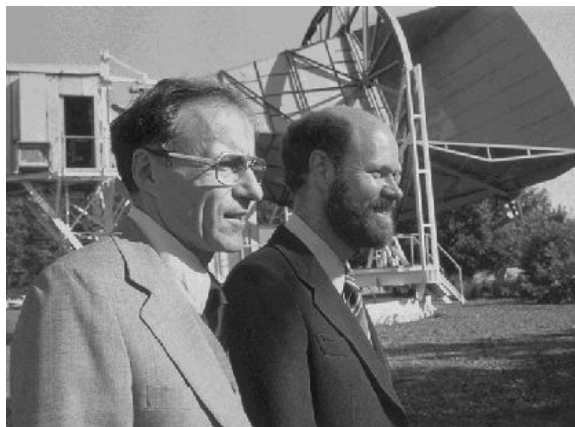


Radomír Šmída: Reliktní záření

Kosmologie vysvětluje vznik a následný vývoj vesmíru pomocí teorie velkého třesku. Vesmír měl být původně vyplněn velmi žhavou ionizovanou hmotou - plazmou, která díky rozpínání prostoru chladla, až se stala průhlednou pro elektromagnetické záření. Jednotlivé fotony od této chvíle putují nerušeně vesmírem a jako pozůstatky (relikty) rané epochy vesmírného vývoje přinášejí jedinečné informace z doby, kdy ještě neexistovaly hvězdy ani galaxie. Právě jejich zkoumání vedlo k obrovskému zpřesnění hodnot základních kosmologických veličin během posledních let. Podívejme se například na stáří vesmíru: z loňských výsledků sondy WMAP plyne, že vesmír existuje 13,7 miliard let plus minus pouhých 200 miliónů let. Tak přesné tvrzení si nemůžeme dovolit vyřknout ani o věku jedné starší dámy, která pobývá v nedalekém brněnském muzeu. Vždyť Věstonické Venuši se daří ukrývat svůj věk mnohem úspěšněji a dnes jej známe stále s téměř desetiprocentní chybou, kdežto vesmír schoval své stáří před lačnými pohledy kosmologů již jen za nepřesnost šetkrát menší! Obdržené výsledky jsou navíc kompletně kontrolovány nezávislými měřeními a k velké radosti vědců spolu velice dobře souhlasí. Proberme si tedy jednotlivé úspěchy a očekávaný vývoj v této oblasti kosmologického výzkumu.

Záhadný mikrovlnný šum

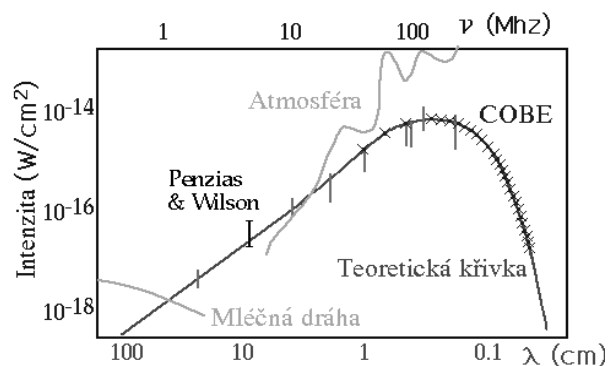
Na úvod udělejme krátkou sondu do minulosti, která se odehrála před čtyřiceti lety. V roce 1964 měřili dva radioastronomové Arno Allan Penzias a Robert Woodrow Wilson intenzitu rádiových vln vyzařovaných z naší Galaxie anténou umístěnou na Crawford Hillu ve státě New Jersey. Toto měření není jednoduché, neboť detekovaný signál se dá velice těžko odlišit od neodstranitelného elektrického šumu vznikajícího uvnitř antény. Jimi pozorovaná hladina šumu zůstávala překvapivě vysoká a nepodařilo se ji snížit ani po mnohých snahách o odstranění nejrůznějších možných původců. Pečlivým proměřením záhadného šumu se ukázalo, že přichází se stálou intenzitou ze všech směrů nezávisle na denní a roční době. Stálost intezity signálu nepřipouštěla za zdroj zemskou atmosféru (signál by klesal směrem k zenitu) ani astronomické objekty. Jediné co Penzias a Wilson byli schopni o záření říci, byl jeho původ někde v oblasti vesmíru mnohem větší než naše Galaxie a teplota odpovídající 3,5 K na vlnové délce 73,5 milimetrů.



Obrázek (1): Arno A. Penzias a Robert W. Wilson stojící před anténou v Bellových laboratořích na Crawford Hillu ve státě New Jersey. Tato šestimetrová anténa ve tvaru trychtýře původně sloužila pro komunikaci s umělou družicí Echo, ale díky nízké hodnotě šumu se výborně hodila pro radioastronomii jako bylo pozorování rádiových vln vyzařovaných naší Galaxií.

