

Stručný průvodce po kosmologii 20. století

Jiří Podolský

Ústav teoretické fyziky
MFF UK v Praze

Velké Meziříčí

srpen 2008

kosmologie: věda o vesmíru jako celku

základní otázky:

- jaká je struktura kosmu (uspořádání, hierarchie)
- z čeho je složen (podstata, elementární prvky)
- rozměry a stáří (otázka nekonečnosti a věčnosti)
- vývoj struktur (vznik, budoucnost)

vývoj kosmologických představ: cesta od spekulací k vědeckým poznatkům

- mytologie dávných civilizací, náboženské představy
- antická vzdělanost, arabští zprostředkovatelé
- středověký scholastický obraz
- novověk a vznik vědy: pozoruhodná 400letá cesta
- Einsteinova teorie gravitace (obecná relativita, 1915):
aplikována na celý vesmír (modely konfrontované s pozorováním)

dnešní standardní kosmologický model:

poskytuje komplexní a konzistentní obraz opírající se o ověřené fyzikální teorie (mikrosvěta i makrosvěta):

expandující a vyvíjející se hierarchický vesmír s počátečním velkým třeskem

klíčové mezníky a osobnosti:

- Einstein (1917): model statického vesmíru
zavedení kosmologické konstanty Λ coby “antigravitace”
de Sitter (1917): rozpínající se prázdný vesmír
- Friedmann (1922): model rozpínajícího se vesmíru s hmotou
Lemaître, Tolman, Robertson, Walker a jiní: úplná rodina homogenních a izotropních (FLRW) modelů obsahujících “prach”, elmag záření a případně Λ
- Lemaître (1927): “prvotní atom” - zrod teorie velkého třesku
- Curtis vs. Shapley (kol.1920): spirální mlhoviny jsou vzdálené galaxie: důkaz
Hubble (1923) změřením vzdálenosti M31 v Andromedě pomocí cefeidy
- Hubble a Humason (1929): rudý posuv spekter galaxií - vesmír se rozpíná

éra fyzikální kosmologie

- **nukleosyntéza** (30.-50. léta):
otázka vzniku prvků termonukleárními reakcemi
Atkinson, Houtermans, Bethe, Weizsäcker: produkce He z H **ve hvězdách**
Gamow (1935,1946), Gamow, Alpher (1948): **při velkém třesku**
ale problém vzniku těžších prvků: hvězdy
C: Opik, Salpeter (1951,2), Hoyle, Fowler (1954)
další prvky: Burbidgeovi, Fowler, Hoyle (1957)
prvky těžší než Fe v supernovách: Cameron (1957)
- **souboj teorií velkého třesku a stacionárního vesmíru** (50.-60. léta):
Hoyle, Gold, Bondi (1949): model “stacionárního vesmíru”
neustálé tvoření hmoty při expanzi \Rightarrow věčný a neměnný vesmír ?
- **zpřesnění stáří vesmíru**: problém s časovými škálami (50. léta):
Hubbleova konstanta příliš velká \Rightarrow vesmír se zdál mladší než objekty v něm
Baade (1952): dvě populace cefeid, revize mezigalaktických vzdáleností 2,6x
Sandage (1958): velmi zářivé “hvězdy” v galaxiích, jsou tzv. H II oblasti
další nárůst vesmírných vzdáleností 2,2x, plus další práce
 \Rightarrow zvětšení stáří vesmíru na více než 10 miliard let ✓

triumf teorie velkého třesku

- **prokázání evoluce vesmíru:**

objev aktivních galaxií a kvazarů

Ryle (1961): prostorové rozložení rádiových galaxií

Schmidt (1963): identifikace kvasaru 3C 273 rádiově i opticky

obrovský rudý posuv: malý vzdálený objekt s obrovskou svítivostí

⇒ vzdálené (a tedy mladé) vesmírné objekty jsou jiné než blízké ✓

- **existence reliktního mikrovlnného záření:**

Alpher, Gamow, Herman (1948): teoretická předpověď existence rádiového reliktního záření jako “ozvěny” horkého velkého třesku

(Planckovo spektrum absolutně černého tělesa s teplotou několika kelvinů)

