



# Kosmologie 1/2

**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 (časo-)prostoru, hmotu a energii v něm

užší definice - prostor mimo Zemi a její atmosféru

**kosmologie** (kosmos+logos) - nauka o vesmíru jako celku  
je to opravdu věda?

dnes moderní **věda založená na pozorování!**

**předmět kosmologie**

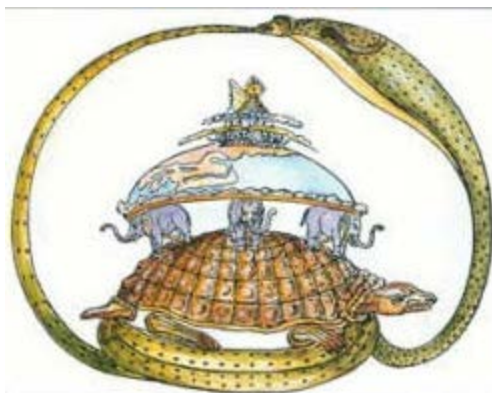
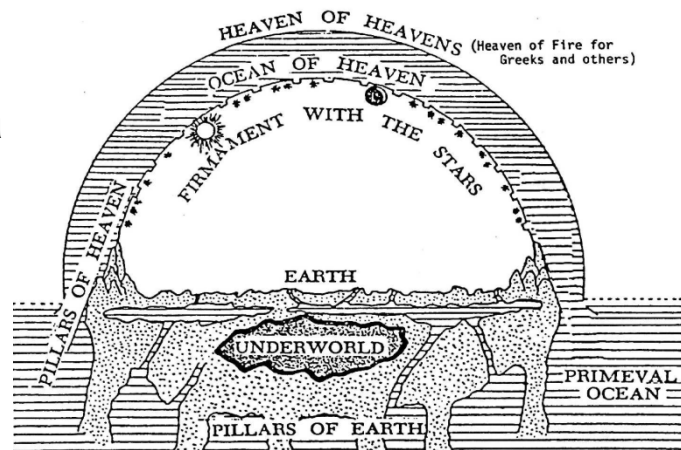
- vesmír jako celek, jeho vlastnosti, stavba, vývoj
- zvláštnost – známe jen malou část -> extrapolace na většinu

**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

# 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,

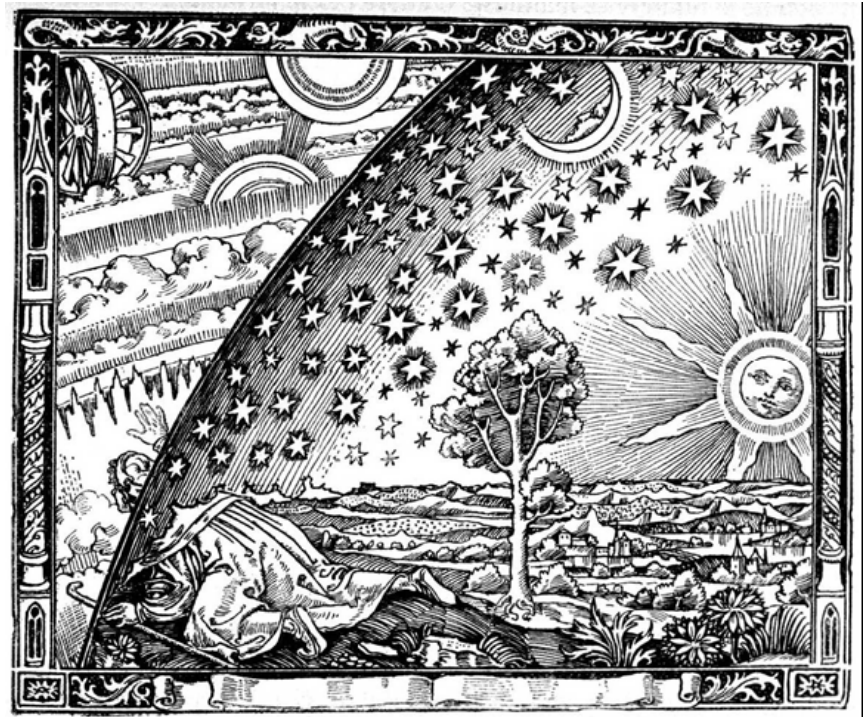
kompletní; vnější hranice = sféra stálic

Aristotelovská fyzika – 2 fyziky

- kulatá Země tvořena 4 živly (pozemské matérie)

- nad sférou Měsíce – nebeská materie (éter)

střed světa?