Původ záhadného záření vyřešil mladý teoretik Philip James Edwin Peebles a jeho kolegové v Princetonu, kteří ztotožnili naměřené záření s kosmickým rádiovým šumem předpovězeným teorií velkého třesku. Peebles si uvědomil, že kdyby neexistovalo intenzivní záření v několika prvních minutách existence vesmíru, jaderné reakce by při primordiální nukleosyntéze pospojovaly značnou část protonů a neutronů do jader těžších prvků. To by neodpovídalo dnešním pozorováním, podle kterých představuje podíl vodíkových jader (nejjednodušší atomové jádro tvořené pouze protonem) tři čtvrtiny všech atomů ve vesmíru. Syntéze těžších jader mohlo být zabráněno jen za situace, kdyby byl vesmír vyplněn krátkovlnným zářením o velmi vysoké teplotě, které by rozbíjelo vzniklá jádra. Teplota záření postupně klesala během rozpínání vesmíru až k dnešní pozorované hodnotě pár stupňů nad absolutní nulou a záření se dostalo se z oblasti krátkovlnného záření gama do mikrovlnné části spektra.

Objev mikrovlnného pozadového záření, které dnes nazýváme reliktní záření, potvrdil správnost teorie velkého třesku a jeho objevitelé byli po zásluze oceněni Nobelovou cenou za rok 1978.



Obrázek (2): Na obrázku vidíme teoretické tepelné spektrum reliktního záření, tedy závislost vyzařované intenzity tělesa (v tomto případě celého vesmíru) v závislosti na vlnové délce (dole) nebo frekvenci (nahore). Samotné záření naší Galaxie a atmosférický šum jsou vykresleny světlejšími čarami. Penzias s Wilsonem měřili reliktní záření v mikrovlnné oblasti na vlnové délce 73,5 milimetrů. Z obrázku je patrné, že proměření křivky pro vlnové délky kratší než 1 cm bylo možné jen mimo zemskou atmosféru. Přitom tato část spektra je nejdůležitější pro rozhodnutí, zda-li se jedná o záření absolutně černého tělesa, neboť zde musí dojít k poklesu intenzity s rostoucí vlnovou délkou. Měření s požadovanou přesností poskytla až družice COBE (jsou vyznačena křížky).

Vznik reliktního záření

Zčervanání světla vzdálených galaxií objevené na začátku třicátých letech Edwinem Powellem Hubblem nám říká, že se vesmír rozpíná, takže jeho obsah musel být kdysi mnohem více stlačený a tím pádem horký. Jak vyplývá z teorie velkého třesku, byla látka několik minut po vzniku vesmíru ještě tak horká a hustá, že nemohly existovat galaxie a hvězdy, dokonce i atomy byly ionizované - roštělené na jádra a volné elektrony. Látka byla ve stavu plazmy, částice se srážely a vzájemně si předávaly energii. I když se vesmír velice rychle rozpínal, pro jednotlivé fotony, elektrony nebo atomová jádra trvalo rozpínání dlouhou dobu ve srovnání s časem uběhlým mezi srážkami, takže každá částice mohla být mnohokrát rozptýlena, absorbována nebo znovu emitována. Díky těmto četným interakcím se látka ve vesmíru dostala do termodynamické

rovnováhy, kterou lze charakterizovat teplotou, jež je stejná v celém systému. Reliktní záření pochází z plazmy, která byla ve stavu termodynamické rovnováhy a proto má konstantní teplotu nezávisle na směru odkud přichází.

Hmota vydržela ve formě plazmy až do doby 379 tisíc let po velkém třesku ($z = 1100$), kdy vesmír zchladl na 3000 K a volná atomová jádra - vzhledem k výsledku primordiální nukleogenezi převážně protony, začala zachycovat do té doby volné elektrony v míře větší, než s jakou byly odtrhovány zářením. Náhlé a z kosmologického hlediska okamžité zmizení volných elektronů znemožnilo kontakt záření s látkou a celý vesmír se stal průhledným pro záření. Tento proces se odborně nazývá rekombinace. Reliktní fotony od tohoto okamžiku nevznikaly ani nezanikaly, jen se prodlužovala jejich vlnová délka kosmologickým červeným posuvem a tím pádem se snížila teplota záření až na dnešních 2,73 K.

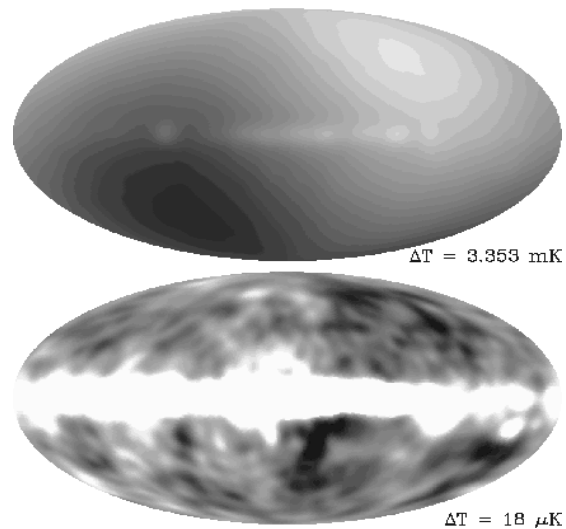
Osvobozené fotony si odnášejí známky z pouze několika posledních interakcí a vypovídají tak o podmínkách panujících přesně 379 tisíc let po vzniku vesmíru. Dřívější události ve vesmíru můžeme získat z jejich obrazu nepřímo modelováním podmínek vývoje vesmíru v dřívějším období a následným fitováním modelových předpovědí s naměřenými daty.

