně průzračná a každý foton pokračuje nerušeně v přímočaré cestě, například k přístroji pozemského astronoma. K tomuto oddělení „záření od hmoty“ dochází právě v údobí označeném jako „poslední rozptyl mikrovlnného záření“ (viz obr. na obálce a popis na s. 638), při teplotě zhruba 3000 K, a záření má v tomto okamžiku maximum intenzity kolem 1000 nm, tedy lehce v infračervené oblasti.

Spektrum rovnovážného záření v plazmatu záření je dáno Planckovým zákonem záření absolutně černého tělesa. Toto spektrum si záření zachovává i při své další pouti vesmírem, i když se vlnové délky mění díky kosmologickému rudému posuvu. Ekvivalentně můžeme říci, že se teplota tohoto záření stále snižuje. Dnes odpovídá rovnovážnému záření o teplotě 2,7 K, např. kdybychom vzali krabíčku a její stěny vychladili na tuto teplotu,



2. Záření má skutečně planckovský charakter, jak prokázal Matherův tým.

bylo by uvnitř záření právě takové, jakým je toto „mikrovlnné kosmické pozadí“.

Právě to si uvědomil Gamow a předpověděl existenci tohoto záření, i když jeho teplotu poněkud nadhodnotil.

Důsledky Penziasova a Wilsonova objevu

V r. 1964 zkoumali Arno Penzias a Robert Wilson radiové záření přicházející z naší galaxie a objevili nějaký šum, který odpovídal záření o teplotě přibližně 2,7 K. Na tomto záření udivovala jeho izotropie – mělo stejnou intenzitu, ať byla jejich anténa namířena v libovolném směru. Záhy v něm bylo identifikováno reliktní kosmologické záření, které předpověděl Gamow. Za tento objev dostali v r. 1978 Nobelovu cenu. Právem, protože právě reliktní záření se stalo jedním z nejdůležitějších nástrojů observační kosmologie.¹

Penziasův a Wilsonův objev především dal zapravdu obecné představě vesmíru s velkým třeskem. Okamžitě vyloučil teorie stacionárního vesmíru, který se sice rozpíná, ale stále se v něm tvoří hmota, takže průměrná hustota zůstává stejná. Stacionární vesmír měl vý-



Zleva Giovanni de Amici, Charles Lineweaver, Luis Tenorio, George Smoot (předkloněný), John Gibson (vzadu) a Jon Aymon kontrolují na střeše jedné z budov Lawrence Berkeley Laboratory diferenciální mikrovlnný radiometr.

znamné příznivce, např. astrofyzika Freda Hoyle či laureáta Nobelovy ceny Hannese Alfvéna.² K důkazu, že jde opravdu o reliktní záření, bylo ovšem třeba proměřit spektrum ve větším oboru frekvencí a ukázat, že se řídí Planckovým zákonem záření absolutně černého tělesa. To z Penziasova a Wilsonova měření nevyplývalo. Prokázat tuto skutečnost v širokém rozmezí frekvencí se podařilo právě J. C. Matherovi, resp. jeho týmu.

Izotropie záření navíc potvrzovala, že kosmologický princip je v podstatě v pořádku. Představme si, že vesmír by sice expandoval, ale v různých velkých oblastech by měl různou hustotu. Pak by se v různých místech vesmíru oddělilo záření od látky v různých časech a reliktní mikrovlnné záření by k nám přicházelo z různých směrů s různou intenzitou, což pozorování vylučuje.

Detailnějšímu studiu mikrovlnného záření se začala věnovat řada experimentálních týmů. Předně bylo třeba ukázat, že záření má skutečně planckovský charakter, jak teorie jasně předpovídá (obr. 2). Právě to byla zásluha Matherova týmu. Všimněme si teď trochu podrobněji kosmologického principu.

