

Struktura a vývoj vesmíru

aneb základní kosmologická fakta a modely

(Jiří Podolský, MFF UK, červenec 2008)

Úvod: kosmologie jako věda o vesmíru jako celku

základní kosmologické otázky

- jaká je struktura (uspořádání) vesmíru
- z čeho je složen (podstata)
- rozměry a stáří (otázka nekonečnosti a věčnosti)
- vývoj struktur ve vesmíru, budoucnost
- problém stvoření, smyslu, ...

vývoj kosmologických představ:

cesta od spekulací k vědecky zdůvodněným modelům

- mytologie starých civilizací
- antická vzdělanost, arabští zprostředkovatelé
- středověký scholastický obraz
- novověk: vznik vědy (pozoruhodná 300 letá cesta, období před a po Einsteinovi)

vědecká metoda

1. experiment, pozorování skutečnosti
2. precizní a kritický rozbor, pojmy a vztahy
3. konstrukce co nejpřesnějších modelů: fyzikální zákony formulované matematicky
4. kvantitativní předpovědi
5. konfrontace aneb opět krok 1.

kosmologie je dnes věda, i když velmi výjimečná

- předmětem zkoumání je jediný “objekt”
- těžko s ním můžeme provádět “pokusy” obvyklým způsobem
- můžeme však pečlivě **pozorovat**, jak se nám vesmír jeví
- pak hledat co nejpřesnější **model**, opírající se o ověřenou fyziku počátku 21. století
(kombinuje různé fyzikální teorie mikrosvěta a makrosvěta, komplexní a konzistentní obraz)
- fyzikální kosmologie 20. století je věda, neboť její modely jsou **vyvrátitelné** (Popper)
- v každém okamžiku tak máme model, který vesmír popisuje nejlépe
- dnes je to tzv. **standardní model rozpínajícího se vesmíru s velkým třeskem**
- moderní kosmologie je úžasný příběh racionálního lidského poznání

Klíčová pozorování

1. vesmír je poznatelný, popsatelný a platí v něm známé fyzikální zákony

- můžeme proto používat fyzikální teorie, které lidstvo odhalilo zde na Zemi
- velmi netriviální fakt, dlouho si lidé mysleli, že tomu tak není
(představa dokonalých nebeských pohybů a nedokonalých pozemských dějů)
- průlom až Newton v teorii o všeobecné gravitaci (*Principia* 1687)
(pád jablka se řídí stejným fyzikálním zákonem jako pohyb planet)
- úžasná jednota a jednoduchost světa (potvrzení alchymistického “co je dole, je i nahoře”)
- hlavní argument: **spektroskopie**, podařilo se dokonale a beze zbytku identifikovat veškeré spektrální čáry vysílané nebeskými objekty s laboratorními (“analýza duhy”)
- Joseph von Fraunhofer (1814): temné čáry ve slunečním spektru;
Gustav Kirchhoff, Robert Bunsen (1860): identifikace
- vesmírná tělesa složená z **téže hmoty** jako Země (“Nebe a Země jedno jsou”)
 - zcela stejné chemické prvky
 - stejné zákony elektromagnetizmu
 - stejné zákony kvantové mechaniky a jaderné fyziky ...
- při extrapolaci fyzikálních zákonů přesto nutná jistá opatrnost

2. vesmír obsahuje množství struktur

- na různých škálách pozorujeme bohatství struktur:
částice, atomy, buňky, lidé, Země, Slunce, galaxie, kupy galaxií ...
- ilustrace: **struktura domu** či katedrály
každá stavba složená ze **základních prvků** (cihly, schody, okna, dveře ...), které jsou správně **uspořádány** a navzájem svázány vhodným **pojivem** (malta z písku, vody, vápna ...)
- **hlavní struktury kosmu** (ze starořeckého *kosmeo*, což znamená “uspořádat”, “srovnat”)
vycházíme zde od člověka (antika: člověk je mírou všech věcí...), rozměry cca 1 m, odtud
→ **směrem k většímu**: biosféra, Země, sluneční soustava, galaxie, kupy, pozorovaný vesmír
→ **směrem k menšímu**: orgány, tkáně, buňky, orgány, molekuly, atomy, jádra, částice
- je dobré si uvědomit též **rozměrové škály** těchto struktur:
proton ($10^{-15} m$), atom ($10^{-10} m$), buňka ($10^{-5} m$), člověk (1 m), Země ($10^7 m$),
sluneční soustava ($10^{13} m$), galaxie ($10^{21} m$), pozorovaný vesmír ($10^{26} m$)
- zajímavé: “člověk stojí uprostřed”
to nepřekvapí: je to *člověk*, který zkoumá; stojí ale za pozornost, že v každé době byly schopnosti zkoumat mikrosvět i makrosvět víceméně srovnatelné (poč. 20. století: objev atomů i galaxií)