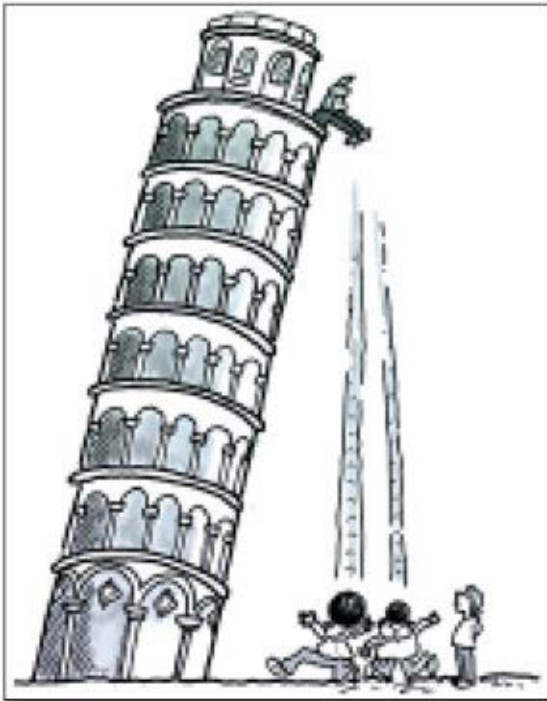


Notoricky známý obrázek od C. Flammariona až z konce 19. století

## 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)



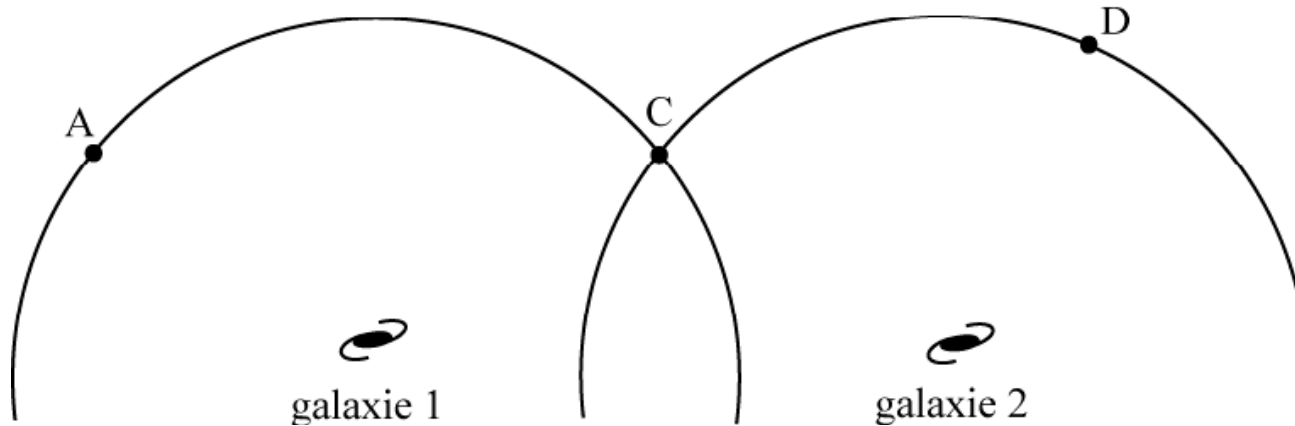
okolní prostor nehomogenní – záleží na měřítku !

**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  $2 \times 4$  úhlové minuty je vyplněn jen vzdálenými galaxiemi (snímek pořízen v infračerveném oboru na observatoři ESO v La Silla, Chile).

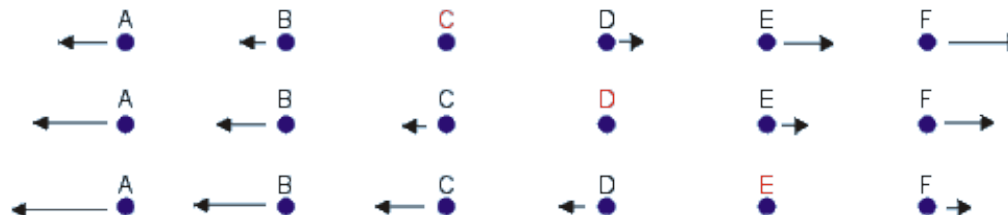
# Izotropie a homogenita



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

- **standardní model** – model  $\Lambda$ CDM, Lambda-CDM (Lambda-Cold Dark Matter), Big Bang theory – po úpravách akceptován většinou astronomů

X

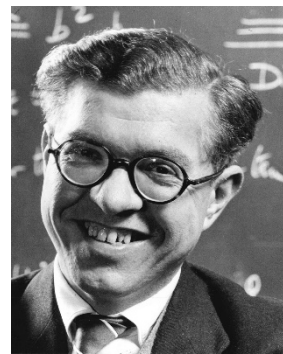
- **model kvazistacionárního vesmíru** (Steady State theory) – Bondi, Gold, Hoyle (1948) - vesmír plochý, nekonečně velký, nekonečně starý, homogenní a izotropní v čase i prostoru;  
pro udržení hustoty při rozpínání povoluje tvorbu hmoty



Sir Hermann Bondi



Thomas Gold



Sir Fred Hoyle



# 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.*

# 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
- vesmír statický => 1917 kosmologická konstanta  $\Lambda$

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

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

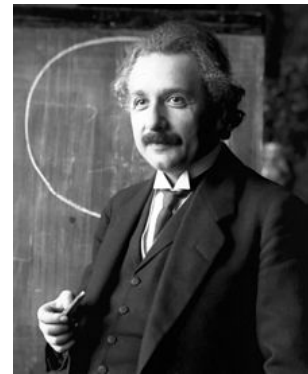


1927 **Georges Lemaître** - nezávislé potvrzení Fridmanových výpočtů (potvrzením objev rozpínání vesmíru)



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

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



# 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

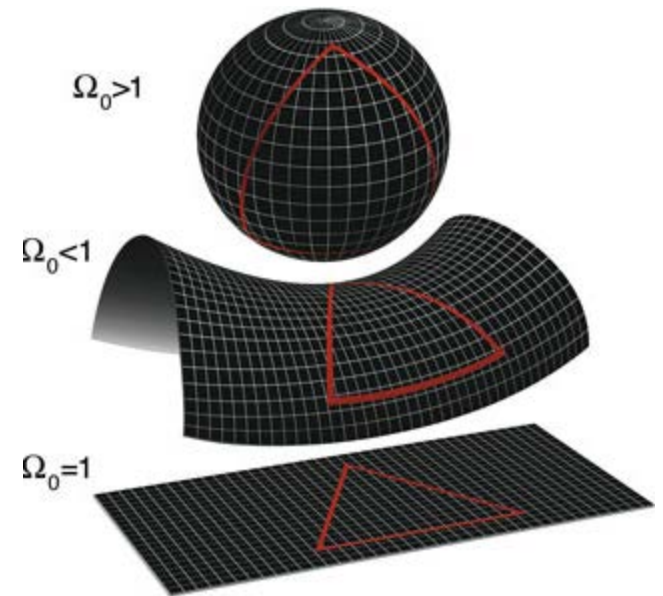
platí kosmologický princip => geometrii vesmíru

