

Reliktní záření

Petr Kulhánek

Reliktní mikrovlnné záření je jedním z mála pramenů objektivních informací o stavu vesmíru několik stovek tisíc let po Velkém třesku. Balónové experimenty posledních čtyř let a loňská sonda MAP nám umožňují poznávat o trochu více Vesmír – náš domov.

Co je to reliktní záření?

Dnes předpokládáme (a jsou pro to snad i dostatečně přesvědčivé experimentální důkazy), že vesmír byl ve svých raných fázích velmi horký. Elektromagnetické záření velmi silně interagovalo s hmotou, zejména s volnými elektrony, kterých bylo ve vesmíru velké množství. Záření mělo charakter rovnovážného záření černého tělesa. Spolu s rozpínáním vesmíru docházelo k chladnutí hmoty se zářením. Asi 400 000 let po Velkém třesku došlo ale ve stavbě vesmíru k jedné zásadní změně. Vesmír ochladl natolik, že elektrony začaly vytvářet atomární obaly kolem zatím horkých jader vodíku a hélia. Končí era volných elektronů a s tím i silná provázanost elektromagnetického záření na hmotu. Chybějící volné elektrony způsobují, že vesmír se stává pro elektromagnetické záření průhledným. Záření začíná žít svým vlastním životem. Elektrony v atomárních obalech samozřejmě nadále interagují s fotony, jsou schopné vybuzení na vyšší energetické hladiny, mohou absorbovat i reemitovat fotony některých frekvencí. Intenzita těchto procesů je ale neporovnatelně nižší než při interakci volných elektronů s fotony. Právě volné elektrony doposud udržovaly kontakt záření s látkou.

Elektromagnetické záření oddělené několik set tisíc let po Velkém třesku od látky vyplňuje celý vesmír. Spolu s jeho rozpínáním se zvětšuje vlnová délka tohoto záření a klesá jeho teplota. Dnes mají reliktní fotony vlnovou délku kolem jednoho milimetru a v jednom centimetru krychlovém jich je přibližně jeden tisíc. Teplota záření je necelé tři Kelviny a v záření je otisknut stav světa v době oddělení záření od látky. Stačí se jen pozorně dívat a uvidíme obraz našeho vesmíru 400 000 let po Velkém třesku...

Přibližně v době, kdy se záření oddělilo od hmoty, také poprvé poklesla hustota energie záření pod hodnotu hustoty energie hmoty. Zda tato událost je v nějaké spojitosti se záchytem volných elektronů do atomárních obalů, či zda jde o náhodnou koincidence, není zatím známo.

Prehistorie

Z doby před oficiálním objevem reliktního záření v roce 1965 se zastavme u tří významných letopočtů: V roce 1941 W. S. Adams a A. Mc Kellar zjistili, že ve spektru hvězdy ζ Oph je jedna z mezihvězdných absorpčních čar excitována do rotačního stavu. Tuto excitaci způsobují fotony s vlnovou délkou 2,63 mm. Efektivní teplota působící poruchy byla 2,3 K. V této



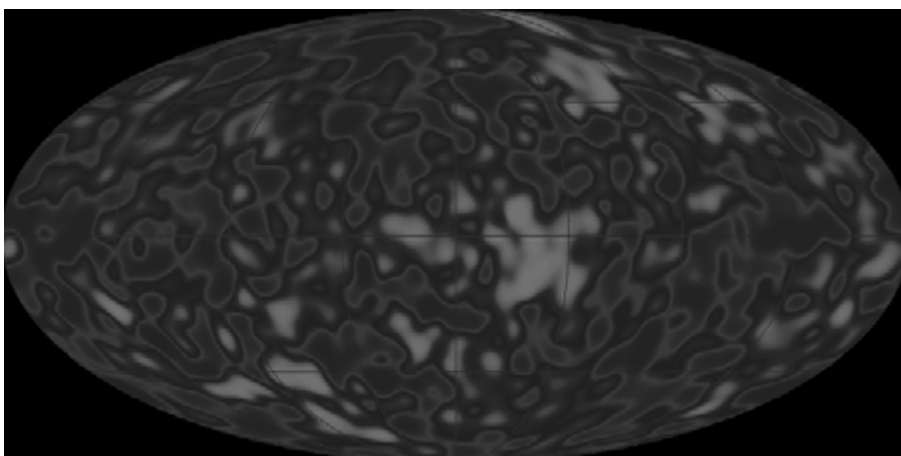
Robert Wilson (nalevo) a Arno Penzias (napravo) před anténou, pomocí které bylo objeveno v roce 1965 reliktní záření

