

Přináší rok 2002 definitivní model vesmíru?

Michael Prouza

„Kosmolog nikdy nepochybuje, ale často se mýlí.“

L. D. Landau

Koncem března letošního roku proběhla ve Francii v městečku Les Arcs evropská astrofyzikální konference nazvaná „Kosmologický model“. Jednotné číslo v názvu zvolili organizátoři naprosto záměrně – dle jejich názoru již víme, jaké jsou globální parametry vesmíru, v němž žijeme. Už netápeme mezi různými modely vesmíru, už jen – teoretici v idylické shodě s experimentátory – vyladujeme hodnoty důležitých veličin, popisujících vesmír jako celek. Ale je tomu skutečně tak? A znamená to, že kosmologové už nebudou mít co na práci?

Kdo je vítěz?

Po dlouhém období plném krizí a rozporů, kdy se zdálo, že vesmír obsahuje objekty starší, než je on sám, kdy jsme marně sčítali hmotu viditelnou i neviditelnou, kdy jsme kroutili hlavou nad hodnotami Hubblových konstant vzájemně se lišícími až o dvojnásobek, nastává doslova zlatý věk kosmologie, některými nazývaný též „nová kosmologie“ či „období přesné kosmologie“. Skutečně, zhruba v průběhu posledních tří let se hodnoty fundamentálních kosmologických veličin usazují, jejich měřené chyby klesají pod dříve nepředstavitelných deset procent, a co víc, principiálně různé metody docházejí nejen ke kvalitativně, ale i ke kvantitativně stejným závěrům.

A jaký je tedy v současné době vítězí model?

- vychází z velmi úspěšné teorie horkého velkého třesku

- vesmír je *plochý*, obsahuje přesně *kritické* množství hmoty a energie, jeho *rozpínání se zrychluje*

- velmi krátce po velkém třesku (zhruba 10^{-32} s) nastalo období obrovské expanze, tzv. *inflace*, během které se díky kvantovým fluktuacím vytvořily počáteční nehomogenity vesmíru, nezbytné pro vznik všech struktur (hvězd, galaxií, ...)

- k pozorované kritické hustotě vesmíru přispívá ze dvou třetin „temná energie“ (pravděpodobně kosmologická konstanta, viz níže), z jedné třetiny temná hmota,



jasné hvězdy tvoří pouhé necelé jedno procento

- hmota je tvořena převážně nebaryonickou chladnou temnou hmotou ($29 \pm 4\%$ kritické hustoty), ($4 \pm 1\%$) pak tvoří baryony (tzn. převážně protony a neutrony – běžná hmota – svítící hvězdy, ale třeba i hnědí trpaslíci, řazení mezi hmotu temnou ap.), konečně jistý zlomek (asi 0,3%) zaujímají neutrina

- stáří vesmíru je (14 ± 1) miliard let

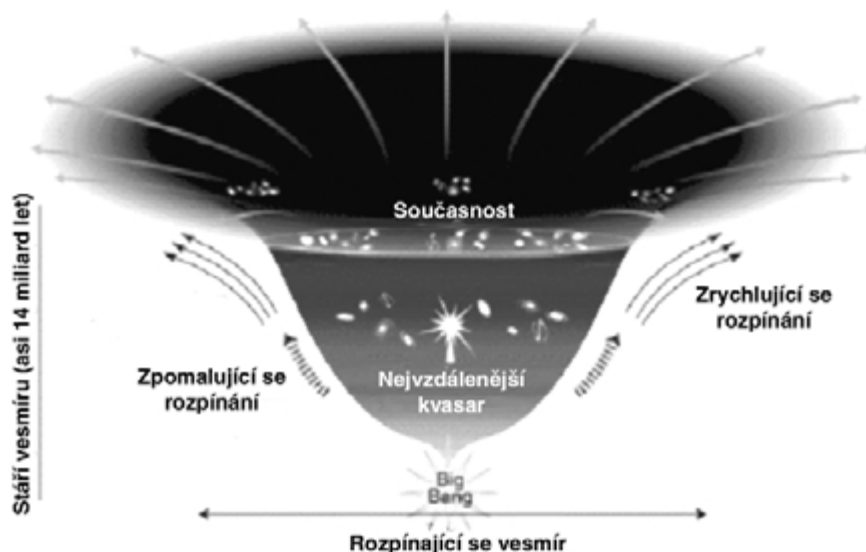
- Hubblova konstanta má hodnotu (72 ± 7) $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$

V dalších odstavcích se budeme podrobněji zabývat jednotlivými aspekty modelu a argumenty, svědčícími v jejich prospěch či neprospěch.

