

V jakém vesmíru žijeme

Vesmír - z ruského slova *весь мир* (ves mir – „celý svět“) z doby národního obrození; dříve staročeské *vesvět*

Kosmos - z řeckého *κόσμος* = *ozdoba, šperk*; později také vše *uspořádané, řádné*; vesmír

co je **vesmír**?

širší definice - označení pro celek (čas-)prostoru, hmotu a energii v něm

užší definice - prostor mimo Zemi a její atmosféru

kosmologie (kosmos+logos) - nauka o vesmíru jako celku

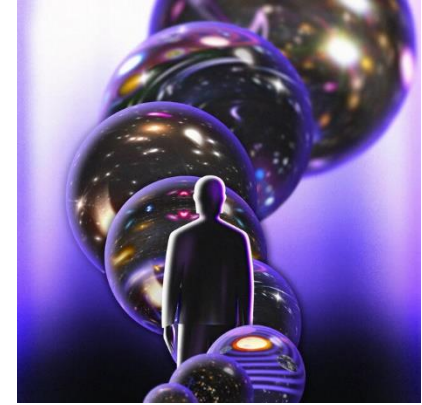
Cosmographer, one skill'd
in *Cosmography*.
Cosmography, (Gr.) is a De-
scription of the severall Parts
of the visible World, deline-
ating them according to their
Number, Positions, Motions,
Magnitude, Figures, &c. the
two Parts of which are, *Astro-
nomy* and *Geography*.

Thomas Blount – *Glossographia* (1656), v latině Christian Wolff -
Cosmologia generalis (1731)

kosmologie

je to opravdu věda?

dnes moderní **věda založená na pozorování!**

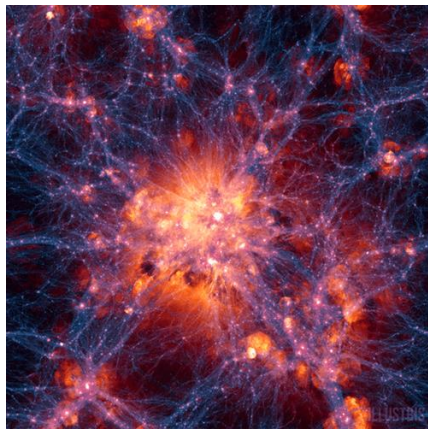


předmět kosmologie

- vesmír jako celek, jeho vlastnosti, stavba, vývoj
- zvláštnost – známe jen malou část -> extrapolace na většinu

východisko kosmologie – fyzikální zákony platí vždy a všude ve vesmíru
zatím ale nepopisujeme temnou neinteragující hmotu a temnou energii!

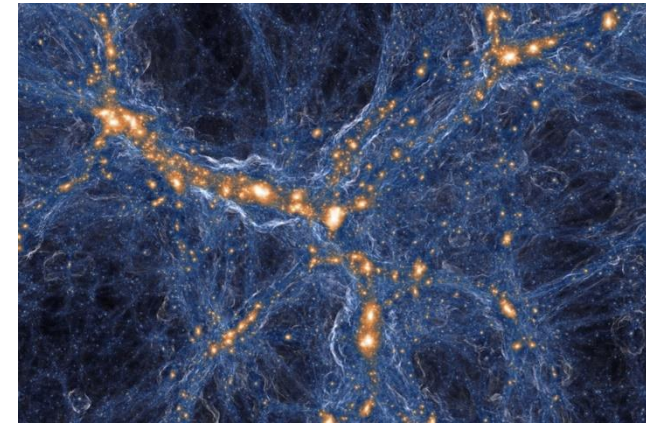
metoda kosmologie – tvorba matematických modelů a jejich srovnání
s pozorováním



JWST

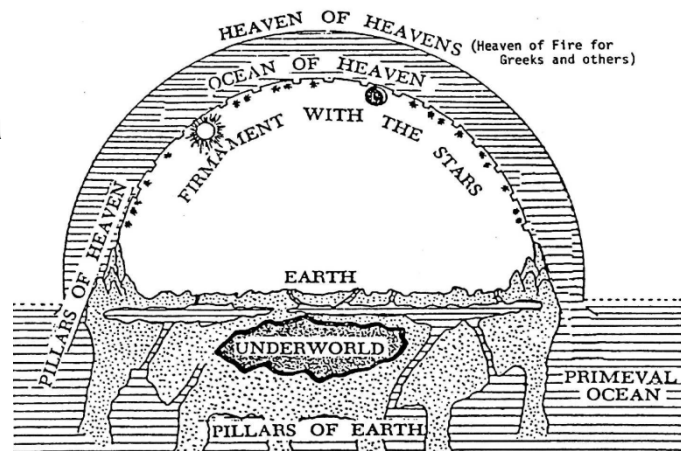


Euclid



První představy a první paradoxy

mytologie – prvotní představy; každá kultura řešila po svém otázku původu světa, kde žijeme



První představy a první paradoxy

starověk, středověk – vesmír je vidět celý,

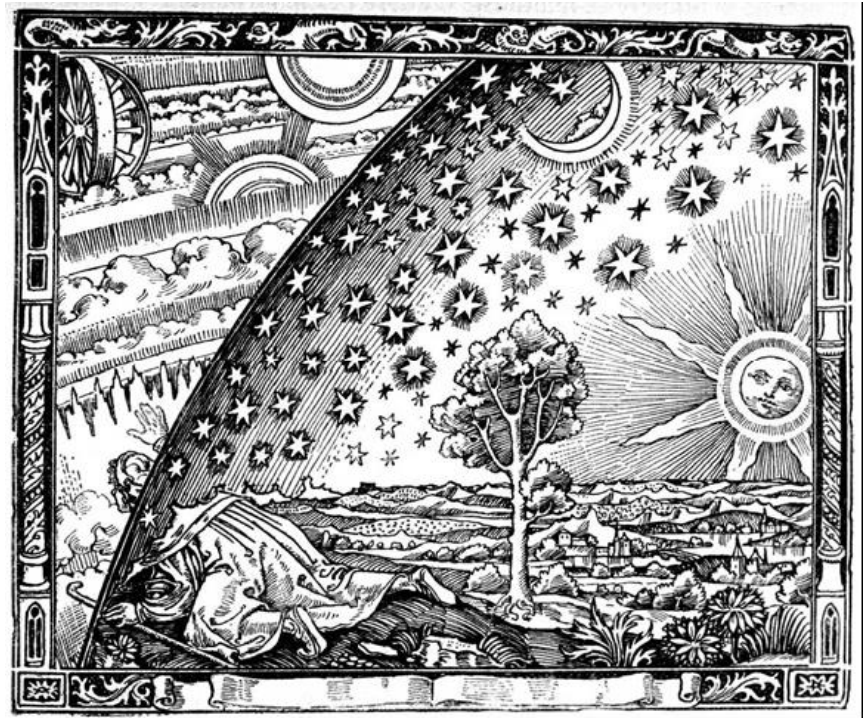
kompletní; vnější hranice = sféra stálic

Aristotelovská fyzika – 2 fyziky

- kulatá Země tvořena 4 živly (pozemské matérie)

- nad sférou Měsíce – nebeská materie (éter)

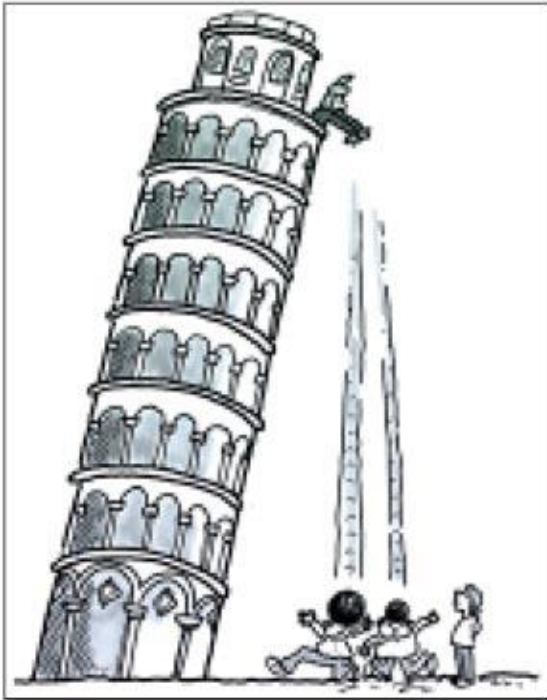
střed světa?



Pozdější představy a paradoxy

novověk – Galileo, Newton – setrvačnost, volný pád, zákony pohybu, gravitační zákon => **fyzika pozemská a fyzika vesmíru splynuly!** (pojem těžiště)

definitivně až v pol. 19. stol. – spektrální analýza Slunce a hvězd





Kosmologický princip

střed vesmíru – historicky Země (Aristoteles) -> Slunce -> ?
Koperník – poloha Země není ve vesmíru jedinečná
pol. 19. stol. – paralaxy hvězd – umístování Slunce do
prostoru mezi hvězdy -> poloha v Galaxii -> Galaxie -> střed
vesmíru neexistuje!

základní paradigma kosmologie:

Žádný bod v prostoru nemá privilegované postavení!

Vlastnosti vesmíru v dostatečně velkém měřítku budou stejné pro všechny pozorovatele.



Vesmír musí být homogenní a izotropní!
(stejnorodý a stejný ve všech směrech)



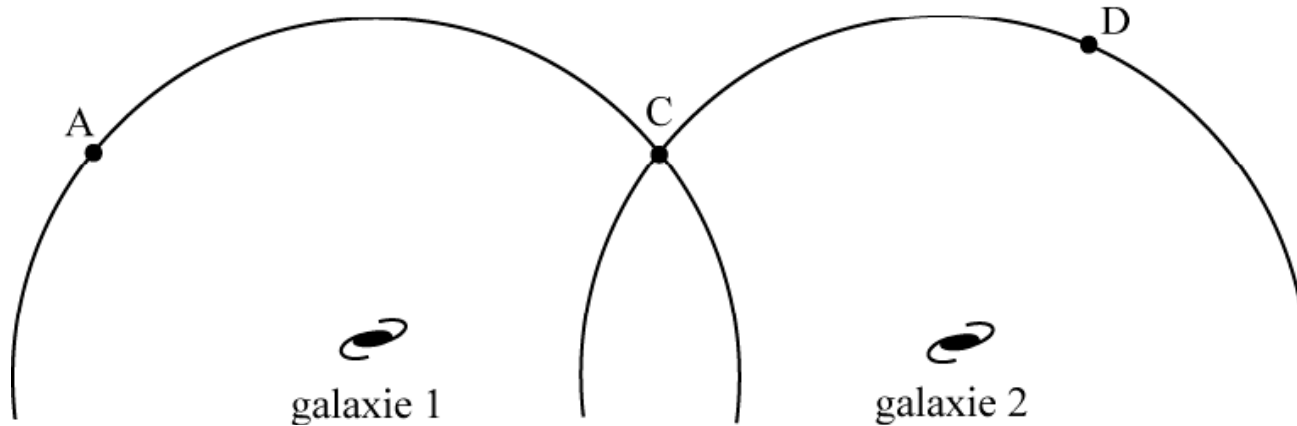
okolní prostor nehomogenní – záleží na měřítku !

od 10^8 pc výše vesmír homogenní

reprezentativní vzorek vesmíru = krychle o hraně 200 milionů ly
- v našem dohledu jich je milión!

Kus hvězdné oblohy o rozloze 2×4 úhlové minuty je vyplněn jen vzdálenými galaxiemi (snímek pořízen v infračerveném oboru na observatoři ESO v La Silla, Chile).