Definitivní potvrzení Koperníkovy hypotézy

První detailní průzkum reliktního záření provedla až družice COBE v devadesátých letech minulého století. Pochází-li mikrovlnné záření opravdu z raného vesmíru, pak závislost jeho intenzity na vlnové délce musí odpovídat dobře známému Planckovu zákonu, který popisuje tepelné záření absolutně černého tělesa. Sonda COBE v průběhu prvních osmi minut svého provozu potvrdila, že reliktní záření je opravdu zářením absolutně černého tělesa o teplotě 2,73 K s relativní přesností lepší než jedna tisícina a ukončila tak spekulace o jeho netepelném původu. Spektrum změřené sondou COBE je vůbec nejlepší spektrum absolutně černého tělesa jaké kdy bylo lidstvem napozorováno. Je nemyslitelné přijmout představu, že reliktní záření přichází z nějakého normálního zdroje, neboť ten by musel preferovat záření v konkrétních vlnových délkách a také vykazovat absorpci (např. hvězdné spektrum). Jediným možným vysvětlením pro tak přesné spektrum absolutně černého tělesa je záření přicházející z celého vesmíru z doby, kdy měl mnohem vyšší teplotu než dnes. Z výše uvedeného nevyhnutelně vyplývá, že vesmír musel projít etapou horkého velkého třesku.

V následujících letech prováděla sonda velmi přesné mapování celého mikrovlnného pozadí a odhalila malé rozdíly teploty v různých směrech. Tady se na chvíli zastavíme, aby jsme si ujasnili rozdíl mezi argumenty ve prospěch konstantní teploty (důkaz tepelného původu) a teplotním fluktuacím. Penzias s Wilsonem zjistili, že reliktní záření přichází ze všech směrů se stejnou intenzitou - je tedy izotropní a odpovídá tepelnému záření absolutně černého tělesa. Konkrétně nenalezli žádnou variaci intenzity reliktního záření (stejná teplota napříč celou oblohou) v rámci desetiprocentní chyby svého měření. V roce 1976 objevila skupina z Berkley pomocí měřícího zařízení na letadle U2, které je schopno létat ve výškách až 21 km, dipólovou anizotropii způsobenou Dopplerovým efektem odpovídající pohybu sluneční soustavy vůči klidové vztažné soustavě reliktního záření (v této souřadné soustavě má reliktní záření přesný tvar Planckovské křivky). Variace teploty o velikosti 3 mK odpovídá pohybu s rychlostí 370 km/s ve směru souhvězdí Lva. Později družice COBE dokonce zaznamela roční variaci spojenou s oběhem Země kolem Slunce, což můžeme pokládat za definitivní potvrzení Koperníkovy hypotézy. To jsou kinematické efekty, které nemají žádnou souvislost s chováním primordiální plazmy.

Po odečtení příspěvku pohybu Země k fluktuacím teploty nebyly experimenty před vypuštěním COBE pozorovány žádné odchylky od zákona záření absolutně černého tělesa. Avšak na základě detailnějšího studia vlastností mladého vesmíru, především otázka vzniku galaxií, byla teorií požadována drobná nehomogenita v hustotě věrné látky. Libovolně malá nehomogenita se nakonec musela promítnout do fluktuací teploty reliktního záření. Proč však trvalo tak dlouho, než byla fluktuace teploty reliktního záření objevena? Důvodem je její velikost, odchylky fluktuací od průměrné hodnoty jsou natolik malé, pouhá stotisícina teploty, že nemohly být dřívějšími přístroji detekovány. Teprve COBE poskytla dostatečně přesné výsledky měření, aby odhalila mikrokkelvinové flutuace.



Obrázek (3): Fluktuace teploty můžeme rozdělit podle jejich velikosti. Dipólová anizotropie způsobuje fluktuace teploty o velikosti 3 mK, což znamená, že záření je nepatrně teplejší v jednom směru a nepatrně chladnější v opačném. Tomu odpovídá pohyb s rychlostí 370 km/h vůči poli reliktního záření (horní obrázek). Fluktuace iniciované nehomogenitou látky v období rekombinace se objevují až na úrovni desítky mikrokkelvinů. Od obrázků ještě nebylo odečteno záření přicházející ze zdrojů nacházejících se v naší Galaxii (pás uprostřed).

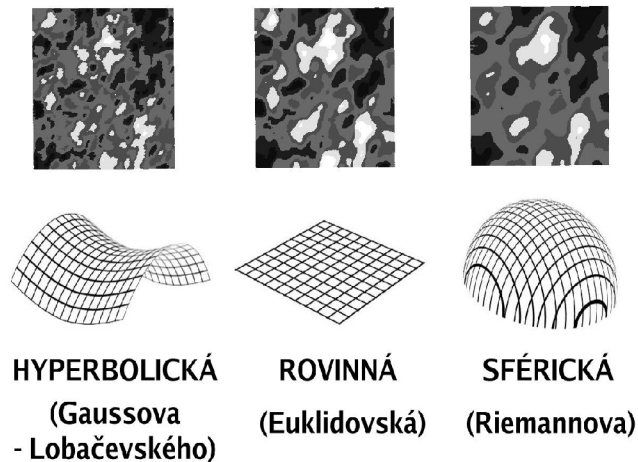
Zárodky dnešních galaxií

Ve výsledcích sondy COBE bylo podle očekávání poprvé možné na mapě reliktního záření vidět oblasti teplejších a chladnějších mikrokkelvinových fluktuací oproti průměrné teplotě. Teplotní fluktuace později potvrdily více než tři desítky dalších experimentů, ale největší pokrok přišel až se sondou WMAP. Ve srovnání s dřívějšími daty družice COBE zaznamenala WMAP detaily až 23 krát menší a průzkum fluktuací teploty se záhy stal nejpřesnějším zdrojem znalostí o vesmíru.