3. pozorované struktury složené z kvarků a leptonů navzájem spojených 4 interakcemi:

gravitační, elektromagnetickou, silnou jadernou, slabou jadernou

zhruba platí (viz jejich obvyklé projevy):

- jaderné interakce ovládají mikrosvět
- elmag interakce ovládá svět běžné lidské zkušenosti
- gravitační interakce ovládá makrosvět

vesmír ve velkém ovládán gravitací

(působení jaderných sil omezeno na atomy a částice, velká tělesa jsou elektricky neutrální:
od rozměrů cca 100 km je gravitace dominantní (kulový tvar planetek, planet, hvězd)

Co je *nejmenší strukturou* přírody ?

- **základní cihly vesmíru: 6 kvarků, 6 leptonů a jejich antičástice**

(3 rodiny, kvarky ve třech barevných mutacích)

každá částice má svoji antičástici (viz gryfové v Escherově zrcadlu)

velká jednota a elegance!

- znovu přehled vesmírných struktur počínaje kvarky a leptony
jejich návaznost zejména s ohledem na interakce, které se právě uplatňují
růst velikosti versus růst složitosti
dalším dělítkem je teplota

Co je *největší strukturou* přírody ?

4. vesmír je na velkých rozměrech uniformní (bez globální struktury)

- **izotropní:** ve všech směrech vypadá v průměru stejně
- **homogenní:** ve všech místech vypadá v průměru stejně
- na malých škálách pozorujeme bohatství struktur (viz bod. 2)
- na velkých škálách (srovnáváme-li spolu opravdu velké oblasti vesmíru) se odlišnosti smývají
- ilustrace na hromádce písku pozorované zblízka a z dálky
- jde o volbu měřítka, velikost oblasti v níž průměrujeme
- **všechny oblasti vesmíru o rozměrech $> 200 \text{ Mpc}$ jsou v průměru stejné**
- vesmír ve velkém je tedy velmi “fádní”
- rozměry dnes pozorovaného vesmíru zhruba 10^{26} m (cca 5000 Mpc)
- vesmír : sluneční soustava = sluneční soustava : 1 m
- potvrzováno pozorováním rozložení **galaxií, kvasarů, reliktního záření**
- nejsme ve středu vesmíru (koperníkovský princip)

5. vesmír jako celek se rozpíná

- Edwin Hubble (1929): vzdalování galaxií
- rychlost měřená rudým posuvem: Christian Doppler (1842)
- rychlost úměrná vzdálenosti: $v = H d$ (pro malá d : Hubbleova měření do 2 Mpc)
- dnešní hodnota $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$
- vesmír není statický, jak si zprvu myslel Einstein
- v jistém okamžiku v minulosti byly všechny objekty “v tomtéž místě”
- **velký třesk**: obrovské teploty, tlaky, hustoty: Lemaître (1927, “prvotní atom”), Gamow (1946)

teorie **velkého třesku** dnes **ověřena** především dalšími dvěma klíčovými pozorováními:

6. vesmír má specifické chemické složení

- nejvíce H , méně He (cca 27%), nepatrné množství ostatních prvků (D, Li, \dots)
- ve hvězdách se H mění na He (Eddington)
pp-řetězec Atkinson a Houtermans, konec 20. let, CNO cyklus H.Bethe, C.F.Weizsäcker 1938,
ale za dobu existence vesmíru se nestačilo syntetizovat tolik He , kolik pozorujeme
- He, D, Li atd. **nutně musely vzniknout na samotném počátku vesmíru**
- prvotní nukleosyntéza: G.Gamow (1935, 1946), R.Alpher, H.Bethe, G.Gamow (1948)
relativní poměr He, D, Li přitom velice silně závisí na hustotě baryonové hmoty!
- středně těžké prvky se syntetizují v nitru hvězd
syntéza uhlíku: E.Opik (1951), E.Salpeter (1952), F.Hoyle (1954), W.A.Fowler (1957),
celý komplex reakcí M. a G. Burbidgeovi, W. Fowler, F.Hoyle (1957)
- prvky těžší než Fe vznikají při výbuchu supernov: A.Cameron (1957)
shrnutí: P.J.E.Peebles (1966), R.V.Wagoner, W.A.Fowler, F.Hoyle (1967)
(lidé, Země, ... jsou z materiálu již nejméně jednou prošlého hvězdami)

7. vesmír vyplňuje reliktní mikrovlnné záření

- rádiové záření přicházející **rovnoměrně z celé oblohy**
(na rozdíl od astrofyzikálních izolovaných zdrojů)
- obloha není úplně temná, ale stejnoměrně mírně šedá
- velmi izotropní, spektrum absolutně černého tělesa o teplotě 2,728 K
- pozorováno: A.A.Penzias, R.W.Wilson (1965), Nobelova cena 1978
- teoreticky předpovězeno dříve jako důsledek velkého třesku:
R.A.Alpher, H.A.Bethe, G.Gamow (1948), následně R.Dicke, J.Peebles, D.Wilkinson ...

8. detailní měření nepatrných anizotropií reliktního záření

- reliktní záření přeci jen vykazuje drobné odchylky:
- dipólová změřena v roce 1976: špionážní letadlo U-2, $\Delta T \sim 3mK$ tedy $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-3}$
způsobena pohybem Země a Dopplerovým jevem, odpovídá rychlosti 300 km/s
- družice COBE (start 18.11.1989) změřila odchylky o velikosti $\Delta T \sim 20\mu K$ tedy $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$
struktury, které vedly ke vzniku hvězd a galaxií
- Nobelova cena 2006: G.F.Smooth a J.C.Mathers
- skvěle potvrzeno a vylepšeno následnou družicí WMAP (2001):

9. kromě obvyklé hmoty je ve vesmíru také “temná hmota” a “temná energie”

- WMAP z měření teplotních odchylek reliktního záření na různých úhlových škálách dokázala stanovit základní parametry vesmíru: rychlost rozpínání, stáří, složení ...
(z polohy a výšky akustických píků)
velké překvapení, která 4 roky předtím avizovala měření vzdálených supernov:
- **vesmír zrychluje své rozpínání:** způsobeno temnou energií alias kosmologickou konstantou
temná energie: 72 % $72,1 \pm 1,5\%$
temná hmota: 23 % $22,6 \pm 0,6\%$
atomy a částice: 5 % $4,6 \pm 0,1\%$
obvyklá hmota tedy tvoří jen nepatrnou součást celého vesmíru!

10. další základní parametry vesmíru

(výsledky 5letého měření WMAP+SN+BAO)

- velký třesk se odehrál před $13,7 \pm 0,1$ miliardami let
- Hubbleova konstanta je dnes $70,1 \pm 1,3 \text{ km/s/Mpc}$
- parametr prostorové křivosti odpovídá $-0,02 < \Omega_k < 0,01$, tedy méně než 1%
- rudý posuv okamžiku 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
- stavová rovnice temné energie je $p = w\rho$, kde $w = -0,97 \pm 0,06$, přičemž $w = -1$ odpovídá Λ
- spektrum fluktuací téměř nezávisí na škále

Standardní teoretické modely vesmíru

1. výchozím bodem je Einsteinova teorie gravitace

neboť gravitace je na velké vzdálenosti dominantní interakcí

- nejlepší teorie gravitace, kterou máme dnes k dispozici
- **obecná teorie relativity** (1915), brzo jí bude 100 let ...
- chápe gravitační působení jako zakřivení prostoru a času
- bláznivé, ale funguje: srovnání, jak vysvětluje zakřivení drah planet
- matematicky je zakřivený prostorčas popsán **metrikou** $g_{\alpha\beta}$
- 10 funkcí 4 proměnných (3 prostorové a 1 časová)
- jak konkrétně zakřiven ?
- Einsteinovy rovnice: $G_{\mu\nu}(g_{\alpha\beta}) + \Lambda g_{\alpha\beta} = \frac{8\pi\kappa}{c^4} T_{\alpha\beta}$
výraz daný metrikou hmota: zdroj zakřivení
- neznáme samozřejmě přesné rozložení hmot ve vesmíru
- navíc velmi složitá matematika
- nezbyvá nám než dělat **co nejpřesnější modely** (aproximace)