lze popsat pomocí *křivosti prostoru*  $W_0$

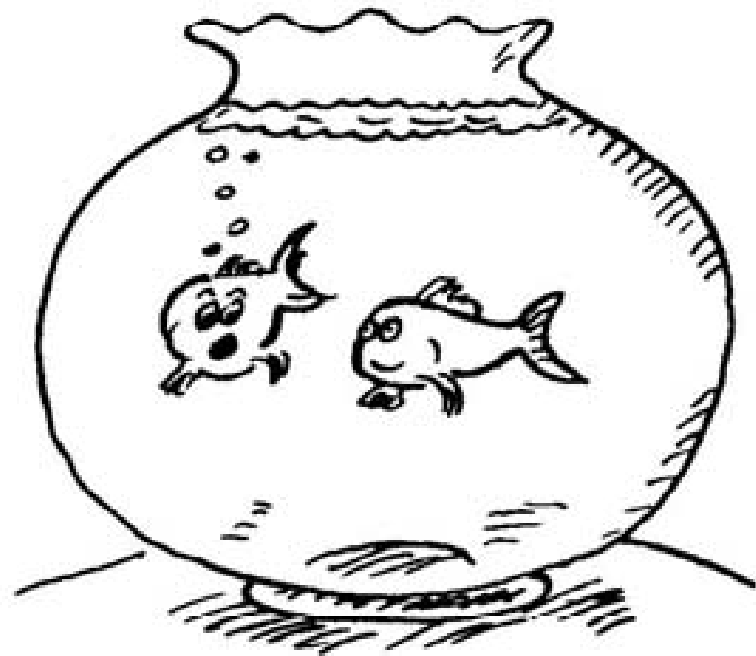
$W_0 > 0$  => 3D prostor má vlastnosti obdobné vlastnostem povrchu koule: (konečný objem, bez hranic, součet vnitřních úhlů v trojúhelníku  $> 180^\circ$ )

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

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



( $\Omega$  – poměr celkové střední hustoty vesmíru ke kritické hustotě)

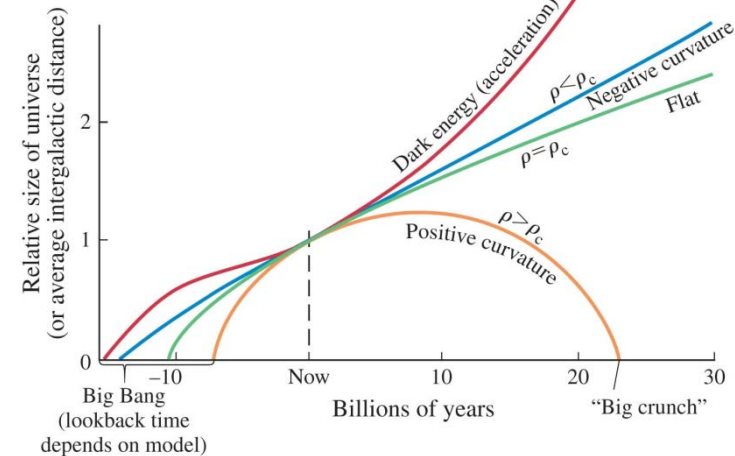
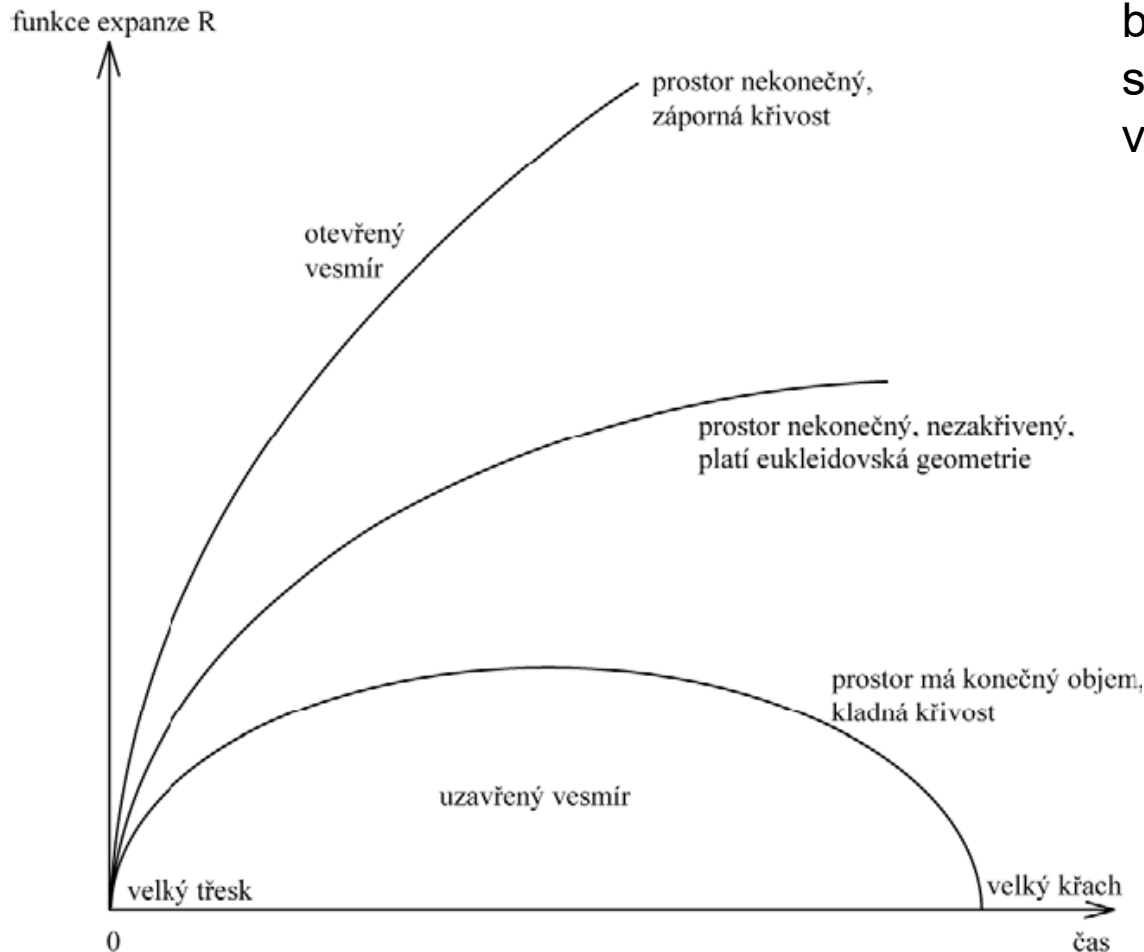


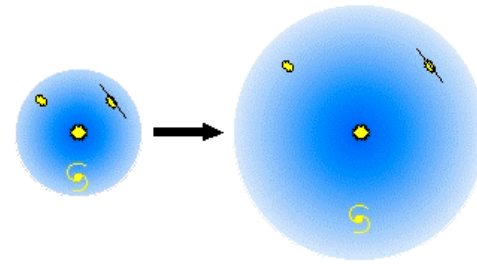
MĚLAS PRAVDU, SVĚT  
JE ZAKŘÍVENÝ!