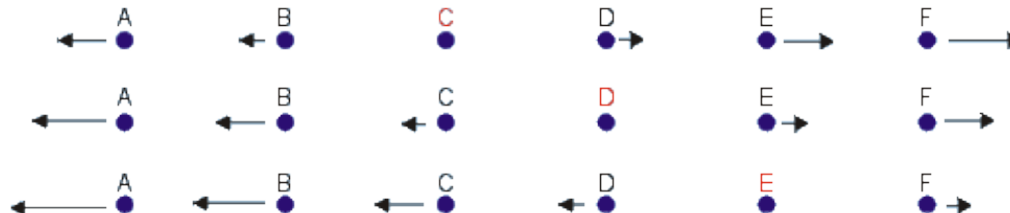
Izotropie a homogenita



vesmír izotropní kolem galaxie 1 i 2 => vesmír homogenní

úvaha:

vesmír izotropní => v A i C stejné podmínky a v C i D stejné podmínky =>
=> stejné podmínky i v A a D



Modely vesmíru

- historické představy
- Newtonův mechanický model

Newtonův model vesmíru

vesmír je nekonečný, rovnoměrně vyplněný hvězdami, které nekonají žádný systematický pohyb => **homogenní, izotropní** – v prostoru i čase!

hezké ale!!!

vady Newtonova modelu = ***kosmologické paradoxy***:

- **gravitační paradox** - výsledné gravitační pole nekonečného počtu kosmických objektů => gravitační síly se vykompenzují, ale potenciály $\rightarrow \infty$

řešení: prázdný vesmír

- **fotometrický paradox – Olbersův, Keplerův ...** - když je hvězd nekonečně mnoho, proč nevyplní oblohu?

řešení: - hvězdy „nežijí“, nezáří nekonečně dlouho

- vesmír není nekonečný v prostoru i čase; světlo ze stejně vzdálených míst k nám „putuje“ určitou dobu=> ze vzdálenějších oblastí světlo nedolétlo

- vesmír se rozpíná => kosmologický červený posuv záření; snížení intenzity záření



Nejjednodušším důkazem vývoje a časových změn vesmíru je tma v noci.

Modely vesmíru

- historické představy
- Newtonův mechanický model
- **standardní model** – model Λ CDM, Lambda-CDM (Lambda-Cold Dark Matter), Big Bang theory – po úpravách akceptován většinou astronomů

Standardní model

do poč. 20. st. – vesmír statický a věčný

1916 **Albert Einstein**: OTR

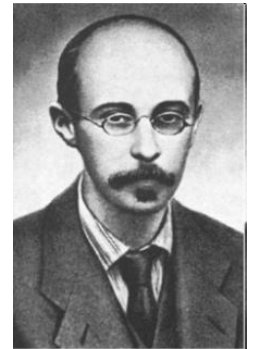
- rovnice obecné relativity $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$
- matematický popis faktu, že hmota kolem sebe zakřivuje prostor a čas
- $\kappa = 8\pi G/c^4$ pro slabá pole Einsteinovy rovnice -> Newtonův gravitační zákon
- aby byl vesmír statický, přidal kosmologickou konstantu Λ

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}.$$

1922 **Alexandr Fridman** - řešení rovnic OTR (včetně Λ) popisujících vývoj vesmíru v čase => vesmír není statický, ale dynamický!

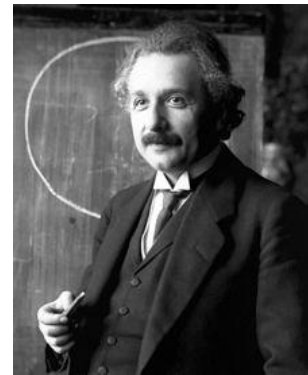


1927 **Georges Lemaître** - nezávislé potvrzení Fridmanových výpočtů (potvrzením objev rozpínání vesmíru)



1929 **Edwin Hubble** – objev vzdalování se galaxií, rozpínání vesmíru

1931 **Albert Einstein** – kosmologická konstanta = největší omyl života (později kosm. konstanta rehabilitována)



Modely vesmíru

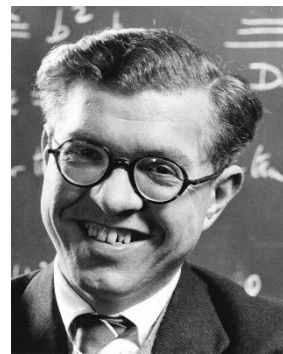
- historické představy
 - Newtonův mechanický model
 - **standardní model** – model Λ CDM, Lambda-CDM (Lambda-Cold Dark Matter), Big Bang theory – po úpravách akceptován většinou astronomů
- X
- **model kvazistacionárního vesmíru** (Steady State theory) – Bondi, Gold, Hoyle (1948) - vesmír plochý, nekonečně velký, nekonečně starý, homogenní a izotropní v čase i prostoru;
pro udržení hustoty při rozpínání povoluje tvorbu hmoty



Sir Hermann Bondi



Thomas Gold

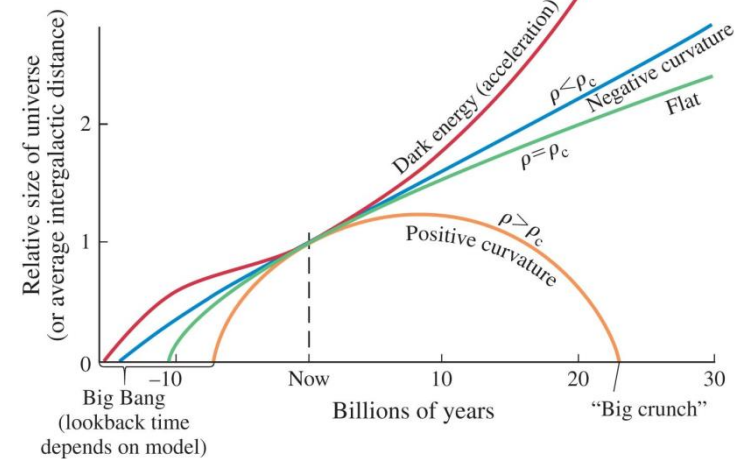
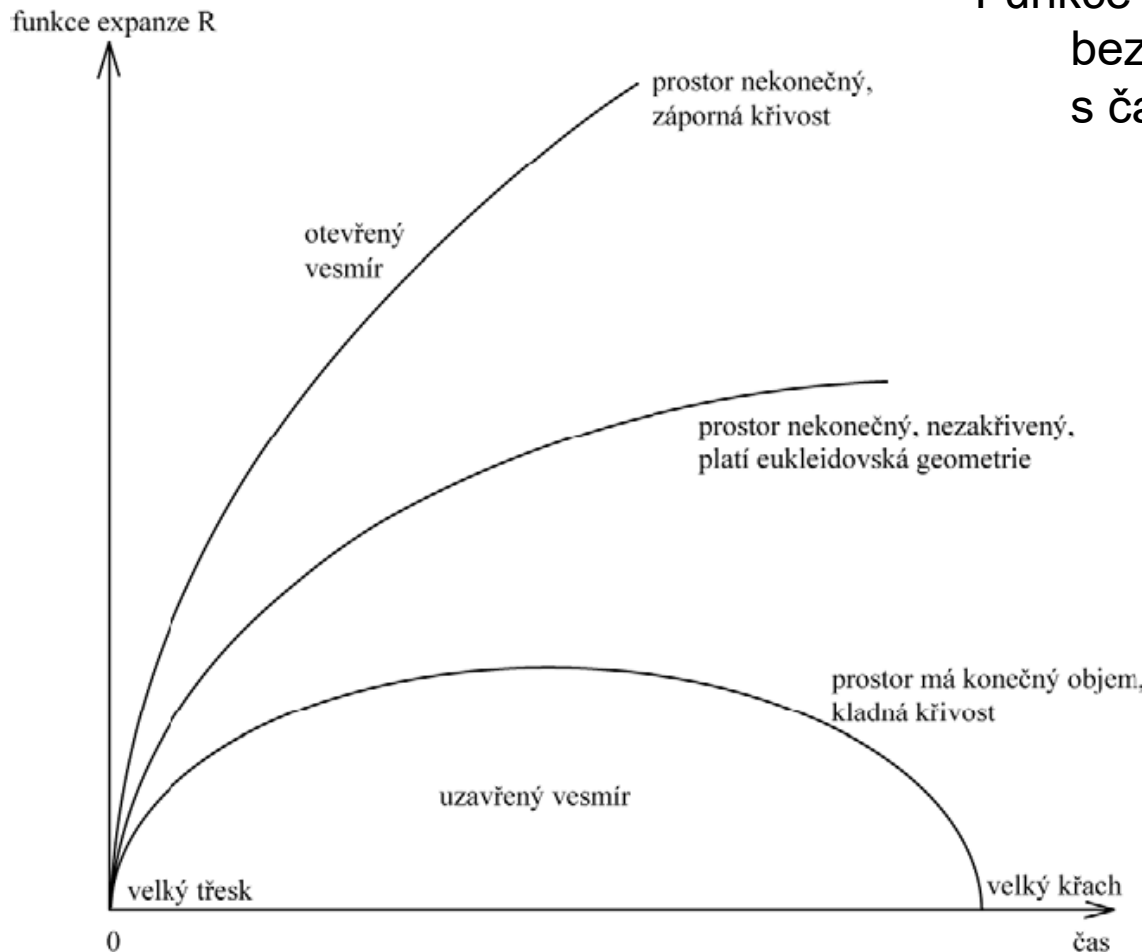


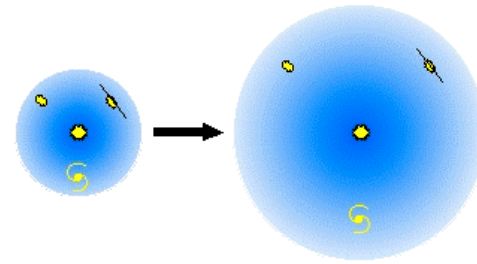
Sir Fred Hoyle

Fridmanovy modely

v počátečních fázích se vesmír rozpíná, expanze vesmíru probíhá buď stále nebo se může změnit ve smršťování

Funkce expanze (škálovací faktor) R :
bezrozměrné číslo (udává, jak se s časem mění vzdálenosti ve vesmíru)





model rozpínání:

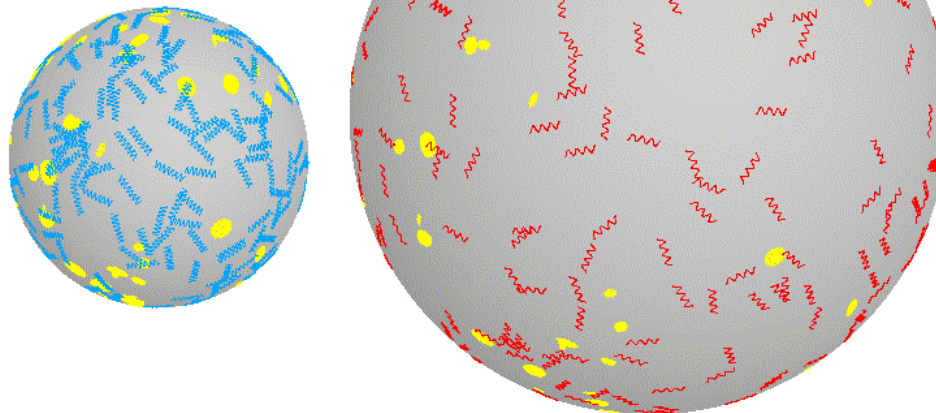
2D - velká gumová blána (balónek) s tečkami (tečky=kupy galaxií) a sítí

- při rozpínání se roztahuje síť, ale tečky neputují napříč sítí

3D – bublanina s rozinkami

matematicky –Hubbleův-Lemaîtreův vztah $v \sim r$

Expanding Balloon Analogy
Photons move and redshift
Galaxies spread apart but
stay the same size



Hubbleův-Lemaîtreův vztah a kosmologický princip

kosmologický princip => pozorovatel by měl vidět stejné rozložení rychlostí ostatních galaxií nezávisle na místě, kde se nachází

matematickým důsledkem kosmologického principu – **Hubbleův-Lemaîtreův vztah** (1927-9):

Relativní rychlost libovolných dvou galaxií je úměrná vzdálenosti mezi nimi.