Náš svět jako nejdokonalejší z možných světů

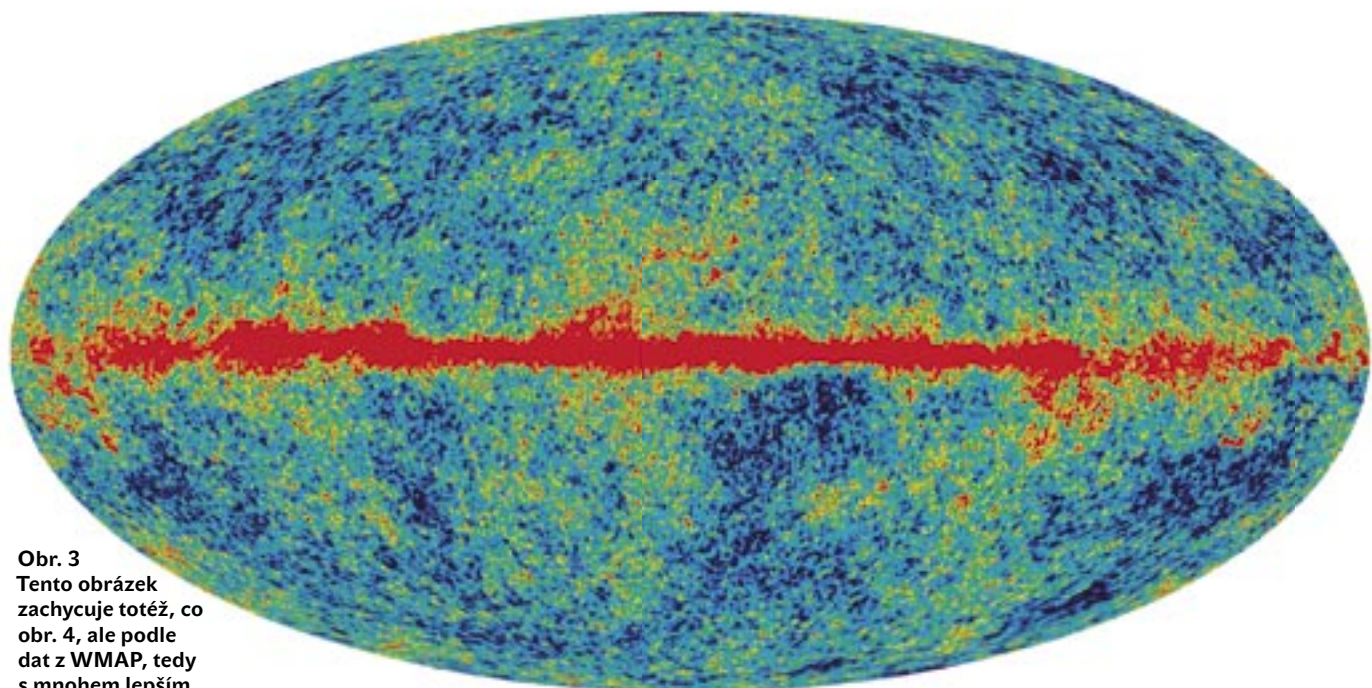
V díle *Théodicée* obhajoval G. W. Leibniz tezi, že náš svět je nejlepší z možných světů. Samozřejmě uznával, že na světě je mnoho věcí špatných, ale jsou nutné k tomu, aby vynikly

1) Především díky němu není schematický obrázek na obálce (popis na s. 638) vědeckou fantazií, nýbrž scénářem, jenž byl podložen pozorováním, byť k jeho vytvoření bylo třeba udělat ještě hodně pozorovací i teoretické práce.

2) Množství vznikajících částic, které by zaručilo konstantní hustotu expandujícího vesmíru, je tak nepatrné, že laboratorními pokusy se nedal tento model vyloučit.



George F. Smoot (*1945).