2. konstrukce standardních modelů vesmíru

- předpoklad velkorozměrové uniformity (FRW)
- H.P.Robertson (1935): obecně ukázal, že homogenita a izotropie již dosti určuje možný tvar metriky (zakřivení)
- vlastně jen 3 možnosti:
 - euklidovský plochý 3 dim prostor ($k = 0$)
 - 3 dim povrch 4 dim koule ($k = +1$)
 - 3 dim povrch 4 dim hyperboloidu ($k = -1$)
- zbývá jediná neurčená funkce $R(t)$: **funkce expanze**
- udává, jak se mění rozměr vesmíru v časem
(vzdálenost libovolných dvou galaxií)
- “nafukování balónku”: roste jeho poloměr ...

- Einsteinovy rovnice se zjednoduší na snadnou rovnici:

$$H^2 = \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{8\pi\kappa}{3c^4} (\rho_{\text{látka}} + \rho_{\text{záření}})$$

$$H(t) = \dot{R}/R \dots \text{Hubbleova "konstanta"}$$

$$\Lambda, k, \kappa, c$$

$$\rho_{\text{látka}} = \text{konst}/R^3 \dots \text{ hustota látky (částic)}$$

$$\rho_{\text{záření}} = \text{konst}/R^4 \dots \text{ hustota záření (fotonů)}$$

(použití stavové rovnice)

- pro různé hodnoty parametrů dostáváme různá řešení $R(t)$ diferenciální rovnice

3. kvalitativní rozbor Einsteinovy rovnice

- $R = 0$ odpovídá **velkému třesku**
- hovoříme o "počáteční singularitě", neboť tam $\rho_{\text{látka}} = \infty$ i $\rho_{\text{záření}} = \infty$; také $T = \infty$
- na počátku vesmíru byla rychlost rozpínání určována hlavně zářením (počtem fotonů atd. v daném objemu), neboť $\sim 1/R^4$: **éra záření**
- pak nastoupila **éra látky**, v níž dnes žijeme: rozpínání určováno hustotou "obyčejné" hmoty
- o budoucím osudu vesmíru rozhodne hodnota křivosti k a zejména kosmologické konstanty Λ : dnes se zdá (WMAP etc.), že $\Lambda > 0$

4. nejznámější modely vesmíru

- konkrétní řešení Einsteinovy rovnice pro jisté speciální volby parametrů
- A.Einstein** (1917): statický model: $R = \text{konst}$, nutnost zavést $\Lambda > 0$
($H = 0, k = +1, \rho_{\text{látka}} = \text{konst}, \rho_{\text{záření}} = 0$)
- W.de Sitter** (1917): exponenciální rozpínání, bez hmoty, bez začátku a konce
($\Lambda > 0, k = 0, \rho_{\text{záření}} = \rho_{\text{látka}} = 0$)
- A.Friedmann** (1922, 1924): rozpínání, látka ($\rho_{\text{záření}} = 0, \Lambda = 0$)
3 možnosti v závislosti na hodnotě k

$k = -1$: **"otevřený"** vesmír

$$R(\eta) = -A(1 - \cosh \eta), \quad A = 4\pi\kappa\rho_0 R_0^3/3c^3$$

$$t(\eta) = -(A/c)(\eta - \sinh \eta)$$

$k = 0$: **"plochý"** vesmír

$$R(\eta) = R_0 \sqrt[3]{6\pi\kappa\rho_0} t^{\frac{2}{3}}$$

(Einstein-de Sitter)