době však nikdo ještě nic netušil o existenci mikrovlnného záření pozadí, a tak si tato měření na své vysvětlení musela ještě dlouho počkat. Druhým letopočtem je rok 1948. G. Gamow, R. Alpher a R. Herman vytvářejí model horkého vzniku vesmíru. Předkládají první, ne zcela korektní teorii vzniku prvků. Pro náš příběh je ale podstatné, že předpovídají oddělení záření od hmoty jako důsledek chladnutí vesmíru. Podle jejich předpovědi by záření dnes mělo být pozorovatelné jako všudypřítomné záření absolutně černého tělesa o teplotě asi 6 K. Nikdy se však nepokusili toto záření hledat ani nepodnikli žádné kroky k zajištění vhodných experimentů. Je to určitě velká škoda, protože v té době již existovala dostatečně citlivá zařízení schopná detekce reliktního záření. Odhad teploty záření byl řádově správný, dnes víme, že přesná hodnota teploty záření je 2,73 K. Posledním zajímavým letopočtem před objevem záření je rok 1965. Významný sovětský kosmolog, akademik J. Zeldovič, spolu s anglickými astronomy F. Hoylem (mimochodem zemřel v loňském roce 2001) a J. Taylorem nezávisle předpověděli existenci reliktního záření. Nevěděli nic o předchozích pracích svých kolegů.

Objev záření (1965)

Samotný objev reliktního záření byl v minulosti již tolikrát medializován, že se omezím jen na základní fakta.

K objevu reliktního záření posloužila trychtýřovitá anténa patřící společnosti Bell Telephone Laboratories. Anténa byla



Mapa fluktuací reliktního záření pořízená družicí COBE

Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (*1959)

vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře FEL ČVUT.

postavena v roce 1960 podle návrhu A. B. Crawforda v Murray Hill ve státě New Jersey. S touto radiovou anténou byly zpočátku sledovány odrazy signálu od družice Echo na vlnové délce 73,5 mm. Anténa měla trychtýřovitý tvar se sběrnou plochou 25 m². Poměr citlivosti v dopředném a zpětném směru byl 3000:1. Úroveň šumu tisícinásobně převyšovala vlastní signál. V roce 1963 byly ukončeny práce s družicí Echo. Arno Penzias a Robert Wilson chtěli anténu využít pro radiové mapování Mléčné dráhy a sledování radiových signálů galaxií. Při měření mikrovlnného pozadí vyloučili vlastní šum antény, vlnovodu, maseru, konvertoru, oblohy, atmosféry a známých zdrojů. Přesto zůstalo ještě všesměrové záření pozadí, které se chovalo jako záření absolutně černého tělesa o teplotě 2,7 K. Toto záření nevyzrálo ani po dvojím rozebrání a vyčištění antény (včetně odstranění párku hnízdících holubů a jeho trusu). Šlo právě o reliktní záření, jehož teplota řádově souhlasí s prvním Gamovovým odhadem.

Objev byl oznámen v roce 1965 v prestižním časopise *Astrophysical Journal* ve formě dvojčlánku. A. Penzias a R. Wilson oznámili objev neznámého záření spolu s jeho parametry. R. Dicke, P. G. Roll, D. T. Wilkinson a P. J. E. Peebles ve stejném čísle publikovali teoretický článek zdůvodňující, že nalezené záření může být reliktním zářením. Ani experimentální ani teoretická skupina neznala práce svých předchůdců o reliktním záření.