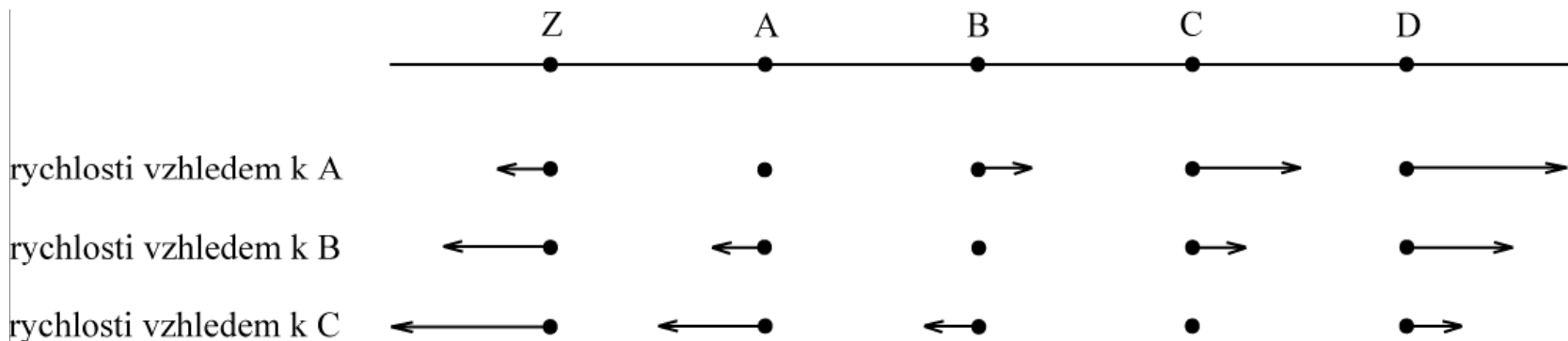
$v = Hr$ – potvrzením správnosti kosmologického principu

dvojí směr:

Hubble - zjištění $v=H.r$ -> nepřímé potvrzení správnosti kosmologického principu => různé části vesmíru se neliší => platí kosmologický princip

a obráceně

kosmologický princip správný => vztah úměrnosti mezi vzdáleností a rychlostí galaxií => z měření Dopplerova posuvu určíme vzdálenost dalekých objektů



Hubbleova konstanta $\text{km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$ $[\text{s}^{-1}]$

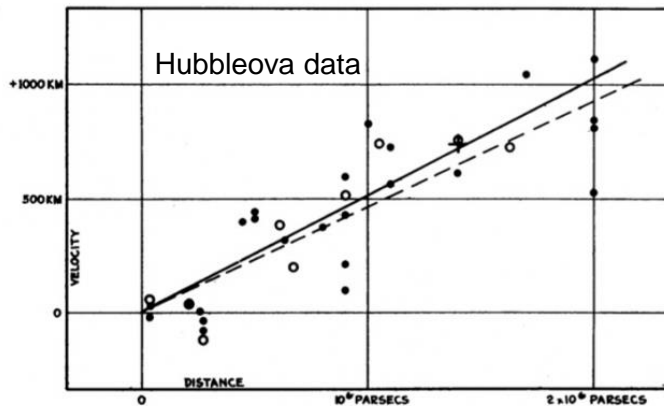
- udává o kolik se zvětší rychlost vzdalování (v km/s), při přechodu k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (1 Mpc).

Hubbleova konstanta není konstantní!

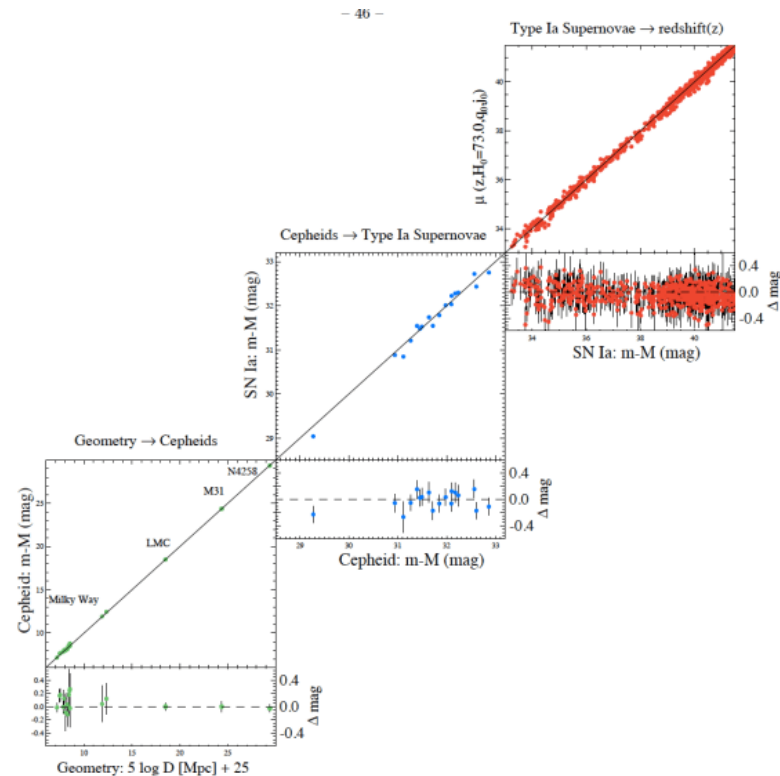
mění se s časem

proč?

protože se s časem mění rychlost rozpínání



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.



Současné hodnoty Hubbleovy konstanty:

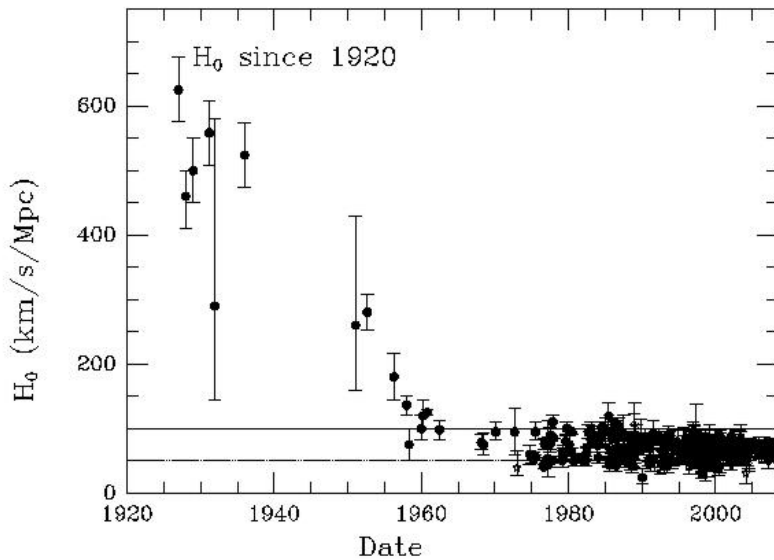
$H_0 = 74.03 \pm 1.42$ (km/s)/Mpc (Riess et al, 2019), ale ostatní projekty nižší hodnoty

WMAP 69.32 ± 0.80 , Planck 67.74 ± 0.46 a SDSS 67.6 ± 0.7 (vše (km/s)/Mpc)

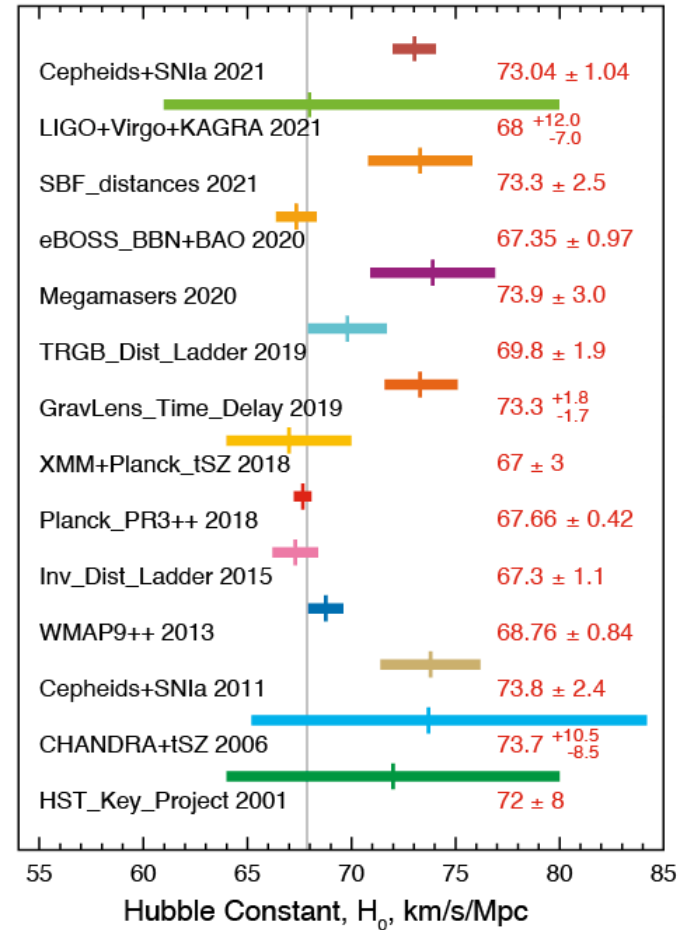
rozpor dosud neobjasněn!

Jak starý je vesmír?

Odhad pomocí Hubbleovy konstanty
(jenže dnes rozptyl hodnot 9.4 ± 2.1 %)



Počáteční úvaha: rozpínající se vesmír
=> rychlost rozpínání ovlivněna
jedinou silou - gravitací => prázdný
vesmír se rozpíná konstantní rychlostí
=> odhad stáří vesmíru

$$t \approx \frac{1}{H}$$


LAMBDA - January 2022

reálný vesmír: menší stáří v dů-
sledku brzdění rozpínání gravitační
silou => pro standardní kosmologický
model doba existence vesmíru