Existenci fluktuací si vysvětlujeme na základě oscilací baryonové látky (protony a neutrony) okolo struktur vytvořených již dříve od záření odpoutanou temnou hmotou, které se přenášely i do pole záření. Oscilace hmoty mají svůj počátek v období vyrovnání hustoty energie hmoty a záření (okolo $z = 3200$) a pokračovaly v následujícím období dominance hmoty nad zářením až do rekombinace. Od rekombinace prochází baryonová hmota pouze stadiem gravitačního smršťování v okolí zárodečných zhuštěnin, což nakonec povede k vytvoření dnešních galaxií.

Oscilace baryonové látky způsobovaly nerovnováhu v tlaku a hustotě plazmatu vyplňujícího raný vesmír. V místech, kde byla vyšší hustota, docházelo ke gravitačnímu smršťování, nicméně při dosažení jisté hustoty převládly odpudivé síly záření a vznikly oscilace ve formě vln šířících se plazmatem, vzhledem k podobnosti s šířením zvuku je nazýváme akustickými. Rychlost těchto akustických vln odpovídá zhruba rychlosti světla ve vakuu dělené druhou odmocninou ze tří. Největší místa zhuštění, horké skvrny, měly rozměry kolem 200 tisíc světelných let. Největší chladné skvrny měly rozměry zhruba poloviční, neboť akustická vlna musela těmito oblastmi projít dvakrát (zhuštění a následné zředění). Podobně v místech, kde došlo ke zhuštění podruhé, bylo zapotřebí trojího průchodu akustické vlny a tyto oblasti mají zhruba třetinovou velikost oproti největším horkým skvrn. Obrazem akustických vln je tedy celočíselný poměr velikostí skvrn reliktního záření.

GEOMETRIE VESMÍRU



Obrázek (4): Obraz teplotních fluktuací závisí na geometrii vesmíru. Poměr rozměru zvukového horizontu (známe z vlastností materiálů a rychlosti šíření vln v něm) a vzdáleností ураženou reliktním zářením (dáno rozdílem teplot nyní a v době vzniku) je ve vztahu k úhlovému rozměru horizontu (daný polohou maxim a minim prvního akustického vrcholu nebo velikostí skvrn v obrazu reliktního záření).

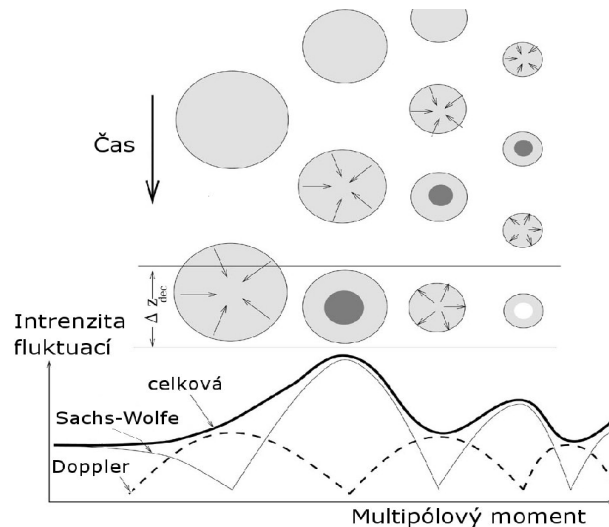
Pouhým pohledem na mapu intenzity teplotních fluktuací mnoho informací nezískáme, mnohem účelnější je provést rozklad do multipólového rozvoje. Tímto multipólovým rozvojem (jedná se o rozložení signálu z kulové plochy na jednotlivé frekvence, nebo-li multipólové momenty) získáme závislost intenzity fluktuací na úhlové škále - spektrum reliktního záření. První členy multipólového rozvoje mají jasnou interpretaci: monopól vyjadřuje průměrnou teplotu, dipólový člen bohužel nemůžeme určit (je překryt stonásobně větším Dopplerovým vzniklým pohybem sluneční soustavy vůči poli reliktního záření), dva následující póly jsou kvadrupól (dvě maxima a minima) a okupól (tři maxima a minima). Pro různé modely vesmíru dostáváme různé pozice a intenzity v jednotlivých frekvencích. Hned při prvním pohledu vidíme pravidelné rozestupy mezi vrcholy ve spektru, což je přímý důkaz správnosti teorie akustických oscilací.

Procesy odpovědné za tvar spektra

Akustické oscilace provází několik efektů, které vedou ke změnám teploty záření a my je dnes dokážeme ve spektru identifikovat. Nejvýznamější je Sachs-Wolfův efekt, který popisuje

energetickou ztrátu fotonů překonávajících gravitační potenciál v místě nahuštění. Jedná se o zčervenání fotonů opouštějících gravitační potenciál, jev předpovězený Einsteinovou teorií relativity a mnohokrát pozorovaný u astronomických objektů. Fotony opouštějící místa s větší hustotou hmoty byly sice energetičtější (kontrakce zahřívá hmotu), ale vzhledem k nutnosti překonat gravitační potenciál, ztrácely energii a jejich teplota klesala. Teoreticky předpovězená výsledná změna teploty záření oproti průměru je ve výborném souhlasu s pozorovanými fluktuacemi teploty reliktního záření.