# 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:

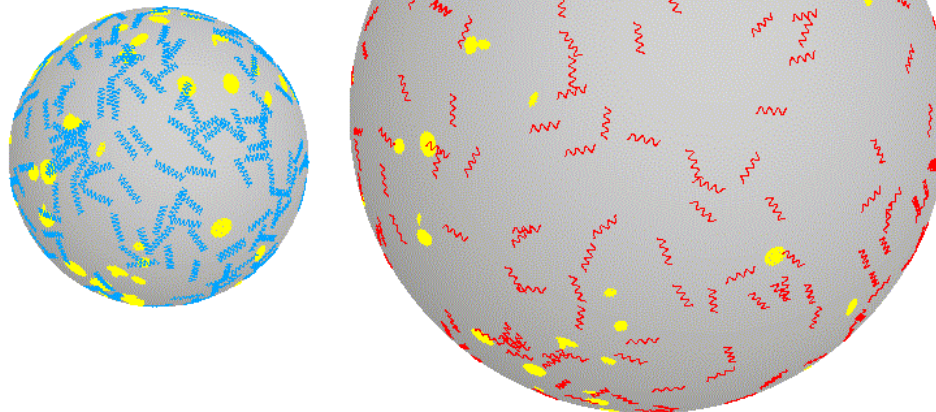
2D - velká gumová blána (balónek) s tečkami (tečky=kupy galaxií) a sítí

- 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.*

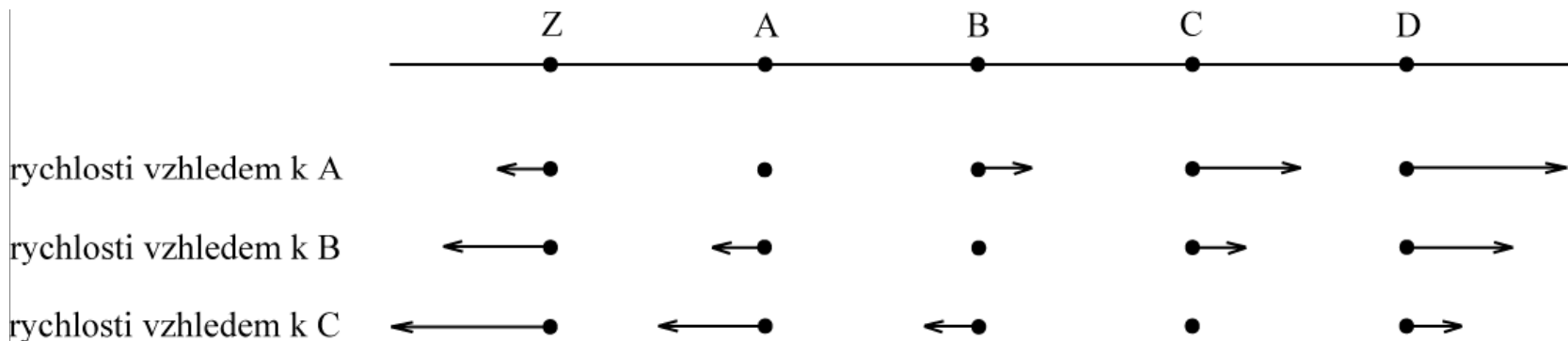
**$v = Hr$**  – potvrzením správnosti kosmologického principu

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

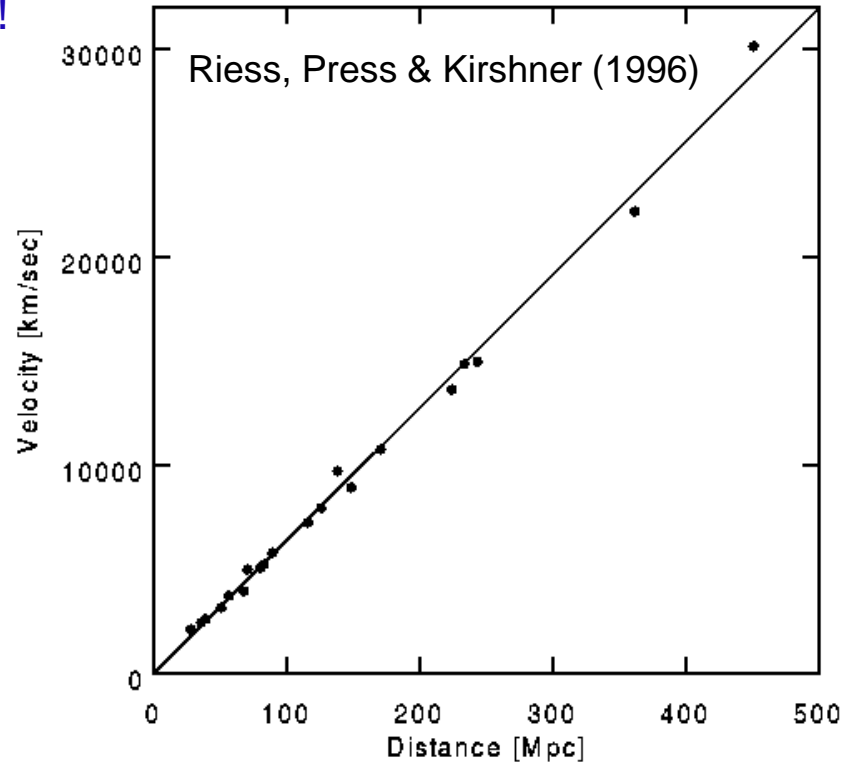
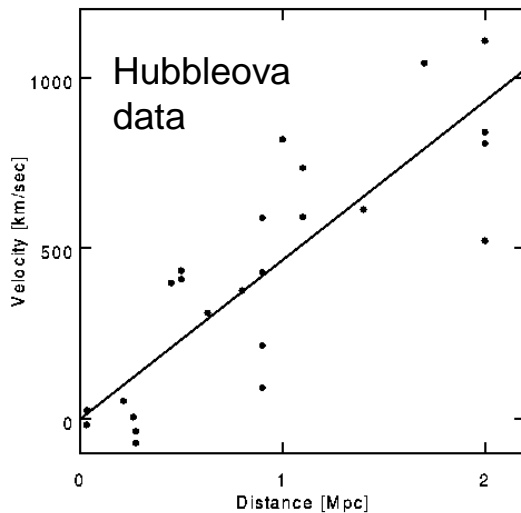
- udává o kolik se zvětší rychlost vzdalování (v  $\text{km}/\text{s}$ ), při přechodu k objektům vzdálenějším o jednotku vzdálenosti (1 Mpc).