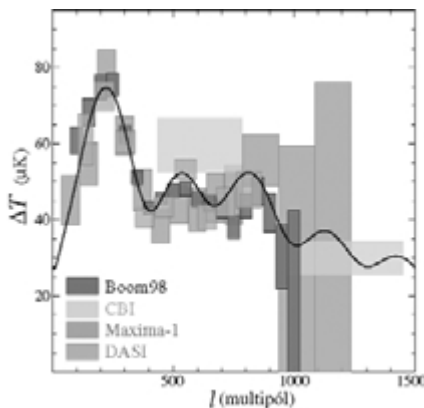
Hubblova konstanta a stáří vesmíru

Klíčový vliv na průlom v oblasti měření Hubblových konstant měla úspěšná realizace projektu HST – „Hubble Key Project“ pozoroval v 24 galaxiích přes 800 speciálních proměnných hvězd, cefeid, u kterých existuje vztah mezi periodou a absolutní svítivostí. Tak se podařilo přidat další neztrouchnivělou příčku ke kosmologickému žebříku vzdáleností.

Výše citovaný výsledek s chybou menší než 10 % je navíc ve výborné shodě s modelem vesmíru s nenulovou kosmologickou konstantou, pro parametry 30 % kritické hustoty hmoty a 70 % kritické hustoty kosmologická konstanta vychází stáří vesmíru $13,5 \pm 1,5$ miliard let. Kdybychom uvažovali kosmologickou konstantu nulovou, tak



V současné době favorizovaný model vesmíru s nenulovou kosmologickou konstantou má tu zajímavou vlastnost, že zpočátku se rozpínání vesmíru zpomalovalo díky vlivu gravitace, v současnosti však již vliv kosmologické konstanty převážil a rozpínání se zrychluje.

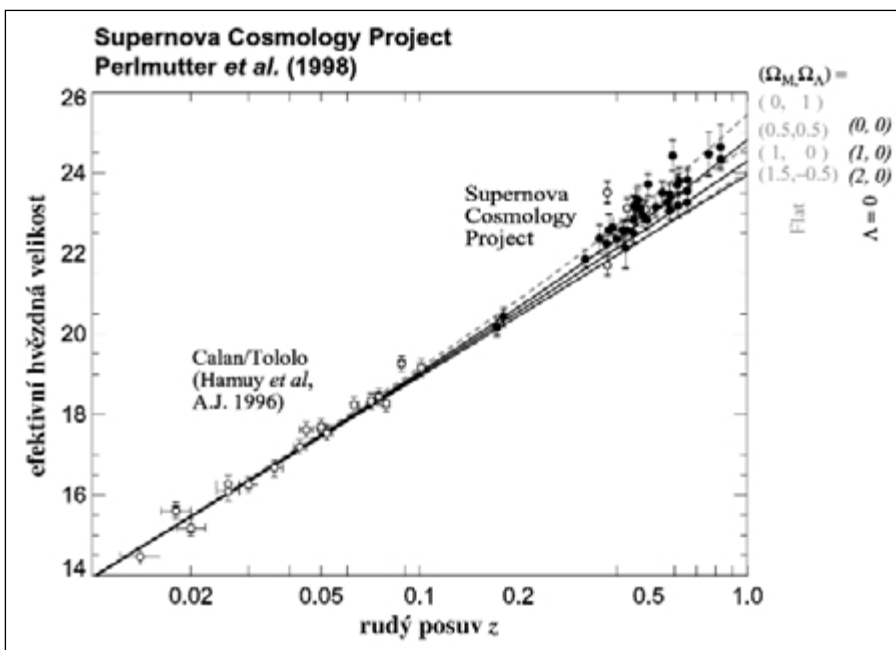


Multipólový rozvoj teplotních fluktuací spektra reliktního záření s chybovými obdélníčky jednotlivých experimentů

se dostáváme do problémů, neboť pro 30 % kritického množství hmoty pak vychází stáří vesmíru 11 miliard let a pro plochý vesmír, tvořený jen hmotou, pak dokonce pouhých devět miliard let.