Protože plazma osciluje, projeví se také známý Dopplerův efekt. Jeho příspěvek je minimální v maximech akustických vrcholů (hmota se nepohybuje) a maximální mezi nimi (hmota se smršťuje nebo rozpíná). Dopplerův efekt je tedy antikorelován se Sachs-Wolfovým a vede k uhlazení spektra.



Obrázek (5): S postupem času začínají oscilovat čím dál tím větší fluktuace hustoty a nechávají svůj otisk ve spektru. Tmavé skvrny odpovídají plazmě ve fázi největšího stlačení, světlé naopak zředění. Ve spektru pod různě velkými a různě rozfázovanými oscilacemi je patrné, že Dopplerův efekt je nejvýraznější u pohybující se látky v přechodu mezi fázemi komprese a zředění a zhlazuje fluktuace vybuzené Sachs-Wolfovým efektem.

Exponenciální pokles intenzity na malých úhlových škálách způsobuje difúze fotonů a poklesu říkáme Silkův útlum. Protože plazma není ideální tekutina a rekombinace nenastává okamžitě (elektronům trvá jistou dobu než se zachytí na atomových jádrech), rozmývají náhodně difundující fotony z míst o větší hustotě do míst zředění akustické oscilace o velikosti menší, než je jejich volná dráha (dráha, kterou foton urazí mezi dvěma následnými rozptyly na elektronech). Proto jsou akustické vrcholy menší než asi 5 úhlových minut silně potlačeny.

Výše vyjmenované efekty se na obrazu reliktního záření objeví hned při rekombinaci, fotony jsou však ovlivněny také během cesty od místa vzniku k pozorovateli, tzv. sekundárními efekty. Nejvýznamější úlohu zde hraje intergrovaný Sachs-Wolfovův efekt. Vyjadřuje ztrátu energie fotonů během průchodu skrz gravitační pole nějakého dostatečně hmotného a rozlehlého objektu. Tyto fluktuace navíc mohou nechat svůj otisk ve spektru v podobě gravitačních čoček a stejně jako pozorujeme vícenásobný obraz vzdáleného kvasaru okolo hmotné kupy galaxií, která ohnula dráhu světla za ní ležícího objektu pomocí svého silného gravitačního působení, objeví se vícenásobné obrazy i v mapě reliktního záření. Doposud nemáme kvůli dosavadním nedostatečně

jemným úhlovým rozlišením registrován žádný takový případ. Ostatní sekundární efekty se na škálách, které nejsou rozmyty difúzí, nijak výrazně neprojeví. Mezi nejznámější patří Rees-Sciamův efekt, neboli ztráta energie fotonu podél zorného paprsku v časově proměnlivém gravitačním potenciálu (typickým případem je pohyb kupy galaxií napříč zorným paprskem).

Všechny doposud zmíněné procesy měly za následek změnu teploty, ale tato změna nastala současně pro všechny fotony (zachovával se tvar spektra tepelného záření). Existuje však proces, který ovlivňuje i tvar tepelného spektra (nezmění se teplota všech fotonů). Pokud se reliktní fotony rozptýlí na volných elektronech horkého plynu, statisticky významný podíl očekáváme zatím jen na plynu v okolí kup galaxií, přesunou se tyto fotony do vyšších energií a vytvoří typický obraz, jenž se dá získat pozorováním ve více frekvencích. Tomuto jevu říkáme Sunajev-Zeldovičův a je v poslední době intenzivně studován, protože jej lze úspěšně použít pro měření vzdáleností ve vesmíru – pokud stejnou kupu galaxií napozorujeme i v rentgenové oblasti.

Ve vesmíru nastalo za celou dobu vývoje od chvíle rekombinace pouze jediné období ovlivňující tvar spektra reliktního záření. Během času překotné tvorby vůbec prvních hvězd bylo přerušeno temné období vesmíru a my bychom mohli, kdybychom v té době existovali, pozorovat svit značného množství prvních hvězd. Vyzářené světlo znovu ionizovalo okolní plyn a nastalo období reionizace. Horké oblasti ionizovaného plynu vyhlazovaly rozdíly v teplotě reliktního záření, ale protože v té době už poklesla hustota látky vlivem rozpínání, dočkala se rozptýlení pouze malá část reliktních fotonů. Ze zpracování spektra reliktního záření vyplynulo, že první hvězdy vznikaly překvapivě brzy - zhruba 200 miliónů let po velkém třesku, mnohem dříve než jsme usuzovali na základě dosavadních pozorování pozemských observatoří a Hubblova teleskopu.