## Hubbleova konstanta není konstantní!

mění se s časem

proč?

protože se s časem mění rychlost rozpínání



## Současné hodnoty Hubbleovy konstanty:

$H_0 = 74.03 \pm 1.42$  (km/s)/Mpc (Riess et al, 2019),

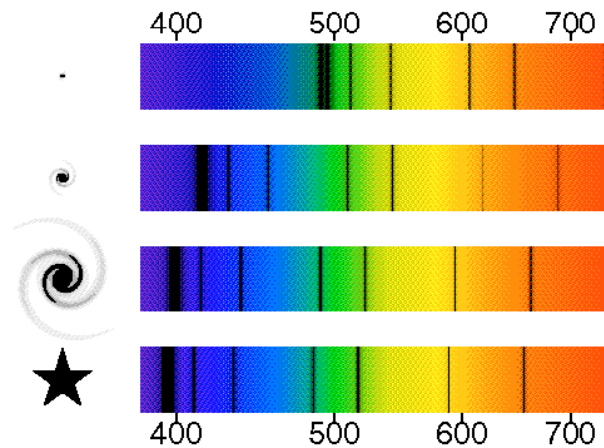
ale ostatní projekty nižší hodnoty

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

**rozpor dosud neobjasněn!**

# Rozpínání vesmíru

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



červený posuv

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

$\lambda_0$  - původní vlnová délka,

$\lambda$  - 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

( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) 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!**





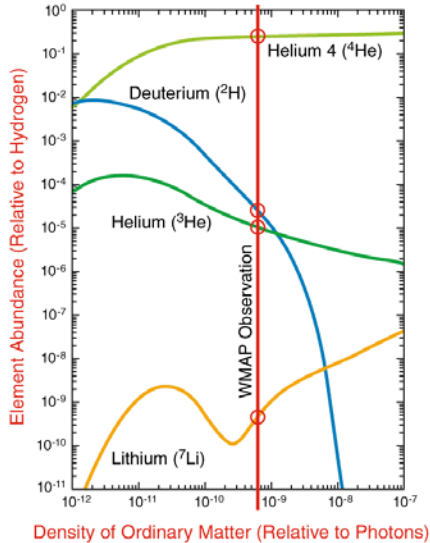
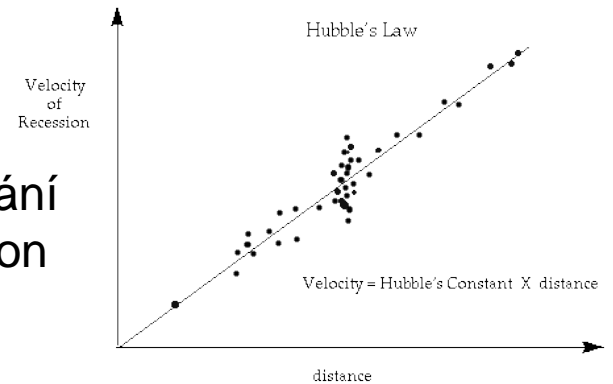
VIDÍM, SLEČNO, ŽE NEZNÁTE MOJI TEORII VELKÉHO  
TŘESKU PLESKU!



**the BIG BANG THEORY**

# Důkazy teorie velkého třesku

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



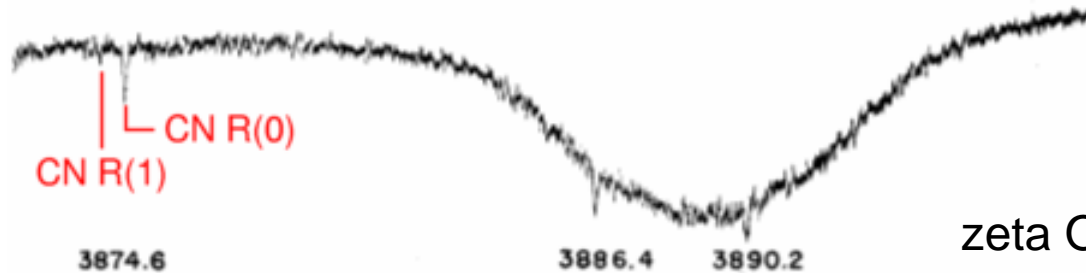
- zastoupení lehkých prvků H, He, Li ve vesmíru  
teorie velkého třesku předpovídá, že tyto prvky vznikly z protonů a neutronů v prvních minutách po VT

- 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

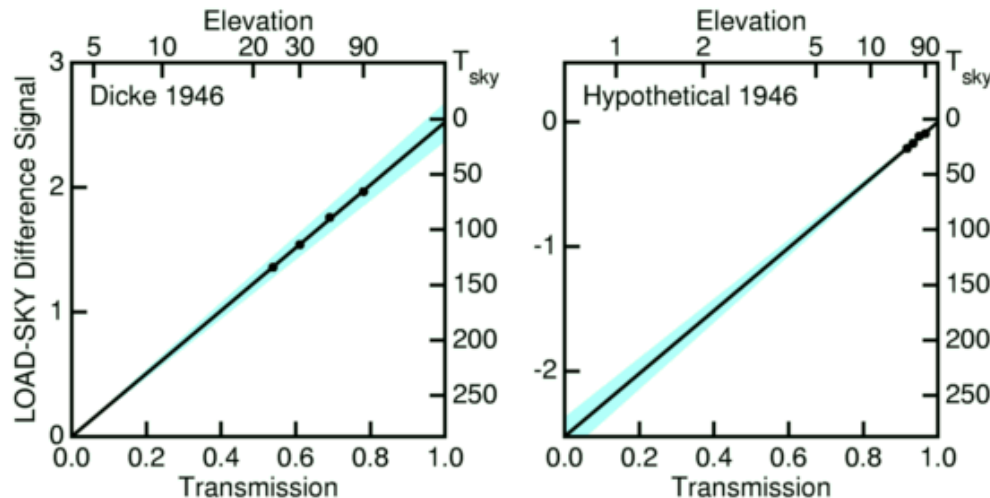
1937 T. Dunham a W. Adams – neuvědomělé pozorování reliktního záření