Ale spočítané stáří kolem 14 miliard let je ve výborné shodě se stářím nejstarších pozorovaných objektů ve vesmíru, což jsou hvězdy velmi chudé na kovy v kulových hvězdokupách. Nejstarší známá hvězda tohoto typu má dle současných poznatků stáří kolem 13 miliard let.

Reliktní záření a jeho fluktuace



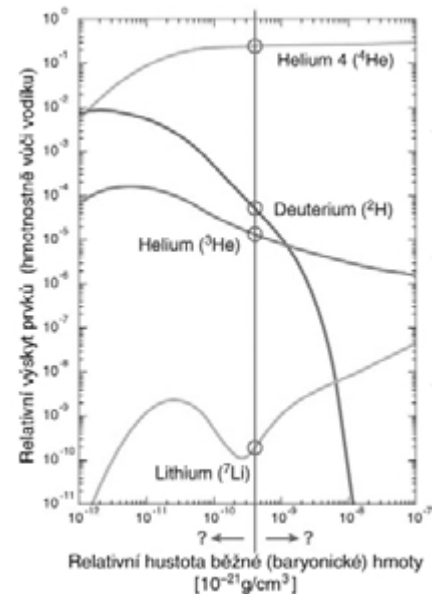
Jediným zcela přímým důkazem existence nenulové kosmologické konstanty je měření rudých posuvů vzdálených galaxií s pomocí supernov typu Ia. Ať již by byla Hubblova konstanta jakákoli, kdyby byla zároveň kosmologická konstanta nulová, musí být měřené závislosti (Hubblův zákon) přímkové. Jakékoli zakřivení má na svědomí kosmologický člen.

Možná nejvýznamnějším experimentálním pokrokem posledních let je úspěšné a podrobné zkoumání tepelných fluktuací reliktního záření. Protože o reliktním záření a o experimentech, zkoumajících jeho fluktuace vyšel rozsáhlý článek od Petra Kulhánka v minulém čísle Astropisu, budeme se zde zabývat jen kosmologickými aplikacemi těchto výsledků.

Nejprve družici COBE, a koncem devadesátých let pak podrobněji experimentům BOOMERanG, MAXIMA a DASI (viz obrázek vlevo), se podařilo změřit teplotní fluktuace mikrovlnného reliktního pozadového záření. Naše znalosti dále rozšíří sonda MAP, která od loňského roku již sbírá data na oběžné dráze Země, a do konce desetiletí konečně přinese další významné zpřesnění i sonda PLANCK.

Reliktní záření zachycuje věrný obraz vesmíru zhruba 300000 let po velkém třesku. Tehdy, jak klesala hustota a teplota vesmíru, přestalo záření interagovat s hmotou (tzv. „horizont posledního rozptylu“) a do nynějšího reliktního záření se „obtsikly“ prvotní hustotní fluktuace.