Akustické vrcholy

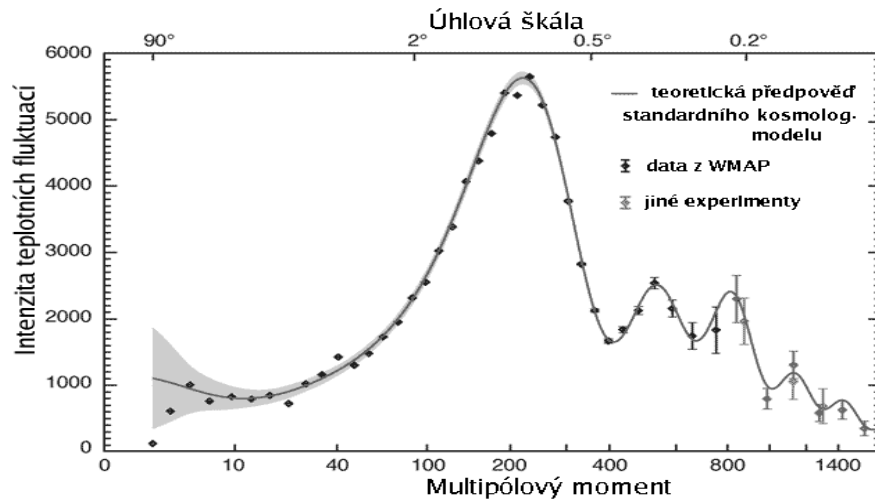
Podívejme se podrobně na jednotlivé vrcholy multipólového rozvoje teplotních fluktuací. Pozice prvního vrcholu, nazýváme jej Dopplerův, je velmi citlivá na geometrii vesmíru a z naměřené hodnoty vyplývá, že je euklidovská – prostor je plochý. Jedná se o triumf teorie inflačního rozpínání, protože ta rovinnou geometrii vesmíru i v jeho pozdějším věku přímo předpovídá. Další alternativní kosmologické teorie jsou těmito měřeními vyloučeny a teorie inflace se plnoprávně zařadila do standárního popisu vývoje vesmíru. Tvar Dopplerova vrcholu je určován hustotou hmoty a baryonů.

Existence druhého vrcholu je nezvratným důkazem akustických oscilací v plazmě. Harmonická pozice prvního a druhého vrcholu nevyhnutelně ukazuje na jejich vznik pomocí akustických vln, iniciovaných fluktuacemi gravitačního potenciálu, které mají svůj původ v inflační fázi raného vesmíru. Protože liché akustické vrcholy jsou spojeny s velikostí komprese plazmy, roste jejich výška s hustotou baryonů, naopak sudé vrcholy naopak souvisejí se zředěním plazmy. Z poměru výšek sudých a lichých vrcholů lze odvodit množství baryonové látky, čím vyšší bude podíl baryonů v plazmě, tím více bude druhý vrchol potlačen oproti prvnímu a třetímu.

Na sérii následujících akustických vrcholů uplatňuje svůj vliv poměr hustoty energie temné hmoty a energie záření. Jedná se o efekt rozdílných oscilací ve vesmíru dominovaném zářením a ve vesmíru dominovaném hmotou. Temnou energii (kosmologická konstanta) zde nemusíme vůbec uvažovat, protože se na oscilacích neuplatňuje. energii záření vypočteme ze současné teploty mikrovlnného záření a hustoty fotonů na jednotku prostoru, čímž se nám otevře cesta ke

stanovení hustoty hmoty. Přestože tento efekt ovlivňuje výšku všech vrcholů, je jeho přímý vliv separovatelný od efektů způsobených baryonovou hmotou u třetího vrcholu. Pokud bude třetí vrchol zesílený tak, že jeho amplituda bude srovnatelná nebo dokonce vyšší než amplituda druhého vrcholu, bude to známka dominance temné hmoty nad baryonovou.

Velikost útlumu akustických vrcholů u vyšších členů multipólového rozvoje představuje výborný ověřovací test, protože všechny veličiny, na kterých koncový exponenciální útlum závisí, měříme z umístění a velikostí samotných vrcholů (geometrie prostoru, baryonová hustota a hustota temné hmoty).



Obrázek (6): Akustické oscilace plazmy vytvářejí fluktuace teploty reliktního záření, které vytvářejí charakteristické vrcholy v multipólovém rozvoji. Čára proložená daty ze sondy WMAP a některých dalších experimentů odpovídá standardnímu modelu vesmíru. První a nejvýraznější vrchol se nazývá Dopplerův, pak následují další akustické vrcholy v pravidelném rozestupech. Od čtvrtého vrcholu se projevuje Silkův útlum. Je patrné, že fit teoretického modelu nesouhlasí s pozorováním pouze u prvních členů multipólového rozvoje. Vysvětlením může být nezvyklá topologie – geometrická struktura vesmíru (např. teorie Poincarého dvanáctistěny) nebo jen nesprávné odstranění signálů přicházejících z galaktických případně extragalaktických zdrojů - jejich příspěvek může významnou měrou ovlivnit přesnost zpracování, protože jej musíme odstranit z pozorovaných dat.

Informace získané rozбором akustických vrcholů můžeme shrnout následovně: pozice prvního vrcholu odpovídá plochému prostoru, množství baryonové hmoty odvozené z druhého vrcholu souhlasí s hodnotou předpovězenou teorií primordiální nukleosyntézy, třetí vrchol určuje podíl temné hmoty a koncovým útlumem ověříme správnost získaných hodnot. Množství temné energie je rovno rozdílu součtu hustoty baryonové a temné hmoty od celkové hustoty pro danou geometrii vesmíru. Hodnota hustoty temné energie vypočtená z rozboru akustických vrcholů výborně souhlasí s výsledkem pozorování zrychlování rozpínání vesmíru u vzdálených supernov (viz letošní výsledky Hubblova kosmického teleskopu) a existenci temné energie tak můžeme prohlásit za prokázanou. I přes tyto úspěchy stále postrádáme jakýkoliv přímý důkaz dvou skrytých komponent (i když temná hmota a temná energie tvoří dohromady více než 95 procent vesmíru!) a můžeme jen doufat, že se nějakých dočkáme v experimentech částicové fyziky alespoň v případě temné hmoty.