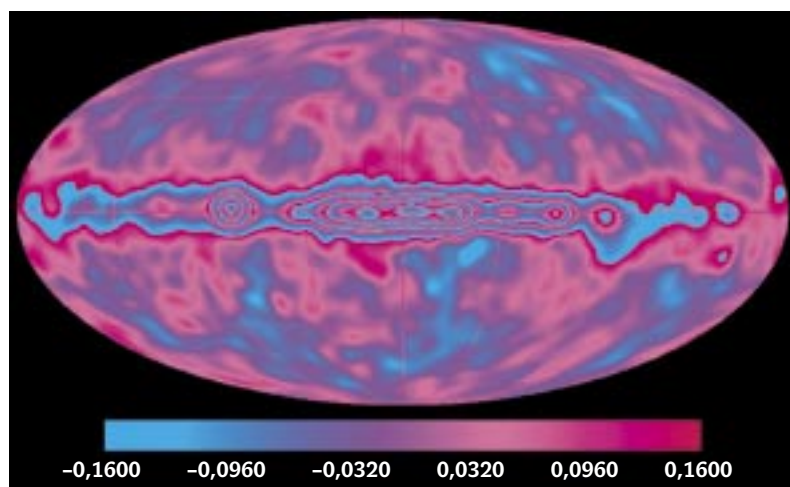


Obr. 3
Tento obrázek zachycuje totéž, co obr. 4, ale podle dat z WMAP, tedy s mnohem lepším úhlovým rozlišením (užití barvy jsou konvenční).

3) Expanze vesmíru neznamená, že by se rozšiřovala sluneční soustava nebo rozměr takové gravitačně vázané kupy galaxií. Můžeme to říci tak, že lokální gravitace překonala původní expanzi hmoty a gravitačně vázané systémy, jako jsou hvězdné soustavy či jednotlivé galaxie, se již vyvíjejí nezávisle na celkové expanzi.

4) Existence privilegovaného systému ve vesmíru ovšem nijak nenarušuje teorii relativity.

Obr. 4. Zde jsou barevně zachyceny odchylky teploty záření z různých míst nebeské sféry podle měření z družice COBE.



ty dobré, takže v průměru je náš svět tím nejlepším z možných.

Kvantifikovat dobro je dost obtížné; pokud ale vezmeme jako míru dokonalosti vysokou symetrii, tvrdí kosmologický princip něco podobného – svět je stejný na všech místech a ve všech směrech, má tu nejvyšší možnou prostorovou symetrii. Stačí se ovšem podívat na noční oblohu a vidíme, že to může platit také jen jaksi v průměru – někde vidíme různě jasné hvězdy a někde nevidíme nic. Když pokročíme o stupeň dále, zjistíme, že hvězdy jsou seskupeny v galaxie a galaxie v kupy a nadkupy. Teprve na opravdu velkých měřítkách, vezmeme-li základní buňku o velikosti zhruba 300 milionů světelných let, jsou průměrné vlastnosti všude stejné. Toto se však přímými astronomickými pozorováními ověřuje poměrně obtížně.

Penziasova a Wilsonova měření ovšem naznačila, že v dávné minulosti, dříve než se vytvořily hvězdy a galaxie, byla hmota opravdu se značnou přesností rozložena homogenně, a proto je rozumné předpokládat, že seskupení vzniklá granulací této původně homogenně rozložené hmoty si na velkých škálách tuto symetrii uchovala.

Přesnost, s jakou se reliktní zářeníjevilo jako izotropní, vedla ke dvěma „záhadám“. V souvislosti s první záhadou si připomeňme jiné Leibnizovo dílo, *Monadologii*, v němž Leibniz tvrdí, že (trochu zjednoduší) mezi základními stavebními kameny světa neexistuje kauzální působení. Náš dojem, že objekty na sebe působí, je důsledkem *předem ustanovené harmonie* mezi nimi.

Už jsme řekli, že stejná intenzita mikrovlnného záření z protilehlých směrů znamená, že v pozorovaných oblastech byla v okamžiku posledního rozptylu stejná hustota hmoty. Podle tehdy uznávaného scénáře vývoje vesmíru však tyto oblasti mezi sebou nemohly od Velkého třesku žádným způsobem interagovat, žádný signál prostě nestačil dostat se z jedné oblasti do druhé. Buď je tedy homogenita vesmíru důsledkem předem vyladěné harmonie již ve Velkém třesku, nebo je něco v nepořádku s naší představou o vývoji nejranějšího vesmíru. Zmíněný problém se alespoň částečně vyřešil předpokladem, že v zlomku sekundy po velkém třesku proběhla inflace, prudké nadouvání vesmíru. Podle této teorie je celý pozorovatelný vesmír nafouknutá bublinka, v níž mohla vzhledem k jejímu nepatrnému rozměru před počátkem inflace hmota interagovat, a tím se vyhladily všechny případné „hrboly“.

Druhý problém byl z opačného konce úhlových rozměrů. Jak uvidíme později, dokonalá homogenita v období posledního rozptylu by vylučovala existenci galaxií a hvězd, včetně té naší.