$$t \approx \frac{2}{3} \frac{1}{H}$$

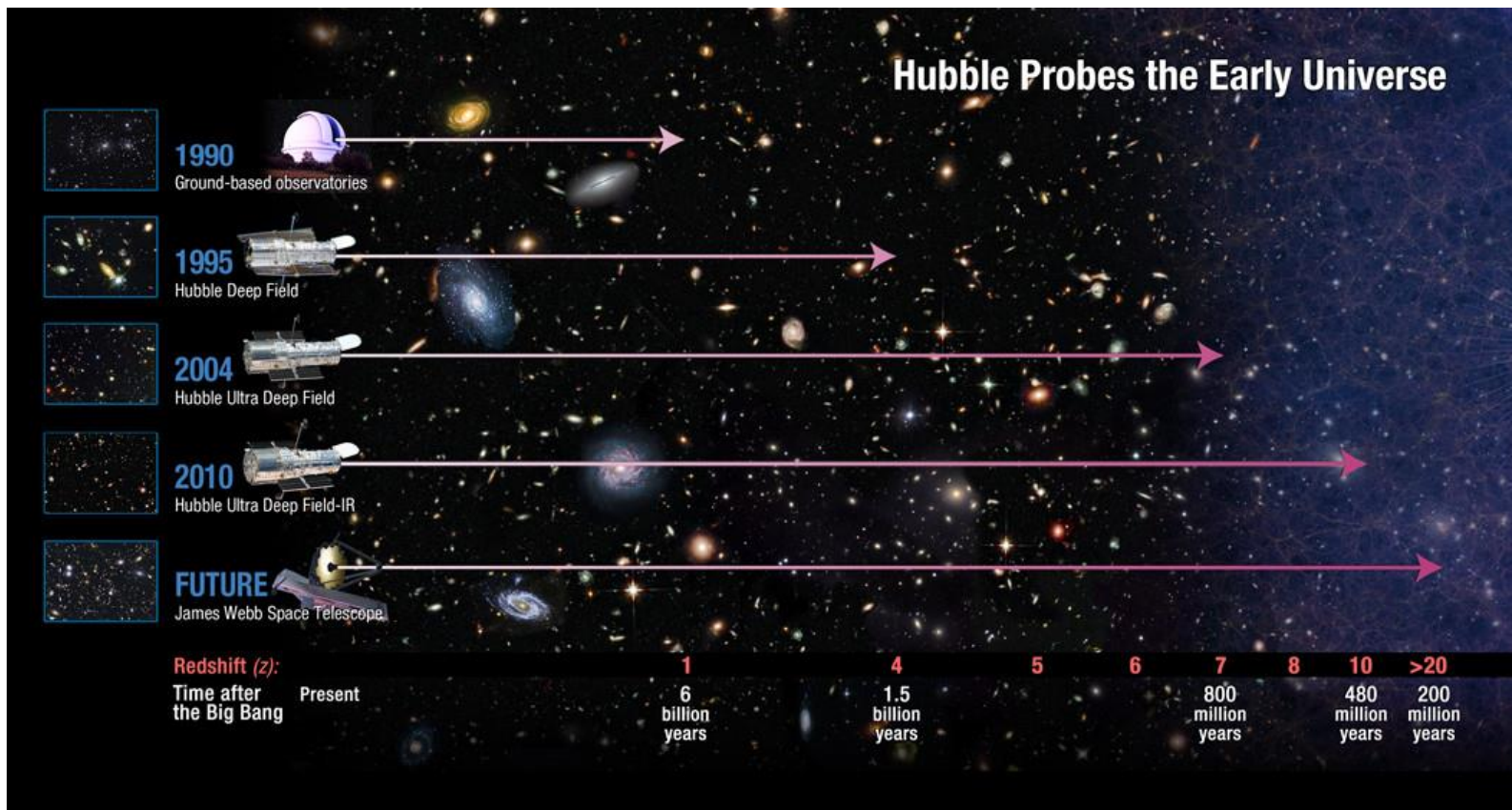
X

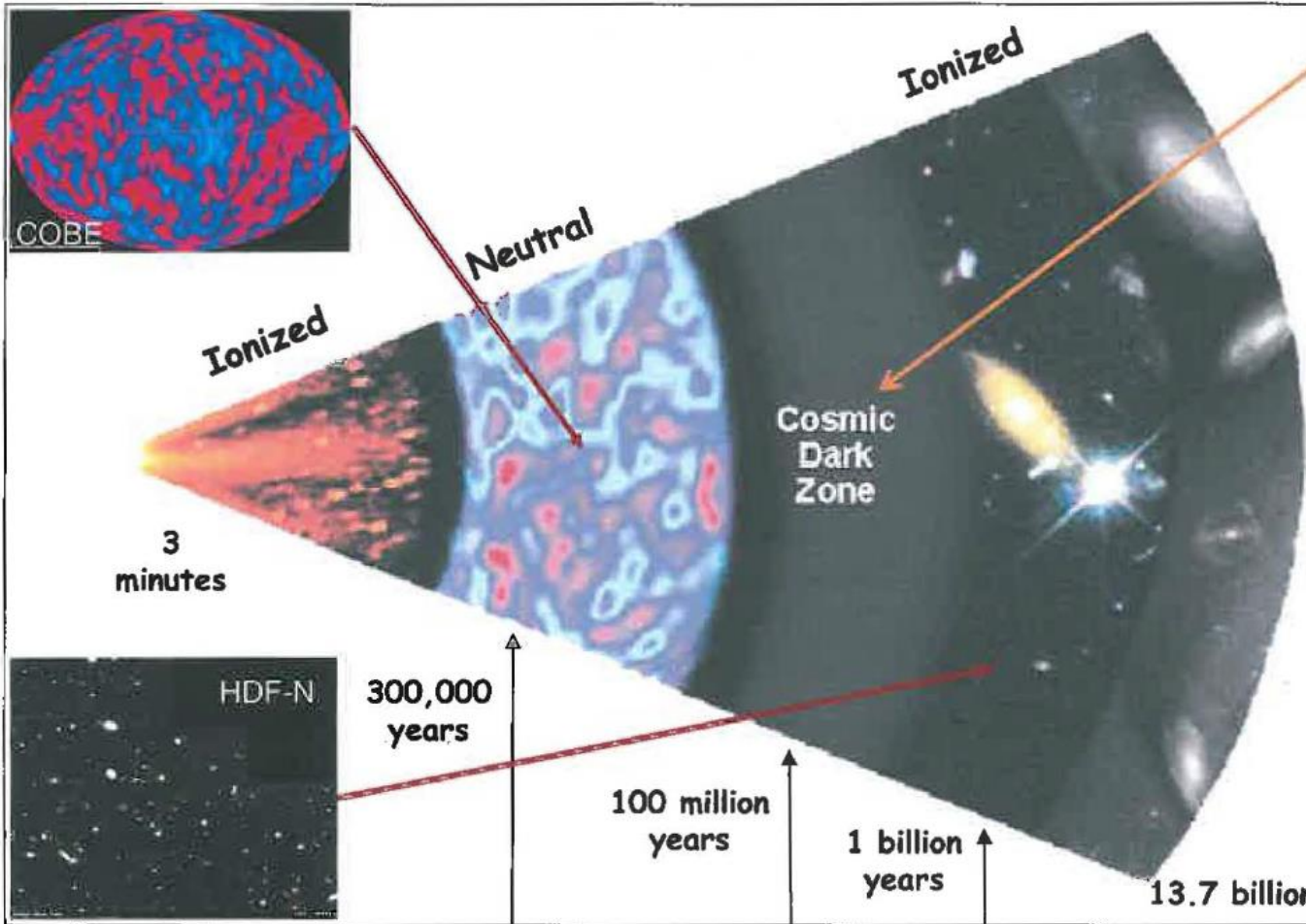
Jak starý je vesmír?

$(13.80 \pm 0.02) \times 10^9$ let (družice Planck 2018)

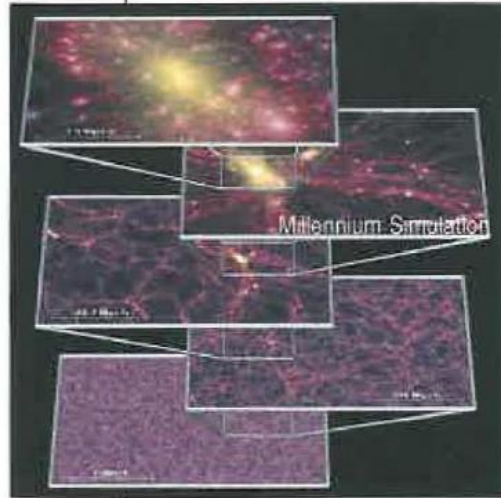
Lze to nějak ověřit?

dle stáří nejstarších hvězdných objektů - kulové hvězdokupy,
někteří bílí trpaslíci – stáří alespoň 12 mld let; měření WMAP, Planck aj.





First Light (After the Big Bang)
 First luminous objects, proto-galaxies, supernovae, black holes



300,000 years

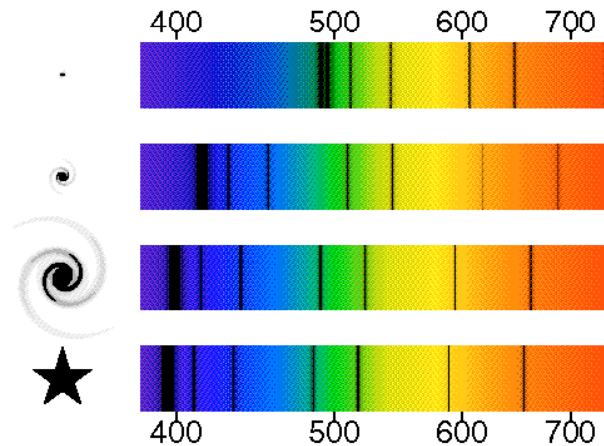
100 million years

1 billion years

13.7 billion years

Rozpínání vesmíru

1912 - Vesto Slipher: ve spektrech 36 z 41 tzv. „spirálních mlhovin“
červený posuv spektrálních čar



červený posuv

$$z + 1 = \lambda / \lambda_0,$$

λ_0 - původní vlnová délka,
 λ - současná vlnová délka



Interpretace červeného posunu sp. čar:

- u blízkých objektů - pomocí Dopplerova jevu - důsledek vzdalování objektů
- vzdálené galaxie – jde o **kosmologický rudý posuv** v důsledku rozpínání vesmíru velkých měřítek (popsáno Hubbleovým vztahem)

Kosmologický červený posuv fotonu - poskytuje informaci, kolikrát se zvětšil vesmír za dobu putování fotonu prostorem

(rozpínání vesmíru nemá vliv na vzdálenosti v gravitačně vázaných objektech => v důsledku rozpínání vesmíru se nemění velikosti atomů či molekul, vzdálenost Země – Slunce nebo vzdálenosti hvězd v Galaxii)

Rozpínání vesmíru – tam a zpět

1922 – Fridman - modely

1924 – Hubble – vzdálenost galaxií

1927 – Lemaître – modely

1929 – Hubbleův- Lemaîtreův vztah

1931 – Lemaître – expanze vesmíru => obrácením toku času -> nulové rozměry vesmíru, „prapůvodní atom“

1948 - **George Gamow** & asistent Ralph Alpher & „do počtu“ Hans Bethe

(α , β , γ) Alpher, R.A.; Bethe, H.; Gamow, G. (1948). "The Origin of Chemical Elements,, - vyšel 1.4.

1948 – **Fred Hoyle** et al. – teorie kvazistacionárního vesmíru (Steady State Theory)

1949 – Hoyle - termín *velký třesk* - teorii VT nepodporoval, termín posměšný

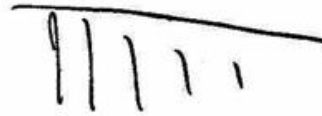
počátek rozpínání vesmíru – okamžik **velkého třesku** = singularita, rozběhl se čas; => vesmír v minulosti - menší, hustší a teplejší

velký třesk neznamená výbuch! - vesmír se nikam nerozpíná, nese si svůj prostor s sebou; začal se rozpínat sám prostor, v tu chvíli začal plynout čas

Problém – v pol. 20. st. neexistovaly důkazy, nebylo bráno vážně;

dnes ale důkazy máme!