Penzias, Wilson (1965): experimentální důkaz

záření je velice izotropní, planckovské a má teplotu $T = 2,7K$ ✓

družice COBE (1989): přesně proměřila reliktní záření:

zjištěny anizotropie řádu 10^{-5} odpovídající “zárodkům” kup galaxií a voidů ✓

- **určení parametrů modelu velkého třesku:**

vzdálené supernovy, mapování struktur, družice WMAP (přelom století):

vesmír obsahuje mnoho temné hmoty a temné energie alias Λ ?

shrnutí klíčových pozorování

- **vesmír je popsatelný známými fyzikálními zákony:**

hlavní argument: spektroskopie

beze zbytku se podařilo identifikovat spektrální čáry vysílané nebeskými objekty s laboratorními \Rightarrow vesmírná tělesa složená z téže hmoty jako Země (stejně chemické prvky, zákony elektromagnetizmu, kvantové mechaniky ...) při extrapolaci fyzikálních zákonů je však nutná opatrnost

- **vesmír obsahuje na různých škálách množství struktur:**

částice, atomy, buňky, lidé, Země, Slunce, galaxie, kupy galaxií ...

tvoří kosmos: *kosmeo* = “uspořádat”, “srovnat”

rozměrové škály řádově:

proton ($10^{-15}m$), atom ($10^{-10}m$), buňka ($10^{-5}m$), člověk ($1m$), Země (10^7m), sluneč.soustava ($10^{13}m$), galaxie ($10^{21}m$), vesmír ($10^{26}m$)

- **struktury složeny z kvarků a leptonů navzájem spojených 4 interakcemi:**

silnou jadernou, slabou jadernou, elektromagnetickou, gravitační

vesmír ve velkém je ovládán **gravitací** (přestože je nejslabší)

Co je nejmenší strukturou přírody ?

- základní “cihly” vesmíru: 6 kvarků a 6 leptonů plus jejich antičástice
3 rodiny, kvarky ve třech barevných mutacích
velká jednota a elegance!
existence a složitost struktur závisí teplotě a rozměrech

Co je největší strukturou přírody ?

- vesmír je na velkých rozměrech uniformní, nemá globální strukturu:
izotropní: ve všech směrech vypadá v průměru stejně
homogenní: ve všech místech vypadá v průměru stejně
na malých škálách pozorujeme bohatství struktur (viz výše)
na velkých škálách se odlišnosti smývají
oblasti vesmíru o rozměrech $> 200 Mpc$ jsou v průměru stejné
vesmír ve velkém je tedy velmi “fádní”
potvrzováno pozorovaným rozložením galaxií, kvasarů, reliktního záření, ...

- **vesmír jako celek se rozpíná**

vzdalování galaxií a kvazarů: rychlost měřena Dopplerovým rudým posuvem

Hubble (1929): rychlost úměrná vzdálenosti: $v = H d$ (pro “malá” d)

dnešní hodnota je $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

⇒ v jistém okamžiku v minulosti byly všechny objekty “na tomtéž místě”:
velký třesk: obrovské teploty, tlaky, hustoty (Lemaître, Gamow)

- **vesmír má specifické složení chemických prvků**:

nejvíce H, méně He (cca $\frac{1}{4}$), nepatrné množství ostatních prvků (D, Li, ...):

hvězdy mění H na He (Eddington, Atkinson, Houtermans, Bethe),

ale za dobu existence vesmíru nemohly vyrobit tolik He, kolik pozorujeme

⇒ He, D, Li nutně musely vzniknout na samotném počátku vesmíru

– prvotní nukleosyntéza vytvořila **nejlehčí prvky** (Gamow, Alpher)

(relativní poměr He, D, Li přitom silně závisí na hustotě baryonové hmoty!)

– prvky **středně těžké** se syntetizují v nitru hvězd

– prvky **těžší než Fe** vznikají při výbuchu supernov

- **vesmír vyplňuje reliktní mikrovlnné záření**
rádiové záření, které přichází rovnoměrně z celé oblohy
velmi izotropní, spektrum absolutně černého tělesa o teplotě $T = 2,728K$
pozorováno: Penzias, Wilson (1965), **Nobelova cena 1978**
teoreticky předpovězeno jako klíčový důsledek velkého třesku:
Alpher, Gamow, Herman (1948), následně Dicke, Peebles, Roll, Wilkinson
- **detailní měření nepatrných anizotropií reliktního záření:**
reliktní záření přeci jen vykazuje drobné odchylky:
dipólová anizotropie (1976): špionážní letadlo U-2: $\Delta T \sim 3mK$
způsobena pohybem Země rychlostí 300 km/s a Dopplerovým jevem
družice COBE (start 18.11.1989): odchylky velikosti $\Delta T \sim 20\mu K$
zárodky struktur, které vedly ke vzniku hvězd, galaxií a jejich kup
Smoot, Mather, **Nobelova cena 2006**
skvěle potvrzeno a upřesněno následnou družicí WMAP (30.6.2001): \Rightarrow