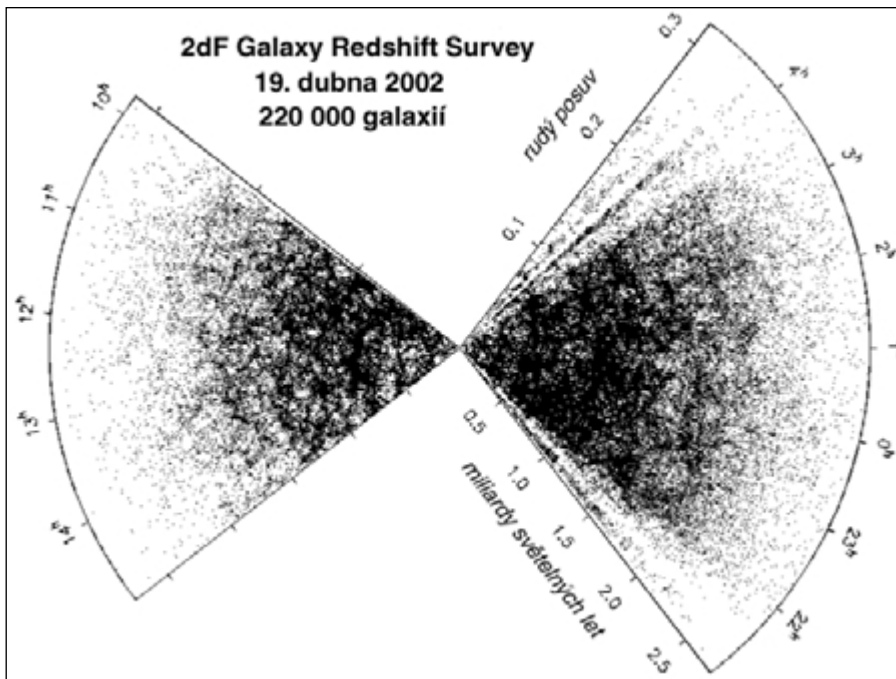
Tyto fluktuace se projevují malinko různou (stotisíciny stupně) teplotou záření přicházejícího z různých směrů. Na jejich vzniku se podílela řada různých jevů



Graf relativního výskytu prvků ve vesmíru; měřené hodnoty jsou naznačeny vlnou čarou, které odpovídají asi 4% kritické hustoty

(rozdíly v hustotě prvotní plazmy, tlakové vlny, rozdíly v gravitačním potenciálu, ...) a abychom je dokázali odlišit a analyzovat, musíme reliktní záření statisticky řádně potrápít. Přesný postup je matematicky dosti složitý, v zásadě studujeme střední hodnoty rozdílů teploty mezi dvěma body na obloze v závislosti na úhlu mezi těmito body. Na obrázku vlevo nahoře na této stránce pak máme výsledek tohoto postupu, tzv. multipólový rozvoj. Na vlnité ose je vynesena velikost fluktuací teploty a na vodorovné ose veličina l (multipól, čím větší l , tím menší zkoumaný úhel mezi dvěma body). Přesný tvar výsledné křivky je pak závislý prakticky na všech významných kosmologických parametrech, například poloha prvního vrcholku závisí na geometrii vesmíru, pro pozorovanou polohu l kolem 200 je vesmír plochý, tedy v souladu s diskutovaným modelem. Dále například podle tvaru křivky před prvním vrcholkem (peakem) a podle velikosti druhého a třetího peaku lze určit velikost kosmologické konstanty, nebo podle velikosti prvního a třetího peaku celkové množství elektronů a protonů ve vesmíru. Určování těchto parametrů je ale zatím nepřesné, a tak musíme vyčkat na výsledky ze sondy MAP, popř. z PLANCKa.

Pro zajímavost poznamenejme, že obdobnou statistickou analýzu můžeme provést i s galaxiemi, konkrétně s jejich



V dubnu 2002 skončila přehlídka oblohy 2dFGRS, v jejímž rámci se podařilo změřit více jak 220 000 rudých posuvů galaxií.

počty a s jejich rudými posuvy. Jedna z přehlídek, 2dFGRS, právě skončila a její výsledky jsou rovněž ve shodě s plochým vesmírem s kosmologickou konstantou.

Hmota ve vesmíru

V souvislosti s objeveným dominantním postavením kosmologické konstanty a podrobnou analýzou reliktního záření jako by se hmota dostávala na druhou kolej. A bohužel tomu tak trochu je i doopravdy. Kromě objevu několika málo hnědých trpaslíků v rámci přehlídek jako bylo MACHO či OGLE, nemáme zatím žádné tušení, co by mohlo být skutečnou podstatou temné hmoty. Zatím máme jen několik tipů, co temná hmota být nemůže.