Uvažovali jsme zatím jen skalární fluktuace teploty a další dva příspěvky jsme ponechávali bez pozornosti. První z nich, vektorové komponenty, se rozpadají během expanze a nepředpokládá se, že by nechaly otisky ve spektru. Očekává se však, že stejným procesem, kterým byly vytvořeny skalární fluktuace, vzniklo také pozadí gravitčních vln. Tento slabý tenzorový příspěvek se objeví u malých multipólů před prvním akustickým vrcholem, poněvadž gravitační vlny se rozpadly v okamžiku, kdy jejich vlnová délka byla menší než velikost horizontu, který zhruba odpovídá pozici prvnímu vrcholu. Při dnešní přesnosti měření je tento příspěvek ignorován, ale výrazněji se může projevit v polarizované části emise, na kterou se nyní zaměříme.

Pozornost se soustřeďuje na polarizaci

Polarizace narozdíl od statického obrazu teplotních fluktuací poskytuje informaci o pohybech plazmy a poskytla by nám více informací než samotné teplotní pole. Měřením polarizačního spektra můžeme mimo jiné výrazně zvýšit přesnost fyzikálních parametrů spojených s akustickými oscilacemi, poskytnout větší statistiku na parametry reionizace, detekovat gravitační vlny, zkoumat modely inflačního rozpínání a stanovit kvantové fluktuace skalárního pole inflatonu odpovědného za inflaci. Není divu, že detekování polarizace se stalo primární snahou současných experimentů, kterou započal vůbec první záznam polarizace v roce 2002 interferometrem DASI umístěným na Amundsen-Scottově stanici v blízkosti jižního pólu.

K tomu, aby se záření lineárně zpolarizovalo, musí být splněny dvě podmínky. Zaprvé se musí fotony rozptýlit Thomsonovým rozptylem na volných elektronech a zadruhé musí mít úhlové rozdělení teploty rozptylujících se fotonů kvadrupólový moment. Kvadrupólový moment vytváří rychlostní gradient v toku plazmy přes volnou dráhu fotonu. Jak se ukazuje, nejpříhodnější podmínky pro polarizaci nastávají v období rekombinace, kdy ubývá množství volných elektronů, volná dráha fotonů roste a lokální kvadrupólové momenty narůstají. Reliktní záření se tak zpolarizovalo během několika posledních rozptylů fotonů na elektronech.

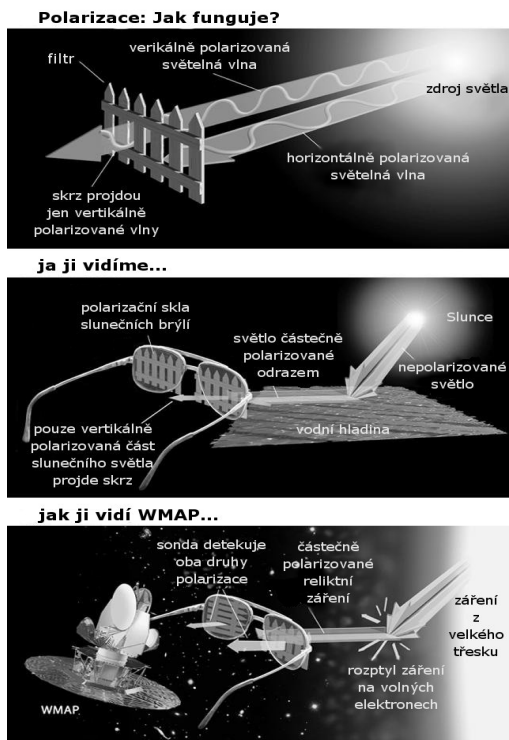
Tvary a výšky vrcholů ve spektru polarizace jsou přesně předpověditelné z vrcholů teplotního spektra za podmínek standardní inflace. Každé jiné vysvětlení vrcholů, které nezahrnuje akustické korelace, porušuje tuto relaci. Dále můžeme přímo hledat korelace větší než byl horizont události (ohraničuje prostor za kterým už vzhledem ke konečné rychlosti světla nedocházelo k přenosům signálu) a testovat tak inflační scénář (oblasti ležící během rekombinace mimo své horizonty události ležely v předinflačním období v rámci svých horizontů a docházelo mezi nimi k výměnám informací - vyrovnávala se teplota a hustota).

Během zpracování se vektorové pole polarizace rozkládá na dvě komponenty, elektrickou E a magnetickou B . Tato dekompozice je užitečná také proto, že obě komponenty vznikají rozdílnými procesy. Mód E vzniká ze stejných fluktuací hustoty (skalární fluktuace), které současně způsobují teplotní anizotropii. Mnohem slabší mód B je podle inflačních modelů generován reliktním gravitačním zářením (tenzorové fluktuace) ve velmi raném vesmíru. Navíc se polarizace v módu E mohla převést do módu B pomocí gravitačního čočkování a tento signál by byl mnohem výraznější než původní signál generovaný inflací.