1941 A. McKellar – studium mezihvězdných molekul



zeta Oph v r. 1940

1946 R. Dicke – měření jasové teploty oblohy v závislosti na úhlové výšce (elevačním úhlu)



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 ☹

1957 - Tigran A. Šmaonov – změřil efektivní teplotu rádiového pozadí  $4\pm 3$ K, intenzita signálu byla nezávislou na čase a směru

poč. 60. let - nezávislé teoretické předpovědi - Zeldovič, Dicke, Doroškevič, Novikov...

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

### Vlastnosti reliktního záření

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

Koncentrace fotonů reliktního záření:

$$n_r = 4,11 \cdot 10^8 \text{ fotonů/m}^3.$$

Počet nukleonů:  $n_n = 0,22$  nukleonu/m<sup>3</sup>

→ poměr je 1:1 900 000 000!



# Reliktní záření z kosmu

1983 sovětská družice – projekt RELIKT -1, výsledky 1992

The Relikt-1 experiment 39p

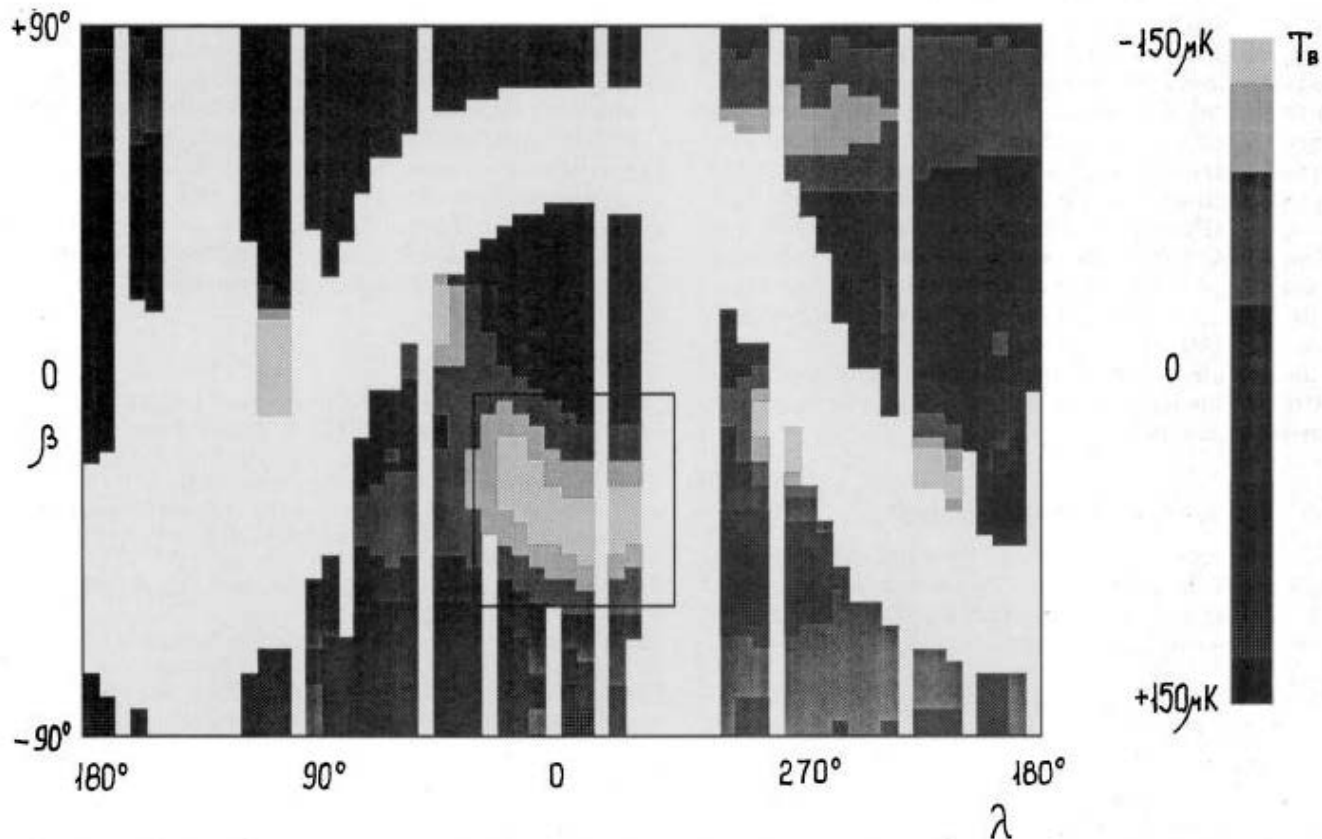
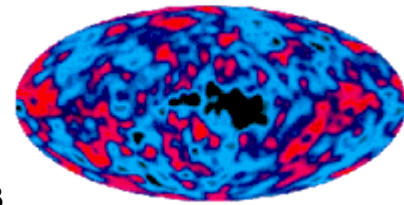


Figure 1. *Relikt-1* sky map at a frequency of 37 GHz (ecliptic coordinates). A cosmic dipole anisotropy of 3.16 mK (RA=11<sup>h</sup>17<sup>m</sup>, Dec. = -7°5', Strukov *et al.* 1987) and a dipole anisotropy due to satellite and Earth orbital velocities and offset have been subtracted from the map. The smoothing angle is  $\varphi_0 = 12^\circ$ . The region of detected signal is inside the dark rectangular area. White parts of the map have statistical weight zero and correspond to the Galactic plane and the regions with significant Moon and Earth contamination.