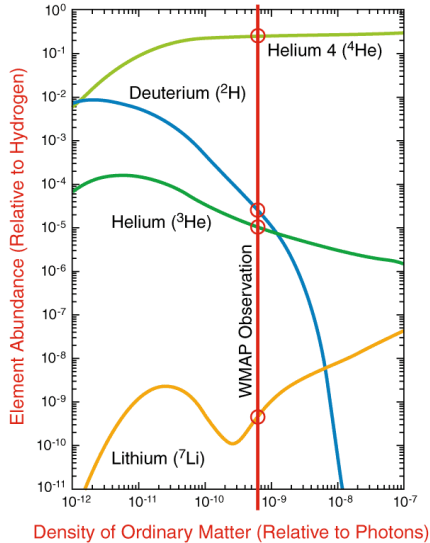
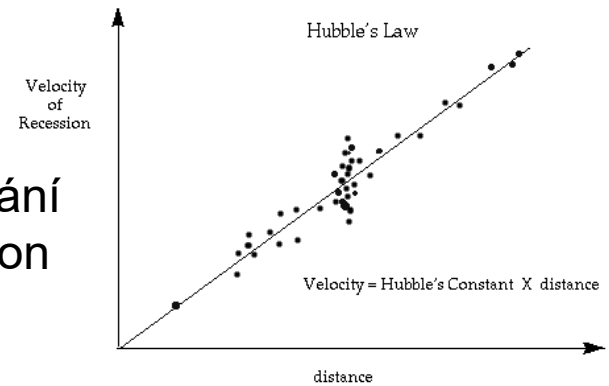
VIDÍM, SLEČNO, ŽE NEZNÁTE MOJI TEORII VELKÉHO
TŘESKU PLESKU!



the BIG BANG THEORY

Důkazy teorie velkého třesku

- rozpínání vesmíru - 1929 - Edwin Hubble - pozorování vzdalování galaxií, Hubbleův-Lemaîtreův zákon



- zastoupení lehkých prvků H, He, Li ve vesmíru
teorie velkého třesku předpovídá, že tyto prvky vznikly z protonů a neutronů v prvních minutách po VT

- mikrovlnné kosmické záření na pozadí (CMB, CMBR Cosmic microwave background radiation) - raný vesmír byl velmi horký, CMB je pozůstatek žáru po VT 1965 - objev **reliktního záření**
- vývoj a rozložení galaxií
vzdálenější galaxie, kvasary a uskupení mají jiné vlastnosti než blízké (jsou starší)

Reliktní záření

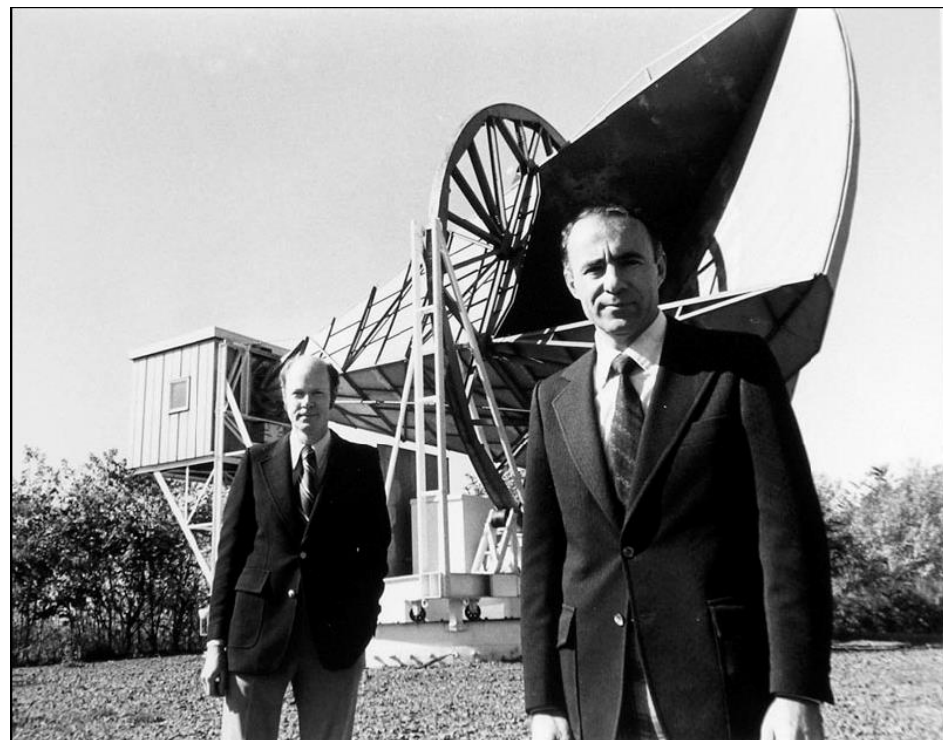
1948 - G. Gamow, R. Alpher, R. Herman - v rámci svého horkého modelu vesmíru předpověď existence všesměrového mikrovlnného záření (odhady teplot různé $T=5-50$ K) - žádný pokus o pozorovací důkaz ☹

1965 A. Penzias, R. W. Wilson – objev reliktního záření

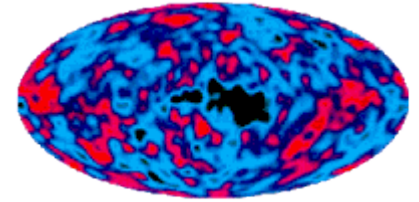
teoretické zdůvodnění – Dicke, Roll, Wilkinson, Peebles v témže čísle ApJ 142

Reliktní záření – obsahuje v sobě 30x více energie, než bylo kdy vyzářeno z hvězd

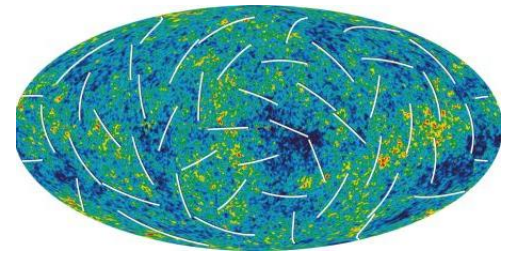
v současnosti: záření AČT o $T = 2,725$ K



Reliktní záření z kosmu

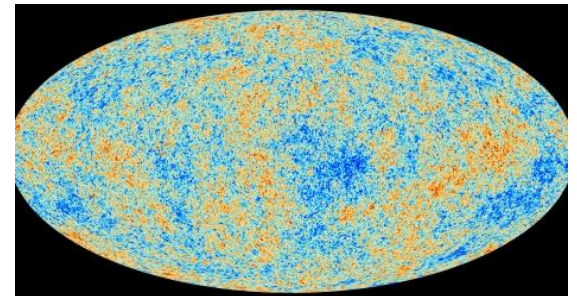


1989 - **COBE** (Cosmic Background Explorer) – za 8 min 1. výsledek:
reliktní záření = záření AČT o teplotě 2,73 K s přesností 10^{-3}
objevy: anisotropie reliktního záření + fluktuace teploty záření
odchylky od průměru 10^{-5}
rozlišovací schopnost: 7°
Smoot & Mather - Nobelova cena (2006)



2001-2010 - **WMAP** (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)
studium anisotropie, fluktuací a polarizace reliktního záření;
úhlové rozlišení: $0,3^\circ$; teplotní citlivost $20 \mu\text{K}$
rozbor spektra fluktuací reliktního záření

2009-2013 - **Planck** – evropský projekt
úhlové rozlišení: $0,17^\circ$; teplotní citlivost $2 \mu\text{K}$



Geometrie vesmíru

Dominující síla – gravitace – dalekého dosahu, nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti, nelze ničím odstínit => kosmologické modely vesmíru založené na teorii gravitace – zejména OTR - tělesa se pohybují po nejpřímější možné dráze v prostoročasu zakřiveném působením hmotných těles

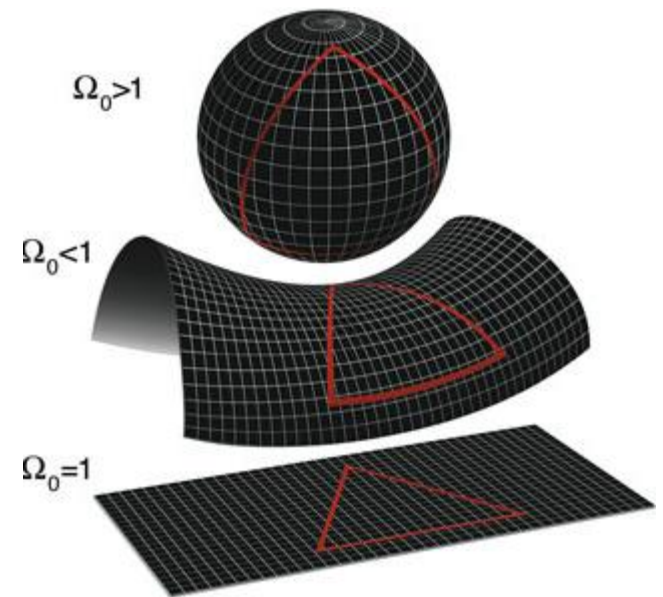
platí kosmologický princip => geometrii vesmíru

lze popsat pomocí *křivosti prostoru* W_0

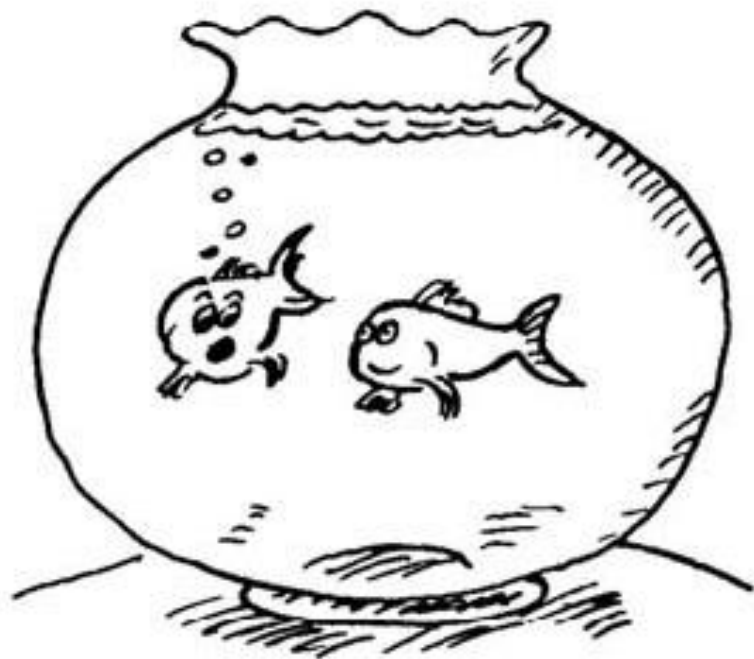
$W_0 > 0$ => 3D prostor má vlastnosti obdobné vlastnostem povrchu koule: (konečný objem, bez hranic, součet vnitřních úhlů v trojúhelníku $> 180^\circ$)

$W_0 = 0$ nekonečný a nezakřivený prostor, platí euklidovská geometrie

$W_0 < 0$ 2D analogie v sedlové ploše (prostor nekonečný, součet úhlů v trojúhelníku $< 180^\circ$)