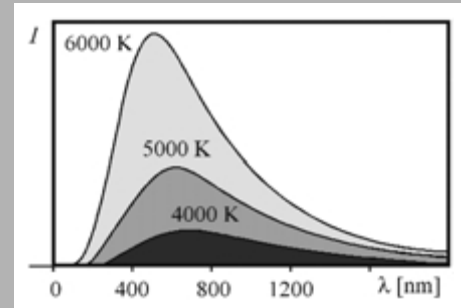
V roce 1974 byla existence reliktního záření potvrzena zcela nezávislým způsobem při měření excitací mezihvězdného kyanu. Přejechou molekul do druhého



Družice COBE (Cosmic Background Explorer), která od roku 1989 podrobně zkoumala reliktní záření

Záření černého tělesa

Černé těleso je hypotetické těleso, které absorbuje veškeré záření na něho zvenku dopadající. Tím, že světlo se od takového tělesa neodráží, bude se jevit jako černé. Ve skutečnosti je uvnitř tělesa v rovnováze záření s látkou a toto záření je emitováno povrchem celého tělesa. Jeho intenzita je závislá na vlnové délce podle Planckova zákona. Vlnová délka maxima vyzařování je nepřímo úměrná teplotě. Většina hvězd září právě jako černé těleso. Samo reliktní záření je také s vysokou přesností zářením černého tělesa s maximem vyzařování na vlnové délce přibližně 1 mm.



rotačního stavu odpovídá rozdíl vlnových délek 1,32 mm. Tyto naměřené excitace jsou způsobeny všudypřítomným zářením o teplotě přibližně 3 K.

Za objev reliktního záření získali Arno Penzias a Robert Wilson v roce 1978 Nobelovu cenu za fyziku.

COBE (1989)

A. Penzias a R. Wilson měřili na jediné vlnové délce. Mnohem podrobnější měření byla provedena po vypuštění družice COBE (COsmic Background Explorer) v roce 1989. Družice provedla detailní průzkum reliktního záření. V průběhu prvních osmi minut provozu zjistila, že reliktní záření je zářením absolutně černého tělesa o teplotě 2,73 K s přesností 10⁻³. V roce 1992 byla družicí objevena anizotropie reliktního záření. Záření je nepatrně teplejší v jednom směru a nepatrně chladnější v opačném směru (2,7251 K a 2,7249 K). Tomu odpovídá naše rychlost pohybu vzhledem k záření 390 km/s. Odečteme-li známý pohyb Slunce kolem

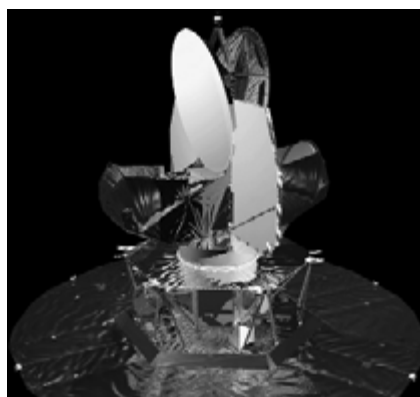
středu Galaxie, vychází pro vlastní pohyb naší Galaxie rychlost 600 km/s. Jinak je záření vysoce izotropní. Záření sledované družicí COBE není zcela homogenní. Na mapě intenzity reliktního záření pořízené družicí COBE označují červené oblasti teplejší fluktuační a modré a černé oblasti chladnější fluktuační než je průměr. Odchyly těchto fluktuačních od průměrné hodnoty jsou asi 1/100 000. Pravděpodobně jde o primordiální fluktuační z období oddělení záření od hmoty, které vedly později ke vzniku galaxií. Družice COBE tak přispěla k lepšímu poznání mikrovlnného reliktního záření hlavně dvěma objevy: objevem anizotropie záření a objevem fluktuační teploty záření. Rozlišovací schopnost družice COBE byla pouhých 7°.

Samotná družice COBE byla chlazená kapalným héliem a na palubě měla tři základní přístroje: FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer) – spektrofotometr v daleké IR oblasti, DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment) – přístroj ke sledování difúzního IR pozadí a DMR (Differential Microwave Radiometer) – diferenční mikrovlnný radiometr.