z odchylek reliktního záření na různých úhlových škálach (z polohy a výšky akustických píků) lze určit parametry vesmíru: stáří, rychlost rozpínání, složení ...

- **základní parametry vesmíru** (výsledky pětiletého měření WMAP+SN+BAO):
 - velký třesk se odehrál před $13,7 \pm 0,1$ **miliardami let**
 - Hubbleova konstanta H je dnes $70,1 \pm 1,3 \text{ km/s/Mpc}$
 - parametr prostorové plochosti je $-0,02 < \Omega_k < 0,01$
 - rudý posuv oddělení reliktního záření od hmoty je $z = 1091 \pm 1$
 - oddělení (rekombinace) nastalo 376 ± 3 tisíce let po velkém třesku
 - čas reionizace (zážeh hvězd) je 432 ± 90 milionů let po velkém třesku
- **ve vesmíru je kromě obvyklé hmoty také “temná hmota” a “temná energie”:**
 - **atomy a částice:** 5% $4,6 \pm 0,1 \%$
 - **temná hmota:** 23% $22,6 \pm 0,6 \%$
 - **temná energie:** 72% $72,1 \pm 1,5 \%$obvyklá hmota tedy tvoří jen nepatrnou součást celého vesmíru!
stavová rovnice temné energie je $p = w\rho$, kde $w = -0,97 \pm 0,06$,
přičemž $w = -1$ odpovídá kosmologické konstantě Λ
- **díky “temné energii” alias kosmologické konstantě vesmír zrychluje rozpínání**

shrnutí: dnešní “standardní” model vesmíru: Λ CDM

neboli:

globálně homogenní a izotropní (FLRW) vesmír s téměř plochým prostorem, dominantní kosmologickou konstantou a chladnou nebaryonovou temnou hmotou, který z počátečního velkého třesku dnes zrychleně expanduje, přičemž prvotní fluktuace byly adiabatické, gaussové a téměř nezávislé na škále

de facto “váhající” vesmír Lemaître (1933), kde funkce expanze $R(t)$ řeší rovnici

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{8\pi G}{3c^4} \left(\frac{\text{látka}}{R^3} + \frac{\text{záření}}{R^4} \right)$$

pro $R \rightarrow 0$ počáteční singularita velkého třesku,

pro $R \rightarrow \infty$ dominuje kosmologická konstanta $\Lambda \Rightarrow R(t) \sim \exp(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t)$

je kompatibilní s celou řadou nezávislých měření

(velkorozměrové struktury, vzdálených supernov, reliktního záření, ...)

Co však je podstatou temné hmoty a temné energie ?

epilog: postmoderní kosmologie

21. století dostalo do vínku také spoustu “bláznivých” kosmologických nápadů:

- **myšlenka počáteční “inlace”**, Guth (1980):
snaha vysvětlit homogenitu, izotropii a plochost prostoru prudkým rozepnutím vesmíru v čase zhruba $10^{-35} s$ po velkém třesku
- **neustálý vznik paralelních světů**, Linde (1983), Smolin (1997):
spontáně kvantovými fluktuacemi anebo uvnitř černých děr vznikají nové, oddělené vesmíry: naše universum je jen jednou malou částí multiversa
- **ekpyrotická a cyklická bránová kosmologie**, Steinhardt, Turok (1999):
velký třesk byla vlastně srážka dvou paralelních světů (tzv. D-brán) žijících ve vícerozměrném vesmíru a může se znova opakovat
- **mnohé další vícerozměré modely inspirované strunovými teoriemi ...**

hlavní problém: **vesměs to jsou čiré spekulace**

opírající se o neověřené/neověřitelné hypotézy a teorie částicové fyziky