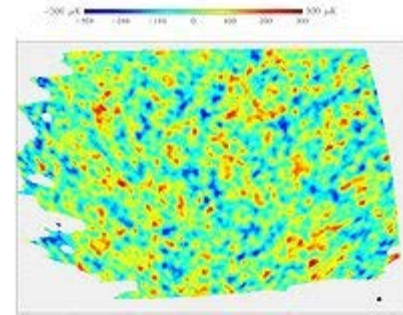


# Reliktní záření z kosmu

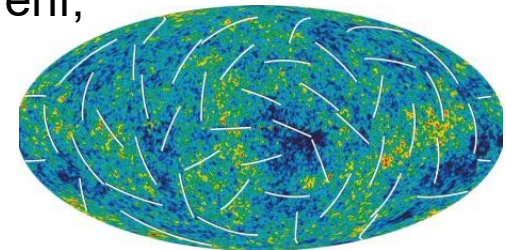
1989 - **COBE** (Cosmic Background Explorer) – za 8 min 1. výsledek:  
reliktní záření = záření AČT o teplotě 2,73 K s přesností  $10^{-3}$   
objevy: anisotropie reliktního záření + fluktuace teploty záření  
odchyly od průměru  $10^{-5}$   
rozlišovací schopnost:  $7^\circ$   
Smoot & Mather - Nobelova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



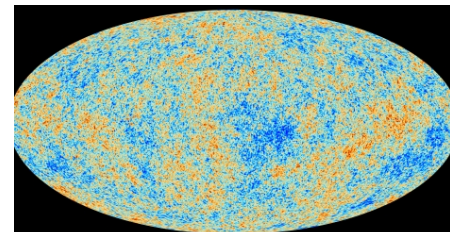
1998-2000 - **balónová měření** (BOOMERang, MAXIMA a další)  
rozlišovací schopnost: cca  $1/6^\circ$ .  
zpřesnění teploty reliktního záření a hodnoty fluktuací  
( $70 \mu\text{K}$ ) => podpora inflační teorie a plochosti našeho vesmíru

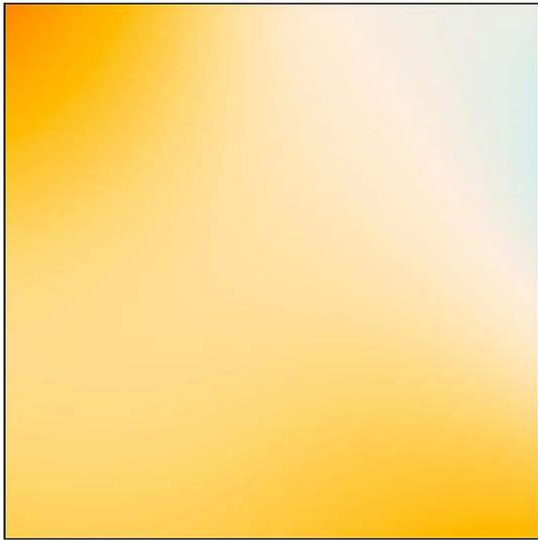
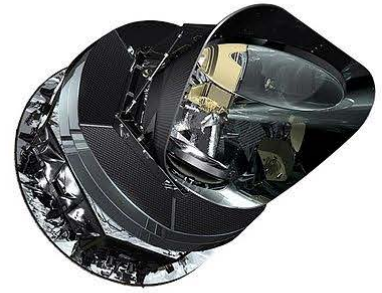


2001-2010 - **WMAP** (Wilkinsin Microwave Anisotropy Probe)  
studium anisotropie, fluktuací a polarizace reliktního záření;  
úhlové rozlišení:  $0,3^\circ$ ; teplotní citlivost  $20 \mu\text{K}$   
rozbor spektra fluktuací reliktního záření => dosud  
nejpřesnější určení parametrů našeho vesmíru, ale...

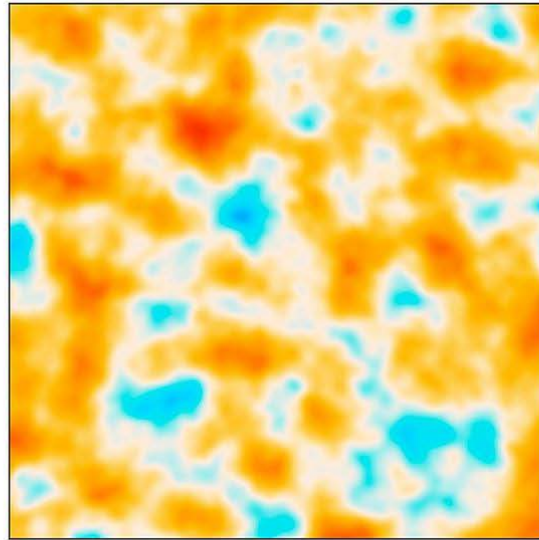


2009-2013 - **Planck** – evropský projekt  
úhlové rozlišení:  $0,17^\circ$ ; teplotní citlivost  $2 \mu\text{K}$