G. Smoot a galileovské „*Eppure si muove*“

Nejnámější, i když apokryfický Galileiho výrok se zpravidla překládá „A přece se točí“, ač správnější a výstižnější by bylo „se pohybuje“. Galileo měl asi na mysli především pohyb Země kolem Slunce. V 19. století proběhlo mnoho neúspěšných pokusů změřit pohyb Země vzhledem k éteru, který měl představovat jakousi fyzikální realizaci absolutního prosto-

ru, až teorie relativity sprovedila éter spolu s absolutním prostorem ze světa.

Mikrovlnné záření však ve vesmíru význačný vztažný systém vytváří. Jeho pevné body tvoří pozorovatelé, kteří záření pozorují jako izotropní, tj. přicházející ze všech stran se stejnou intenzitou. Pozorovatel, který by se vzhledem k systému (rychle) pohyboval, uvidí pole záření deformované Dopplerovým jevem a změnou geometrie paprsků (aberrací) – ve směru, kam se pohybuje, bude měřit intenzitu reliktního záření o něco vyšší, ve směru opačném naopak nižší.

Naše Galaxie vytváří spolu s dalšími blízkými galaxiemi něco analogického sluneční soustavě – vzájemná přitažlivost je táhne k sobě a ony se pohybují kolem společného hmotného středu, takže je odstředivá síla drží v rovnováze. V klidu vůči „absolutnímu“ vesmírnému systému by měl být tento hmotný střed, nikoliv naše Galaxie, tím méně naše Země.³

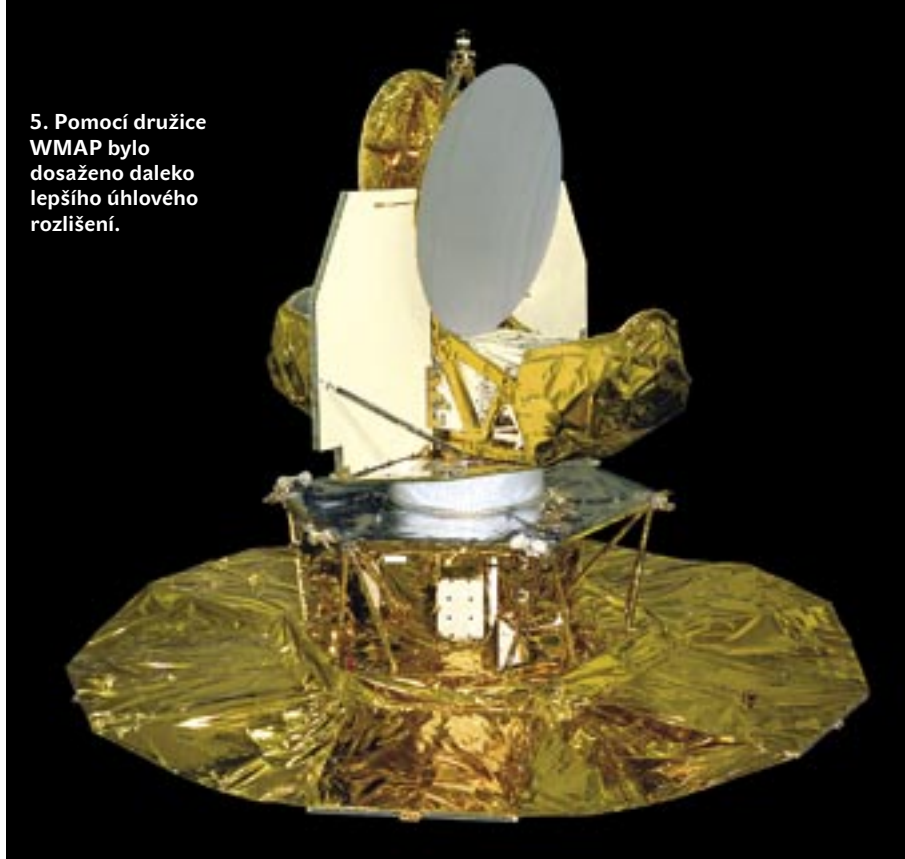
Tento „absolutní“ pohyb Země vůči moři mikrovlnného záření⁴ měřil G. Smoot se spolupracovníky v druhé polovině sedmdesátých let minulého století. Měření mikrovlnného záření narušuje šum pocházející ze Země. Proto se začalo měřit ve velkých výškách přístroji vynášenými balony. Smootův tým užil americké špionážní letadlo U2, na které umístil diferenciální mikrovlnný radiometr vlastní konstrukce. Nebudeme zde popisovat technické detaily, i když by si to pro obtížnost celého projektu zasloužily, jen zdůrazníme, že toto zařízení neměřilo absolutní velikost intenzity záření, nýbrž porovnávalo intenzitu záření ve dvou opačných směrech. Už jsme se zmínili, jak vzhledem k Planckovu zákonu souvisí intenzita záření s jeho teplotou, takže – řečeno jinak – porovnávalo teplotu oblohy ve dvou směrech. Výsledek přesvědčivě ukázal, že rozdíly teplot v opačných směrech v poměru k hodnotě teploty $\Delta T/T$ jsou řádu 10^{-3} , což odpovídá rychlosti pohybu vzhledem k poli mikrovlnného záření okolo 400 km/s.