Předně, velká většina temné hmoty není tvořena baryony. Jak vyplývá z měření relativního výskytu prvků a z teorie jejich tvoření po velkém třesku (viz graf na předchozí straně vpravo nahoře), baryonů ve vesmíru celkem není jistě víc než 5 % z kritické hustoty. Za druhé, temná hmota nemůže být tvořena neutrinami. Neutrina, ačkoli bylo nedávno prokázáno, že alespoň jedna z odrůd neutrin má nenulovou klidovou hmotnost, tvoří pravděpodobně méně než jedno procento hmoty vesmíru, zcela vyloučeno je pak množství překračující 10 % (neutrina totiž patří k tzv. horké,

tedy rychle se pohybující temné hmotě, a kdyby tato převažovala, tvořily by se struktury ve vesmíru shora – tedy od superkup galaxií směrem ke galaxiím, ale my pozorujeme pravý opak – galaxie teprve v současnosti vytvářejí velkoškálové struktury, jak potvrzují pozorování i nejnovější počítačové simulace.

O nejpravděpodobnějších kandidátech na chladnou temnou hmotu můžeme spolu s teoretiky zatím stále jen spekulovat, případnou pomoc pak vyhlížet z tábora částicových fyziků. Nejpravděpodobnějším kandidátem je totiž asi nejlehčí supersymetrická částice, neutralino, jejíž objevení by mělo být v dosahu budovaného urychlovače LHC v CERNu, který by měl být v provozu od roku 2008, je-li ovšem jeho klidová hmotnost předpovězená správně.

Vyloučeny však samozřejmě nejsou ani další varianty, jako třeba supermasivní částice, které vznikly při fázovém přechodu na konci inflace vesmíru, anebo tzv. axiony, které byly navrženy kvůli vysvětlení nulového elektrického dipólového momentu neutronu. Axiony se dají detektovat prostřednictvím tzv. Primakofovy konverze, kdy vzniká mikrovlnný foton. Stávající experimenty začínají být dostatečně citlivé k detekci takového jevu, a tak axiony budou během několika let buď potvrzeny (a záhada temné hmoty

vyřešena), anebo bude jejich existence vyloučena.

Výstřelky teoretiků

Teoretici si rádi zachovávají před experimentátory náskok, a tak se občas stává, že nějaká zpočátku šílená teorie se časem prokáže být geniálním průhledem do nových oblastí. (Mnohem častější ale je, že teorie zaslouženě skončí v propadlišti dějin.) Proto v tomto závěrečném odstavci heslovitě zmiňme dva nápady, které v současnosti plavou při povrchu v teoretickém kotli.

Tzv. největší omyl Einsteinova života, kosmologická konstanta, je v posledních letech opět velmi životaschopný. Některé teorie ale zavrhuje jeho standardní interpretaci jako vnitřní energii vakua a jeho konstantnost a navrhuje kosmologický člen chápat jako „kvintesenci“, jako pomalu slábnoucí pole nějaké nové páté síly.

Strunoví teoretici zase přišli v loňském roce s návrhem „brane“ kosmologie, popř. dokonce „ekpyrotického vesmíru“. (Bohužel, tato oblast je natolik nová, že česká terminologie zde zatím vůbec neexistuje, a tak omluvte anglické termíny v uvozovkách níže.) Těmito teoriemi, které zatím mají řadu nevyčytaných much, se pokouší vyřešit tzv. problém „energetické škály“, kdy fundamentální tzv. Planckova energie je mnohem větší, než jsou energie ve vesmíru obvykle pozorované. Tento nepoměr lze vysvětlit přidáním dalších rozměrů (extra dimenzí), kterých bývá obvykle sedm. V kosmologických aplikacích bývá šest rozměrů svinutých (kompaktifikovaných) a jedna rozvinutá. Pět rozvinutých dimenzí tedy společně tvoří tzv. „bulk“, náš čtyřrozměrný časoprostor tvoří tzv. „brane“, která se pohybuje podél páté rozvinuté dimenze. A právě srážka dvou těchto „branes“ by měla nahradit velký třesk a vytvořit „ekpyrotický vesmír“.

Soukromá inzerce:

Hledáme zájemce pro cestu za úplným zatměním Slunce do Jihoafrické republiky (popř. Mozambiku) letos, na přelomu listopadu a prosince 2002. V plánu cesty je i návštěva safari, různých přírodních scenérií a kulturních památek. Podrobnější informace jsou k dispozici vážným zájemcům e-mailem: sladecek@chmi.cz, tel. 02/44032404 (8-14h).