Polární experimenty (1998)

Těsně před koncem tisíciletí se objevila řada experimentů prováděných v Antarktidě, která výrazně zpřesnila naše znalosti o reliktním záření. Povšimněme si tři nejznámějších:

BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics). Jde o radioteleskop vynesení stratosférickým balónem (LDB – Long Duration Balloon) do výšky 37 km nad Antarktidu. Přesná poloha radioteleskopu byla sledována pomocí



Sonda MAP (Microwave Anisotropy Probe). Následovník slavné družice COBE, který startoval v roce 2001.

družic. Let trval 10,5 dne (od 29. 12. 1998 do 9. 1. 1999) a byl ukončen přistáním radioteleskopu do sněhu na padáku. Celé zařízení bylo poté ukotveno na helikoptéru a odvezeno. Primární zrcadlo mělo průměr 1,2 m s detektory chlazenými na teplotu 0,28 K. Přístroj byl schopen detekovat mikrovlnné záření na čtyřech vlnových délkách: 0,75 mm, 1,25 mm, 2 mm a 3 mm a jeho rozlišovací schopnost byla 10', což je podstatně lepší než u družice COBE (7'). Celková vynášená hmotnost byla 1400 kg. Měření zpřesnily teplotu reliktního záření a sledovala fluktuace s teplotním rozlišením 70 μ K. Pořízená mapa reliktního záření je třicetpětkrát podrobnější než obdobná mapa z družice COBE (s tímto mimořádným rozlišením je ale k dispozici jen mapa 2,5 % celé oblohy). Obraz fluktuací reliktního záření je konzistentní s představou zvukových vln šířících se raným vesmírem, které mohly být odpovědné za jejich vznik. Fluktuace se staly zárodkem budoucích galaxií a kup galaxií. V plochem vesmíru by rozměr jednotlivých teplejších a chladnějších skvrn měl být okolo 1°. V uzavřeném vesmíru by struktury byly jeho geometrií zvětšené, v otevřeném naopak zmenšené. Výsledky experimentu podpoři-

ly přibližnou plochost našeho vesmíru, která je pravděpodobně důsledkem inflační fáze (období prudkého exponenciálního rozpínání) v minulosti.

MAXIMA (Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array). Jde o další balónový experiment, který zjišťoval úhlové spektrum fluktuací reliktního záření. MAXIMA jako detektor využívá šestnáctipixlové pole bolometrů chlazených na teplotu 100 mK a je schopná detekovat fluktuace v rozmezí 10' až 4°. Maximum fluktuací bylo opět pozorováno pro 1°, což odpovídá plochému Vesmíru. Lety byly provedeny v roce 1995 (MAXIMA-0), 1998 (MAXIMA-1) a 1999 (MAXIMA-2). První let byl ve skutečnosti testovacím letem s předchůdcem detektoru MAXIMA, který se nazýval MAX. Vědecky cenná data byla pořízena až při letech pozdějších. Ve všech případech šlo o noční krátkodobé lety.

DASI (Degree Angular Scale Interferometer). Jde o interferometr umístěný na Amundsenově-Scottově základně na jižním pólu. Primární anténa má rozměr 20 cm, rozsah vlnových délek 8,3 mm až 11,5 mm. Anténa může sledovat fluktuace velikosti 25' až 2,6°. Na základnu byl inter-

ferometr umístěn v létě 1999/2000 (na jižní polokouli).