Po rekombinaci původně malé kvadrupólové momenty rostou díky volnému proudění fotonů na kosmické vzdálenosti. Jestliže pak vesmír projde reionizací, nový rozptyl fotonů zpolarizuje záření. Tento proces dominuje na úhlových škálách blízkých horizontu události daného období

(je pochopitelně větší než v období rekombinace) a vytvoří se hrbol ve spektru polarizace na velkých úhlových škálách. Jeho výška silně závisí na celkové optické tloušťce v době reionizace a polarizační spektrum pro malé monopóly tak bude citlivou sondou procesu reionizace.

Pozorování polarizace představuje velkou výzvu pro kosmology, ale na podrobnější výsledky budeme muset ještě nějakou dobu počkat. Zatímco velikost teplotní fluktuační se pohybuje v řádu stotisícin, nejvyšší amplituda signálu polarizace je desetkrát a u módu B dokonce stokrát menší. Sonda WMAP není schopna detailně mapovat tak slabé signály, i když už naměřila známky slabých změn polarizace, proto nezbývá než vyčkávat na data z vylepšených interferometrů nebo až na plánovanou sondu Planck (vypuštění stanoveno na rok 2007).



Obrázek (7): Světlo šířící se v prostoru či v materiálu je příčné elektromagnetické vlnění (vektory intenzity elektrického a magnetického pole kmitají kolmo na směr šíření). Obyčejné světelné zdroje, jako jsou Slunce a žárovka, vyzařují světlo, které obsahuje zcela nahodilé orientace oscilujících vektorů, jedná se o nepolarizované světlo. Světlo lze polarizovat pomocí odrazu, např. světlo odražené na klidné hladině vody se stane částečně horizontálně polarizovaným. Vertikální polarizátory v polarizačních slunečních brýlích nepropouští toto horizontálně polarizované světlo a výsledkem je redukce toku světla (odstraní se odlesky). Podobným způsobem funguje sonda WMAP detekující reliktní záření zpolarizované rozptylem na elektronech, ale s tím rozdílem, že měří toky pro více směrů polarizace.

Pohled do budoucnosti

První předpověď reliktního záření přišla na svět v druhé polovině čtyřicátých let, ale nikdo ji po téměř dvě desetiletí nepřisuzoval význam, byla dokonce tak nedoceňována, až na ni zapoměli samotní autoři: George Gamow a jeho kolegové Ralph A. Alpher a Robert Herman. Nakonec k jednomu z nejvýznamějších objevů dvacátého století došlo náhodou systematickým studováním

hladiny šumu při snaze změřit galaktické rádiové pozadí. Reliktní záření se záhy po svém objevu stalo nejsilnějším důkazem kosmologického modelu velkého třesku a jeho význam nepolevuje ani dnes, naopak s každým přesnějším měřením roste. Zvláště v situaci, kdy pozorování a dnes favorizovaný kosmologický model spolu již natolik souhlasí, že největší poprask by spustil nález libovolné nesrovnalosti. Dočkáme se nějakého třeba při studiu reliktního záření nebo jsme již našli finální model vesmíru?

Rámeček 1: Družicové experimenty:

Cosmic Background Explorer (COBE)

start: 18. 11. 1989

úhlové rozlišení: 7 stupňů

přesnost měření fluktuací: 10 mikrokelvinů

výsledky: 1989 teplota reliktního záření (2.726 K)

1992 objev anizotropie

1998 změřeno pozadové infračervené difúzní záření

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)

Sonda byla po zveřejnění prvních výsledků (11.2.2003) přejmenována na počest hlavního autora projektu a zároveň jednoho ze spolupracovníků P. J. E. Peeblese Davida T. Wilkinsona z MAP na WMAP.

start: 30. 6. 2001

úhlové rozlišení: 0,3 stupňů

přesnost měření fluktuací: 20 mikrokelvinů

výsledky: 2003 výrazné zpřesnění teplotních fluktuací, detekce polarizace, potvrzení standardního modelu vesmíru

Planck

start: únor 2007

úhlové rozlišení: 0,2 stupňů

přesnost měření fluktuací: 2 mikrokelviny

cíle mise: zmapování spektra teplotních fluktuací do vyšších multipólů a proměření polarizace, zpřesnění kosmologických parametrů, testování teorie inflačního rozpínání, zjištění topologie vesmíru, měření Sunajev-Zeldovičova jevu a gravitačního čočkování reliktního záření, stanovení kritérií na vlastnosti temné hmoty a energie

Rámeček 2: Standardní model vesmíru:

stáří: 13,7 miliard let

vznik prvních hvězd: 200 miliónů let po velkém třesku

rekombinace: 379 tisíc let po velkém třesku

složení vesmíru: 4% běžná látka (převážně baryony – protony a neutrony)

23% temná hmota (nebarionová hmota)

73% temná energie (kosmologický člen)

geometrie: euklidovská (rovinná)

Hubbleova konstanta: 71 km/s/Mpc

baryonová asymetrie (poměr počtu baryonů a fotonů): $6,1 \times 10^{-10}$

vesmír prošel fází inflačního rozpínání