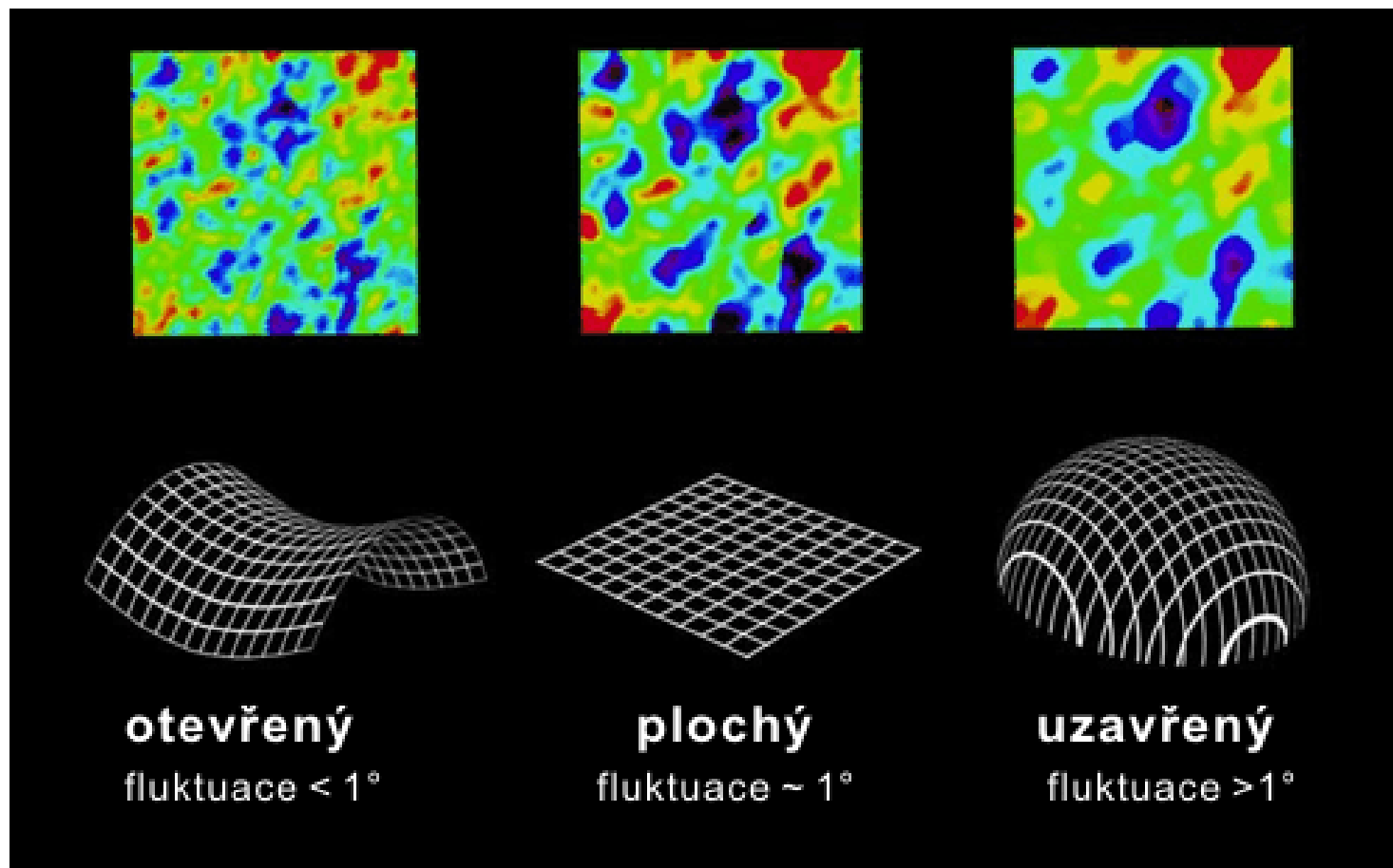
(Ω – poměr celkové střední hustoty vesmíru ke kritické hustotě)



MĚLAS PRAVDU, SVĚT
JE ZAKŘIVĚNÝ!

Ověření geometrie vesmíru

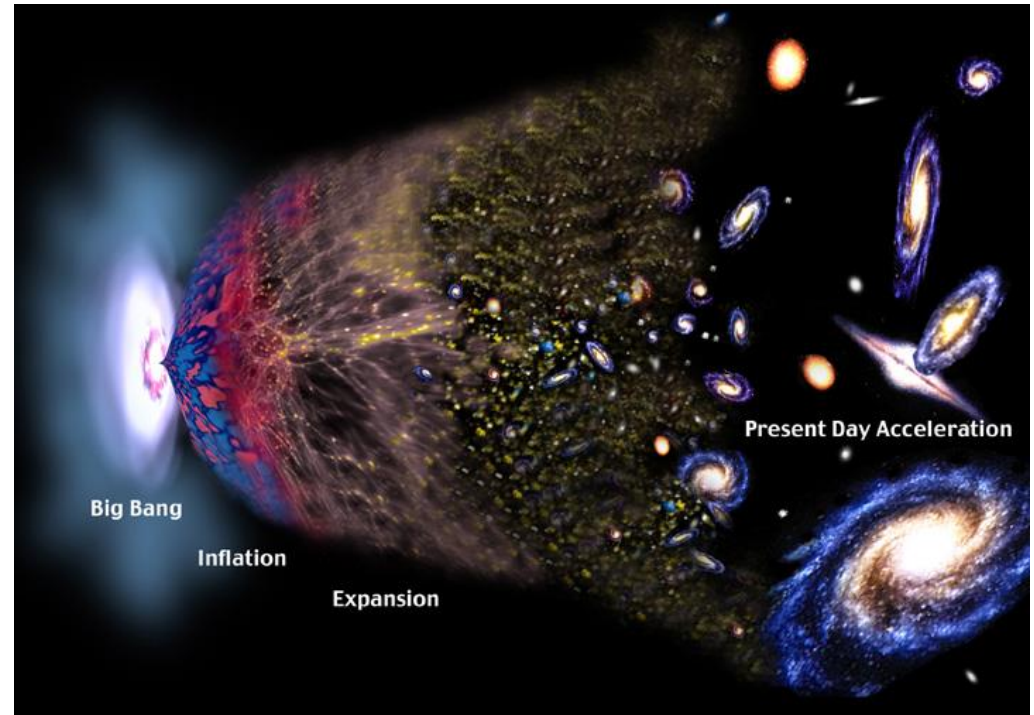
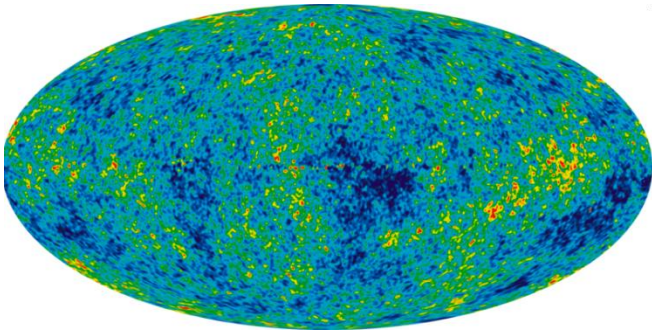
z družicových měření mikrovlnného záření pozadí



V jakém vesmíru žijeme?

Lze to zjistit?

V principu ano.



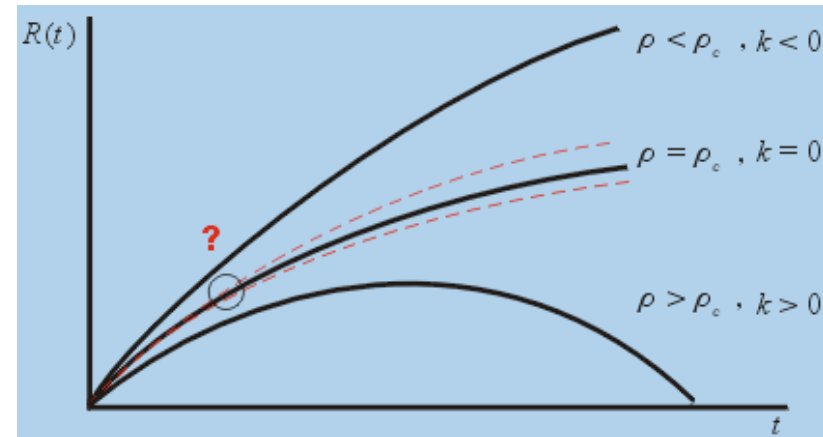
1. dle vzdáleností kup galaxií
x problém určování přesných vzdáleností kup galaxií
2. podle křivosti vesmíru – lze měřit z fluktuací teploty reliktního záření
3. podle hustoty vesmíru
uzavřený vesmír => střední hustota látky > *kritická* (odpovídá 1 atomu vodíku asi v jednom dm^3 prostoru)
x ve vesmíru registrujeme našimi přístroji jen několik procent hmoty
(paradox skryté hmoty - znám už od 30. let 20. století)

Problémy standardního modelu

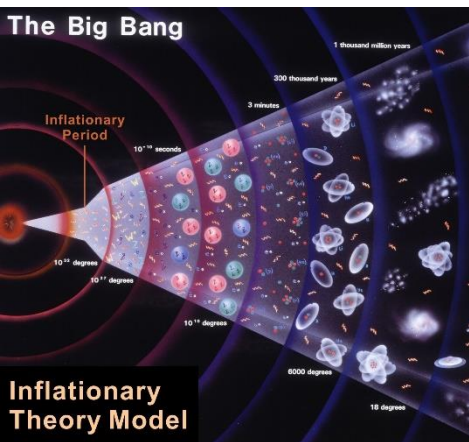
1. *problém počáteční singularity* – nekonečná teplota singularity;
2. *problém plochosti vesmíru* – geometrie vesmíru závisí na jeho hustotě
současná \approx kritická \Rightarrow plochý vesmír
nastavení v minulosti mimořádně
přesné – je to možné?
navíc – běžná hmota (částice, atomy, záření)
jen 5 %, temná/skrytá hmota
a temná energie

3. *problém horizontu* – vesmír o velikosti R
se rozpínal – $R \sim t^{1/2}$, ale horizont
informace $R_H \sim t$

Dvě velmi vzdálené oblasti A a B, které pozorujeme v různých směrech, by spolu nemohly v minulosti nikdy komunikovat, pokud by neexistovala inflační fáze.
Signál z konce Velkého třesku je dnes v mikrovlnném oboru.