MAP (2001)

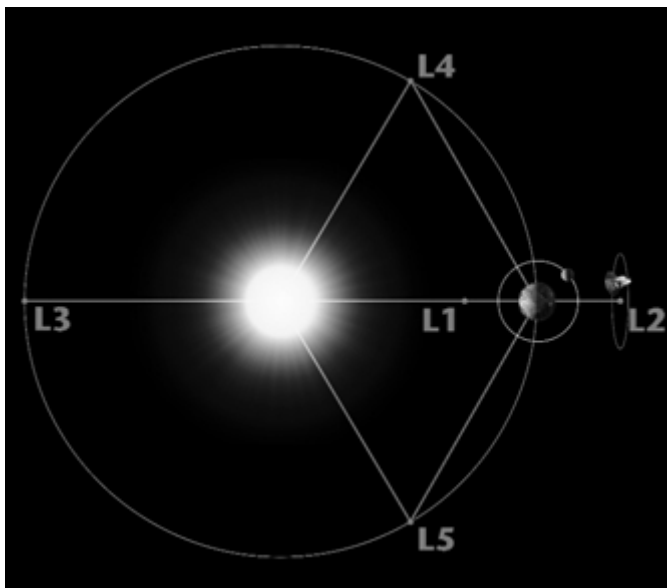
MAP (Microwave Anisotropy Probe) je nová sonda, která startovala 30. 6. 2001. Sonda je určena ke sledování anizotropie reliktního záření. Po vyhodnocení výsledků pozorování by měla odpovědět přímo na otázky spojené se vznikem vesmíru a s jeho topologií a stát se následovníkem slavné družice COBE. Sonda byla umístěna v blízkosti Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce, který je vzdálen 1,5 milionů kilometrů od Země. Na své stanoviště dorazila v září 2001. Plánovaná délka celé mise je 27 měsíců, z toho 3 měsíce na let a 24 měsíců na samotné pozorování.

Hlavním cílem mise je pořídit mapu fluktuací reliktního záření s mnohem vyšší citlivostí a rozlišením než měla družice COBE. Předpokládá se úhlové rozlišení kolem 0,3° a citlivost 20 μ K. Nejlepší rozlišení bude menší než 0,25°. Sonda bude pozorovat v pěti oddělených frekvenčních pásmech od 22 GHz do 90 GHz (3 mm až 1,4 cm). Primární zrcadlo má rozměry 1,4 \times 1,6 m, elektrický výkon sondy je 400 W a konečná hmotnost 830 kg.

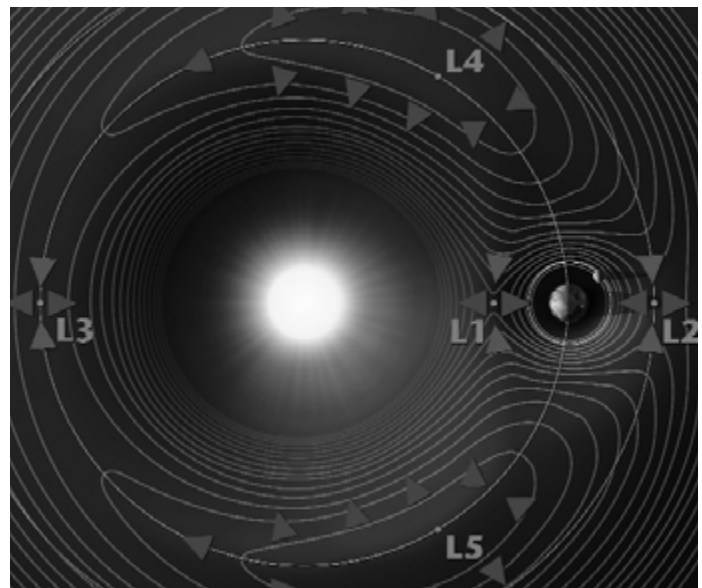


↑ BOOMERANG. LDB balón (nalevo), který vynesl radioteleskop (napravo). V pozadí hora Mt. Erebus.

← BOOMERANG. Na pozadí předchozího snímku je na oblohu vkopírován obraz fluktuací reliktního záření ve skutečné úhlové velikosti. Kdybychom měli film citlivý na mikrovlnné záření (s vysokou rozlišovací schopností), mohli bychom pořídit podobný snímek.



Umístění sondy MAP v Lagrangeově bodě L2



Lagrangeovy body. Pět bodů u podvojného systému, ve kterých je síla působící na testovací těleso nulová. Gravitační síly se vzájemně vyruší. Body jsou pojmenovány podle francouzského matematika Josepha-Louise Lagrange.