$k = +1$: **"uzavřený"** vesmír, konečný objem i doba trvání

$$R(\eta) = A(1 - \cos \eta)$$

$$t(\eta) = (A/c)(\eta - \sin \eta): \text{cykloida}$$

- problém: směrem k minulosti jsou všechny tři scénáře téměř shodné, liší se výrazně svou předpovědí budoucnosti
- nutná pečlivá pozorování vzdálených supernov, galaxií a kvasarů: vlastně proměňování $H(t)$ (t.j. $R(t)$): čím se díváme dál do vesmíru, tím se díváme blíže velkému třesku (dnes pozorované kvasary vysílaly své záření v době, kdy ještě neexistovalo Slunce, teprve během letu signálů vybuchla předešlá supernova, vznikla sluneční soustava, Země, v loužičkách život, proběhla celá evoluce)
- **pozorovatelné svítící** hmoty ve vesmíru je jen velmi málo
- existuje tzv. skrytá **temná hmota** (rotační křivky galaxií, WMAP)
- nadto je dnes zcela dominantní **temná energie** alias **kosmologická konstanta** “energie vakua” způsobující zrychlené rozpínání vesmíru (“váhající” vesmír Lemaître, 1933)
- dnešní **standardní model** je tzv. Λ CDM, tedy globálně homogenní a izotropní vesmír s plochým prostorem, dominantní kladnou kosmologickou konstantou a chladnou nebaryonovou temnou hmotou, expandující z velkého třesku, přičemž jeho počáteční fluktuace jsou adiabatické, gaussovské a téměř nezávislé na škále

je kompatibilní s řadou nezávislých měření

(velkorozměrové struktury, vzdálené supernovy, reliktní záření, ...)

Jaký bude jeho budoucí osud?

- otázka, co je podstatou temné hmoty a temné energie: jeden z hlavních otevřených problémů dnešní kosmologie (exotické částice a pole?)

struktury a objekty nebyly stvořeny naráz ale vznikaly postupně **evolucí**:

5. stručná chronologie vesmíru: evoluce

- $< 10^{-43}$ s: (Planckův čas), hustoty řádu $\rho > 10^{97} \text{ kg m}^{-3}$: zřejmě se projeví **kvantový charakter gravitace**. Důsledky dnes nejasné, neboť neexistuje příslušná fyzikální teorie ($t_{pl} = \sqrt{\kappa \hbar / c^5}$)
- 10^{-33} s: GUT \rightarrow inflace ?
- 10^{-2} s: teplota 10^{11} K pouze horká “polévka” z elementárních částic: **fotonů, neutrin, elektronů, pozitronů, méně kvarků**; neustálé srážky, kreace a anihilace; rozhodně nemohou přetrvat stabilní atomová jádra
- 1 s: teplota $T = 10^{10} \text{ K}$: neutrina se začínají chovat jako volné částice
- 10 s: teplota $T = 3 \times 10^9 \text{ K}$: anihilace elektronů s pozitrony; z protonů a neutronů začíná **nukleosyntéza stabilních jader** D, He a dalších lehkých prvků; trvá asi 3 minuty. Hmota je však ve stavu plazmatu

- 380 000 *let*: teplota cca $T = 3000K$ klesla natolik, že fotony již nestačí ionizovat, vodík a další **atomy rekombinují**, hmota se stává pro záření průhlednou, začínají žít nezávislým životem: dnes (po dalším ochlazení) pozorujeme jako **reliktní záření**
- **vznik hvězd a galaxií** kondenzací z prvotních drobných nehomogenit; první hvězdy se zažehly cca 400 milionů let po velkém třesku, skončila doba temna, první galaxie byly velmi aktivní (kvazary, rádiové galaxie,...), Galaxie vznikla cca 4 mld let po velkém třesku
- ve hvězdách se syntetizují **těžké prvky** (... Si, Al, Fe), v supernovách pak ty nejtěžší prvky, z nichž kondenzují planety, vznikají **bohatší struktury** až po život
postupně vznikají podmínky vhodné pro **život**: prokaryonta (3,5 mld let, sinice vyrobily O_2)
→ eukaryonta (1,5 mld let) → trilobiti (570 mil let) → savci (225 mil let) → **člověk**:

Závěr

zdá se, že dnes můžeme oprávněně tvrdit, že máme k dispozici konzistentní, elegantní a poměrně přesný obraz struktur a evoluce celého pozorovaného vesmíru

??? co je však podstatou temné hmoty a temné energie???