Problémy standardního modelu - řešení

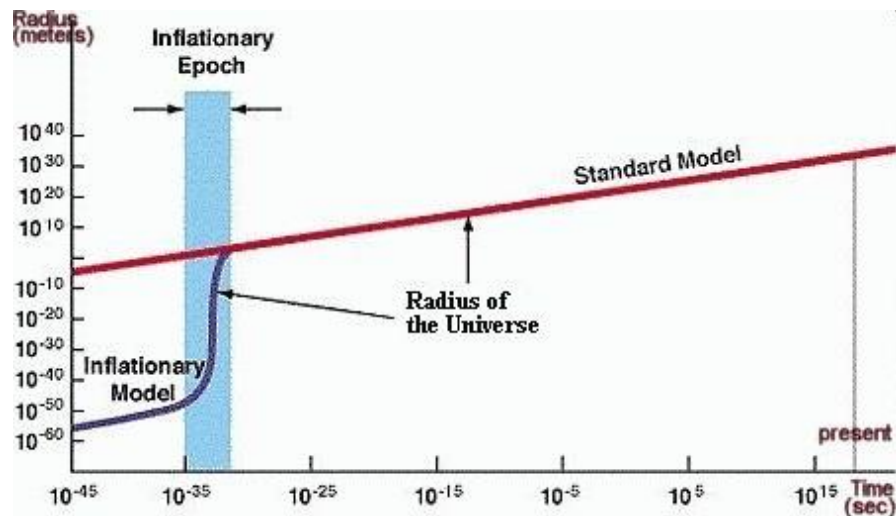


teorie inflace

1980 Alan Guth; 1981 Katsuhiko Sato;
později rozpracovali Andrej Linde a Paul Steinhardt

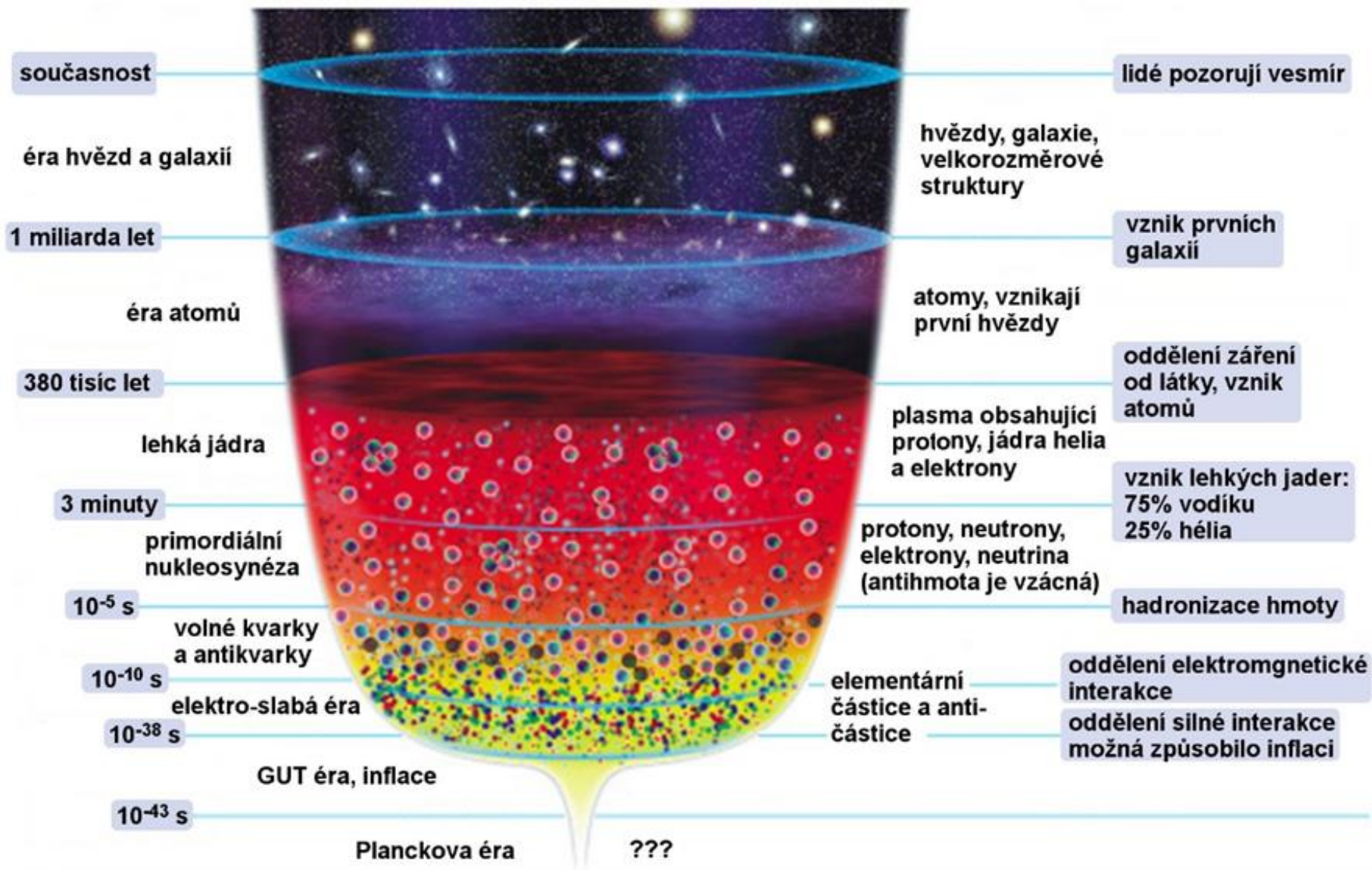


v čase cca $10^{-38} - 10^{-32}$ s po VT: inflační epocha - překotné rozepnutí/nafouknutí vesmíru (**inflace vesmíru**) – zvětšení objemu vesmíru o nejméně 78 řádů!



čas od počátku

významné události



současnost

lidé pozorují vesmír

éra hvězd a galaxií

hvězdy, galaxie,
velkorozměrové
struktury

1 miliarda let

vznik prvních
galaxií

éra atomů

atomy, vznikají
první hvězdy

380 tisíc let

oddělení záření
od látky, vznik
atomů

lehká jádra

plasma obsahující
protony, jádra helia
a elektrony

3 minuty

vznik lehkých jader:
75% vodíku
25% hélia

primordiální
nukleosynéza

protony, neutrony,
elektrony, neutrina
(antihmota je vzácná)

10^{-5} s

hadronizace hmoty

volné kvarky
a antikvarky

10^{-10} s

elementární
částice a anti-
částice

oddělení elektromagnetické
interakce

elektro-slabá éra

10^{-38} s

oddělení silné interakce
možná způsobilo inflaci

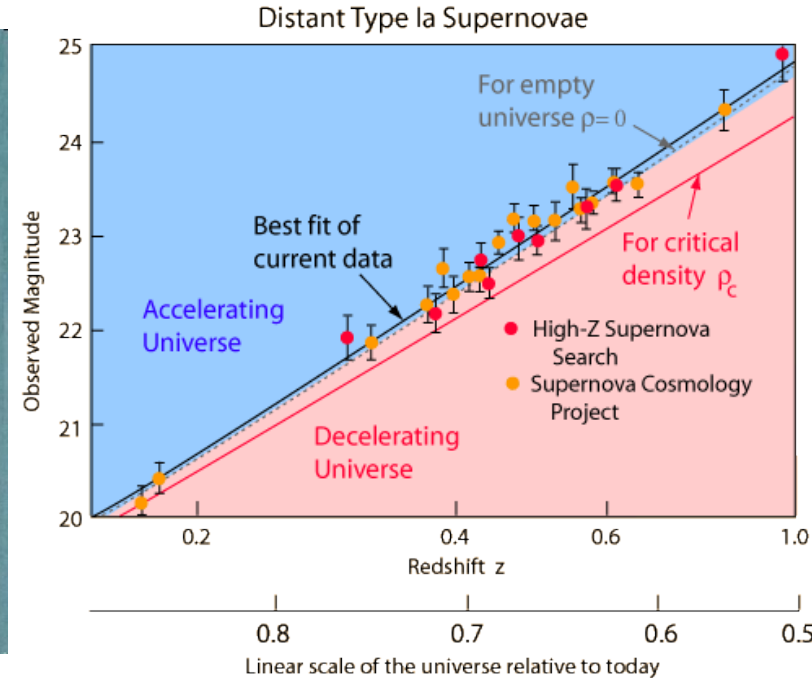
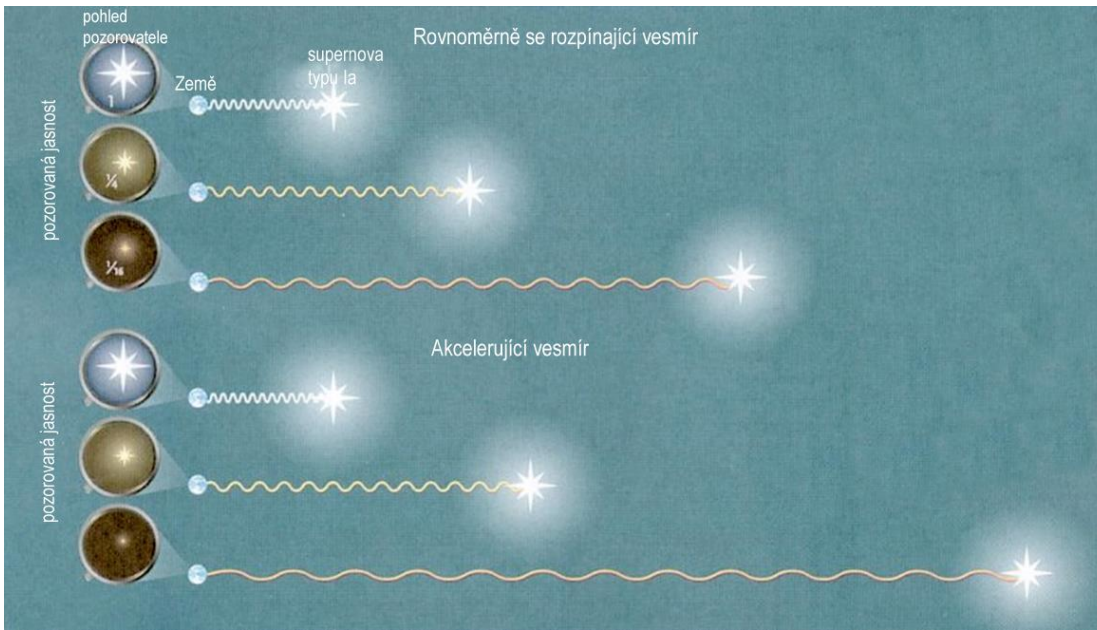
GUT éra, inflace

10^{-43} s

Planckova éra

???

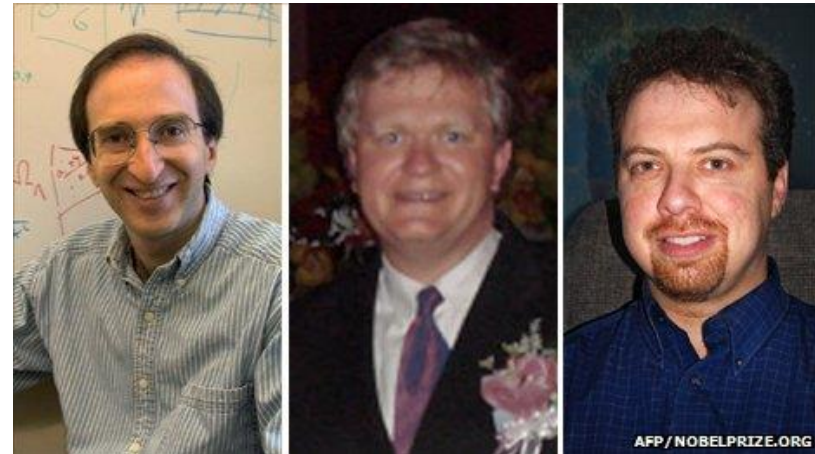
Akcelerující vesmír



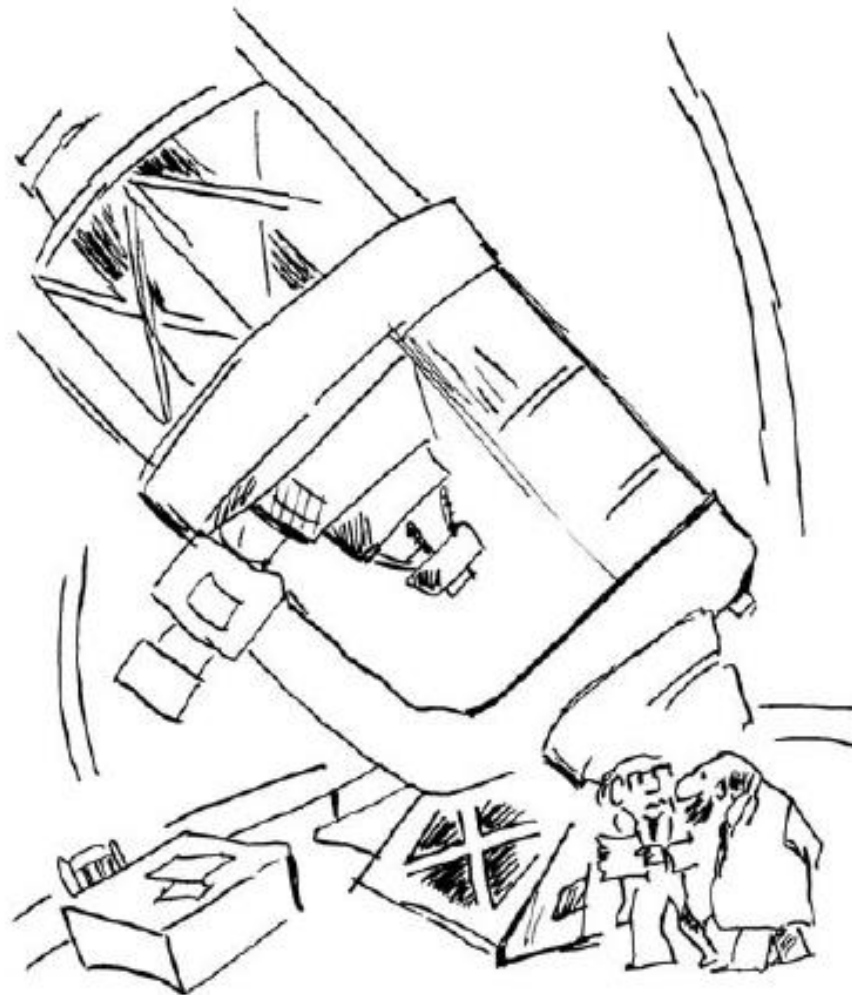
1998 - dva týmy – ze studia supernov typu Ia rozpínání vesmíru zrychluje