Konečně k letošní Nobelově ceně

Nobelova cena byla udělena především za výsledky dosažené pomocí družice COBE, která byla vypuštěna na oběžnou dráhu v listopadu 1989, výsledky byly zveřejněny o tři roky později. Její jméno je anagramem Cosmic Background Explorer, tedy „výzkumník kosmického pozadí“, a jejím cílem bylo detailnější proměření mikrovlnného záření. John C. Mather byl vedoucím celého projektu a hlavním výzkumníkem projektu, který detailně a velmi úspěšně proměřil spektrální křivku a prokázal její výbornou shodu s teoretickou předpovědí (obr. 2). George F. Smoot vedl pomocí diferenciálního radiometru pátrání po drobných neizotropiích záření na malé úhlové škále.

Abychom pochopili důležitost Smootových měření, musíme si něco říci o tom, jak se mohly z hmoty, která se zdála být na sféře posledního rozptylu homogenně rozložená, vytvořit dnešní shluky – galaxie. Základní mechanismus je v podstatě jasný. Předpokládáme, že v homogenně rozložené hmotě dojde k něja-

5. Pomocí družice WMAP bylo dosaženo daleko lepšího úhlového rozlišení.



kému zhuštění. Gravitační působení mezi částicemi sílí se zmenšující se vzdáleností, takže vlastní gravitace tohoto zhustku jej dále koncentruje a výsledkem procesu na různých škálách může být hvězda či galaxie. Podle teoretických modelů by se však galaxie nevytvořily, kdyby už při oddělování záření od látky neexistovaly jejich zárodky – drobná zhuštění ve skoro homogenně rozložené hmotě. Už jsme uvedli, že malé rozdíly v hustotě znamenají i rozdíly v teplotě. Obrovským úspěchem COBE bylo, že se skutečně při změně směru pozorování o pár stupňů objevily změny teploty $\Delta T/T$ řádu 10^{-5} (efekt pohybu Země je samozřejmě odečten). Tato malá variace v teplotě, a tedy i v hustotě (obr. 4 a 6) stačí k tomu, aby se galaxie opravdu mohly vytvořit.

Výsledky COBE velice zpřesnily družice WMAP (obr. 3 a 5), vypuštěná v r. 2001. Data z ní byla zveřejněna r. 2003 a dosud se analyzují. Bohatství informací takto získaných dovolilo vytvořit již opravdu detailní a přesný scénář vývoje vesmíru. Tým COBE jako první spatřil prvotní struktury ve vesmíru. ☞

6. Galaxie by nevznikly, kdyby při oddělování záření od látky neexistovala drobná zhuštění hmoty. Malé rozdíly v hustotě ovšem znamenají i rozdíly v teplotě. Zjištěné teplotní rozdíly jsou zobrazeny různobarevnými skvrnami. Úhlové rozlišení přístroje na COBE nebylo příliš dobré, skvrny nemůžeme s jistotou pokládat za zárodky budoucích galaxií. Podrobnější rozbor však ukázal, že data z COBE jsou s naznačenou teorií v souladu.