Co lze očekávat od nové sondy? Teoretici vkládají do následovníka slavné družice COBE velké naděje. A tak všichni doufejme, že se při detailním studiu reliktního záření vbrzku podaří odpovědět alespoň na některé z následujících otázek: Kdy se formovaly první vesmírné struktury? Jaká je povaha primordiálních zárodků galaxií a kup? Co a kdy ionizovalo plyn v ranném vesmíru? Jaká je topologie vesmíru? Bude vesmír nadále expandovat? Jaká je hustota hmoty ve vesmíru? Jaký je podíl a podstata skryté hmoty a energie?

Další informace

<http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/> – COBE

<http://www.physics.ucsb.edu/~boomerang/> – BOOMERANG

<http://astro.uchicago.edu/dasi/> – DASI

<http://cosmology.berkeley.edu/group/cmb/> – MAXIMA

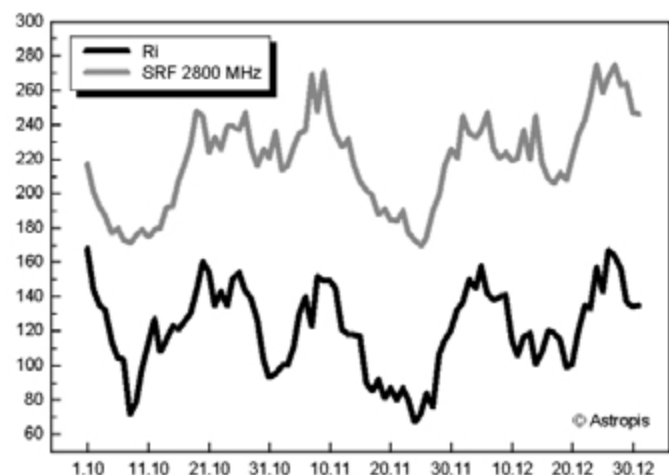
<http://map.gsfc.nasa.gov/> – MAP

<http://www.aldebaran.cz/> – sekce ASTRO/Kosmologie, sekce SONDY

Sluneční aktivita v IV. čtvrtletí 2001

Po výrazném vzrůstu v září 2001 sice sluneční aktivita ve IV. čtvrtletí poněkud poklesla, avšak zůstala nad svým loňským celoročním průměrem. Její průběh je dobře patrný z připojeného grafu předběžných relativních čísel SIDC, Brusel (R_i) a slunečního radiového toku (SFR 2800 MHz) a z tabulky průměrných hodnot těchto hlavních indexů sluneční činnosti. Vzhledem k ukončenému roku je tato tabulka doplněna i průměrnými hodnotami těchto indexů v letech 2000 a 2001. Zatímco se v ročním průměru relativní čísla v porovnání s předcházejícím rokem již výrazněji snížila, hodnota radiového toku nepatrně vzrostla. Průběh jedenáctiletých cyklů sluneční činnosti není však oficiálně vyjadřován průměrnými hodnotami relativních čísel v jednotlivých měsících, jak byly získány pozorováním sluneční fotosféry, ale jejich vyrovnanými hodnotami (tj. 13 měsíční průměry pozorovaných hodnot, v nichž jsou první a poslední měsíc vzaty s poloviční vahou). Zhodnocení dosavadní části 23. slunečního cyklu je zřejmé z následujících údajů vyrovnaných relativních čísel: minimum – 8,0, maximum – 120,8; délka vzestupné části – 3,9 roku. I ve 23. cyklu bylo pozorovatelné tzv. sekundární maximum asi dva roky po hlavním, jak tomu je u většiny dosud pozorovaných cyklů.

■ Ladislav Schmied



Průměrné hodnoty R_i a SRF 2800 MHz

Index	říjen	listopad	prosinec	IV. čtvrtletí 2001
R_i	125,6	106,5	131,8	121,3
SRF 2800 MHz	208,2	212,7	236,6	219,2
Index	rok 2000		rok 2001	
R_i	119,4		111,0	
SRF 2800 MHz	179,2		181,5	