Nobelova cena za fyziku 2011

2014, 2015 – různé typy SN Ia => zrychlení rozpínání je menší



Saul Perlmutter, Adam Riess, Brian Schmidt



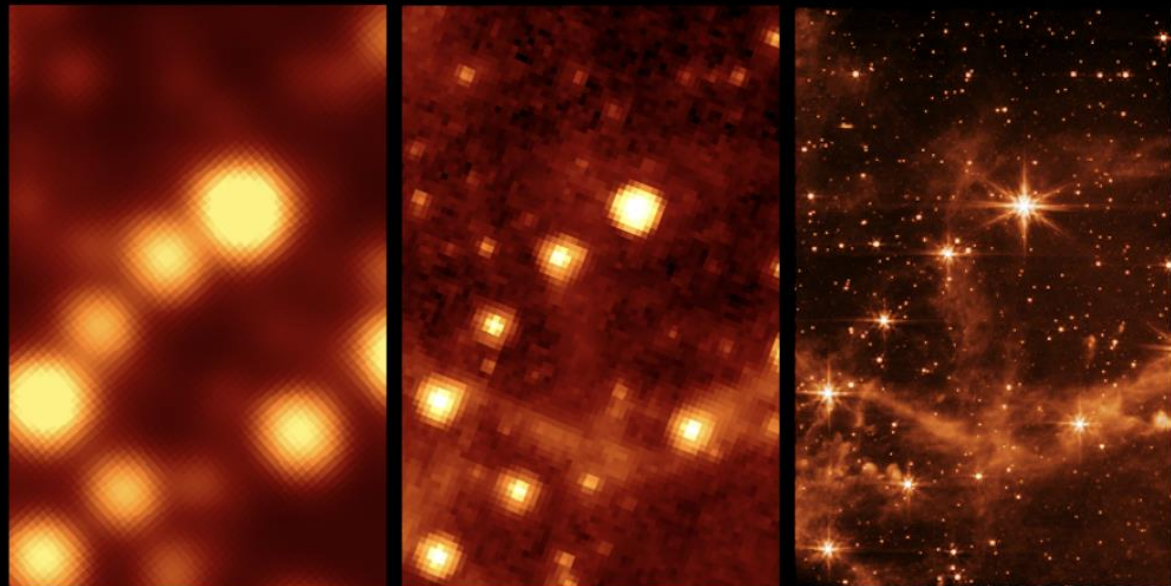
JEDINÉ, CO VE VESMÍRU NEEXPANDUJE,
JE MŮJ FLAT!

(Podle *Mercury* May-June 1981, 88.)

Červený posun – přehlídkové projekty

od 1977 různé projekty na měření rudého posuvu galaxií a kvasarů - CfA Redshift Survey, 2MASS (Two Micron All-Sky Survey), 2dF (6dF) Galaxy Redshift Survey, Sloan Digital Sky Survey (SDSS), DEEP2 Redshift Survey, DES (Dark Energy Survey) + GOODS: Great Observatories Origins Deep Survey – 5 observatoří v kosmu (Spitzer, HST, Chandra, Herschel, XMM-Newton) + JWST+EUCLID

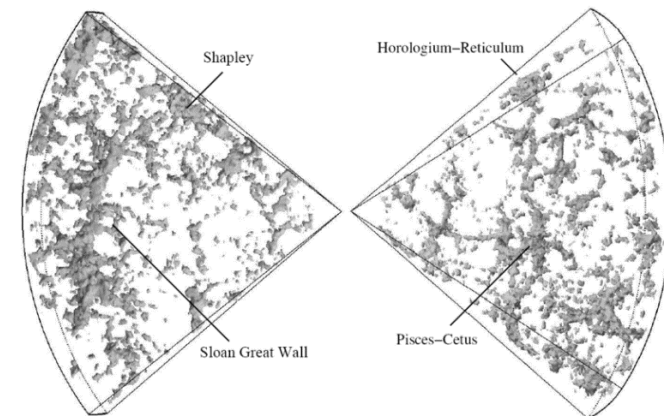
The Evolution of Infrared Space Telescopes



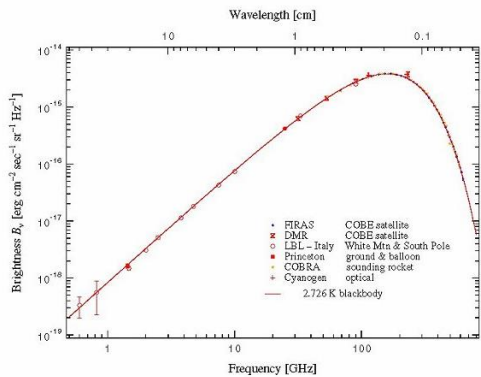
WISE W2 4.6 μm

Spitzer/IRAC 8.6 μm

JWST/MIRI 7.7 μm



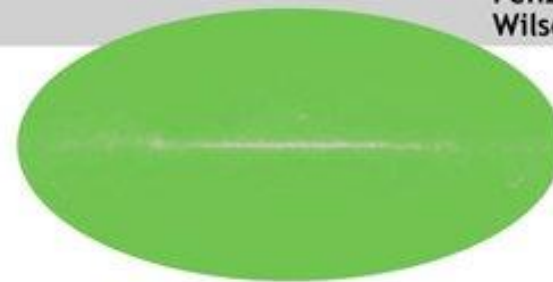
Reliktní záření a jeho fluktuace



1965



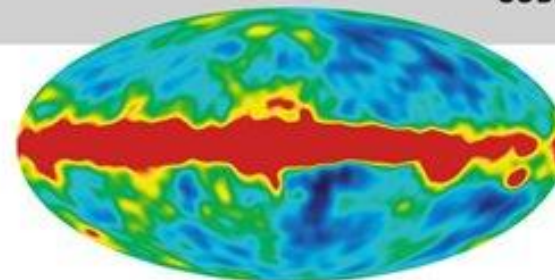
Penzias and Wilson



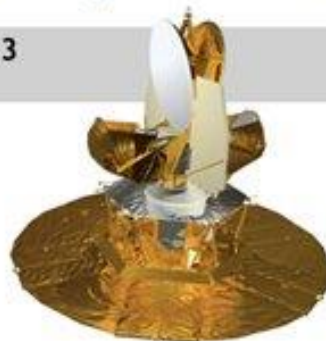
1992



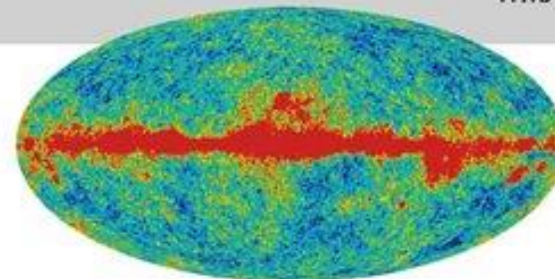
COBE



2003



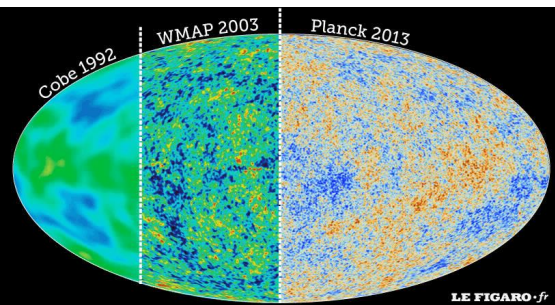
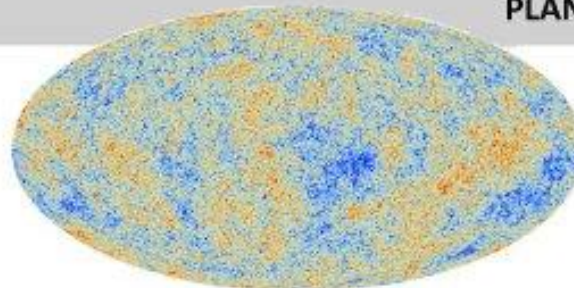
WMAP



2015



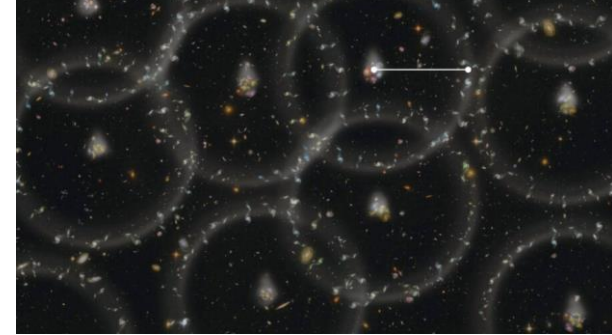
PLANCK



Baryonové akustické oscilace

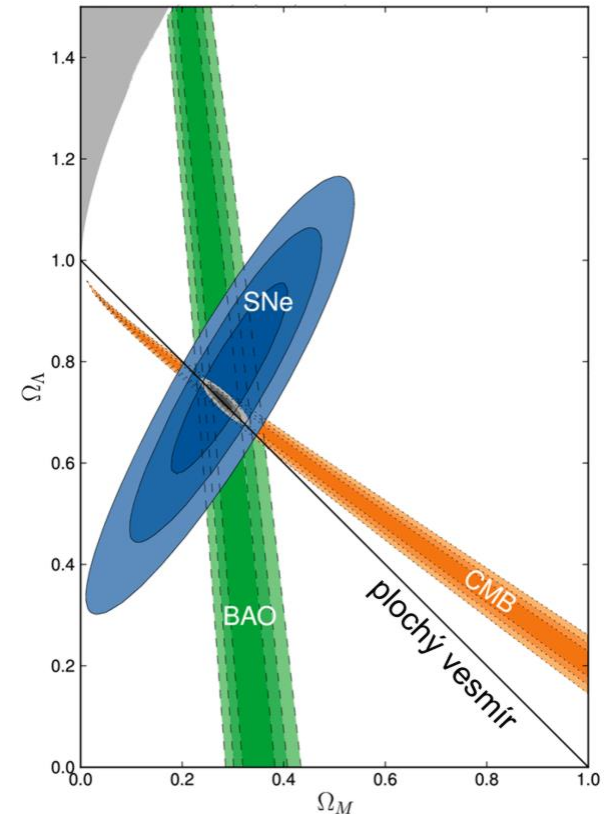
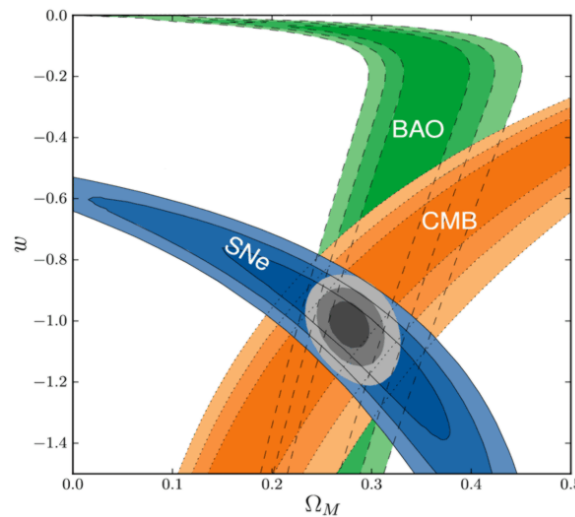
BAO (Baryonic Acoustic Oscillations)

= pravidelné periodické fluktuační v hustotě viditelné baryonické hmoty (způsobeno akustickými vlnami v raném vesmíru)
původní fluktuační v reliktním záření => velkorozměrové struktury vesmíru



BAO slouží jako "standardní pravítko" pro délkovou škálu v kosmologii
(délka ~ 490 Mly v dnešním vesmíru)

měření BAO – pomoc při pochopení podstaty skryté energie (akcelerace vesmíru) stanovením mezí kosmologických parametrů



Současný vesmír - shrnutí

- ❖ Pozorovatelný jen zlomek (5 %) – zbytek
- ❖ Temná (skrytá) hmota a energie – zatím nevíme jejich podstatu
- ❖ Stáří vesmíru – 13.80 let, teorie velkého třesku
- ❖ Pravděpodobně je plochý
- ❖ Rozpíná se a rozpínání se zrychluje