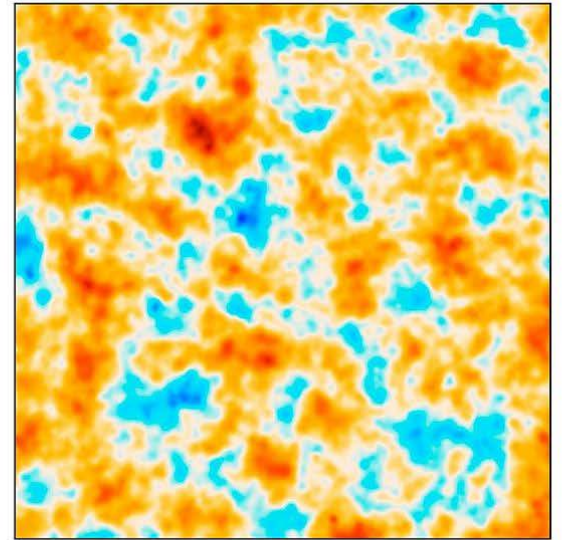




COBE



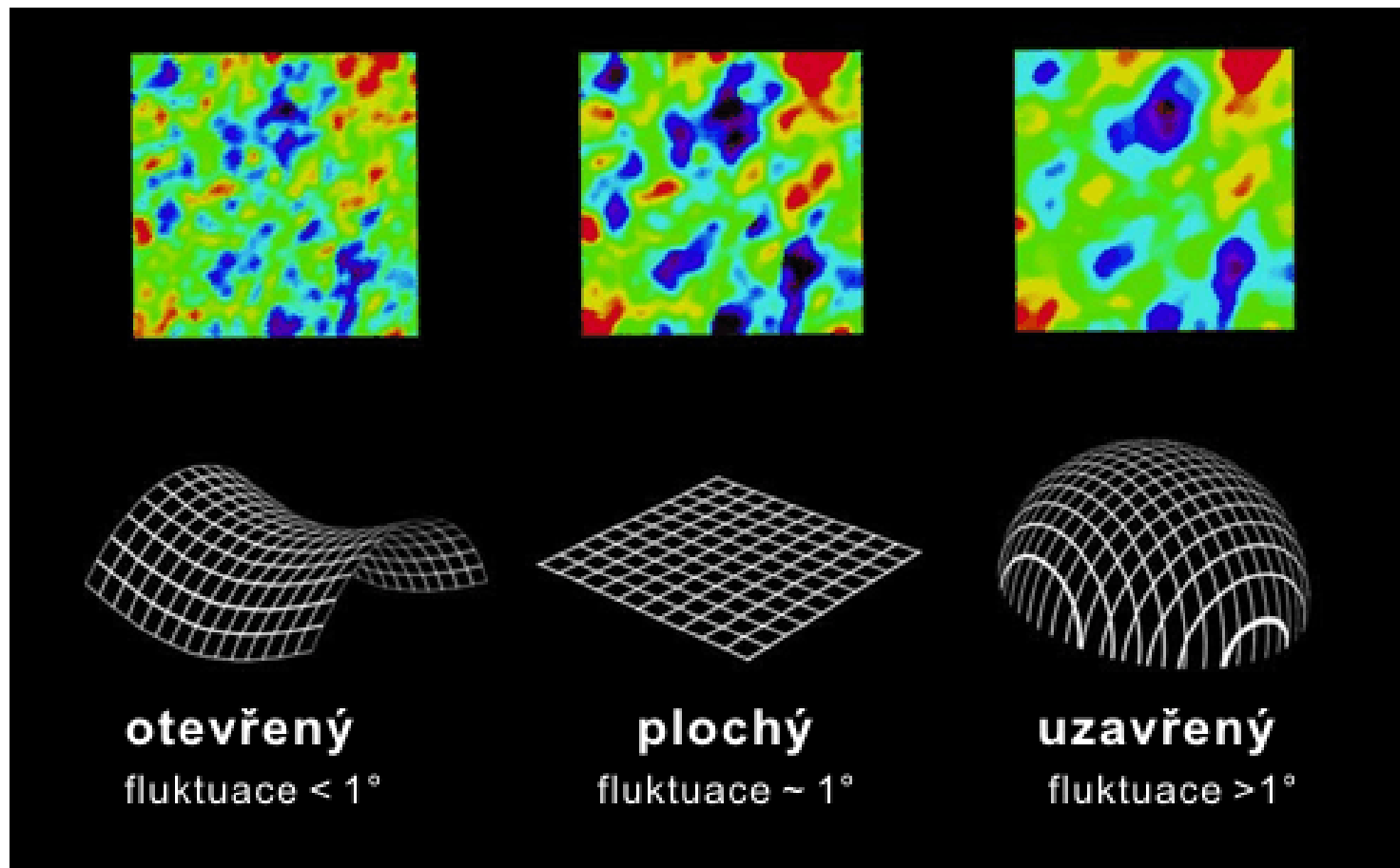
WMAP



Planck

# Ověření geometrie vesmíru

z družicových měření mikrovlnného záření pozadí



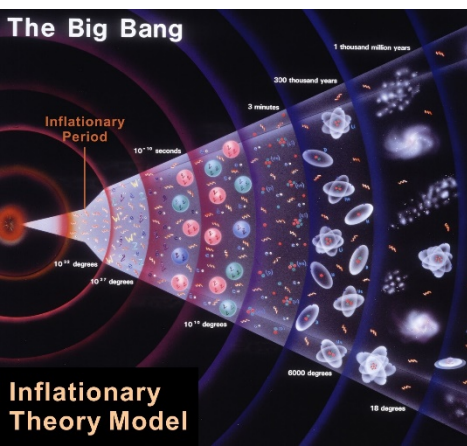
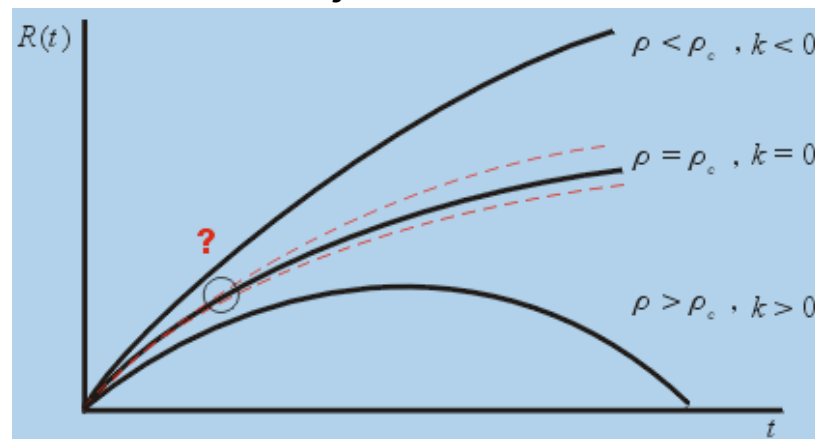
# Problémy standardního modelu

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.



Možné řešení – **teorie inflace**

1980 Alan Guth; 1981 Katsuhiko Sato;

později rozpracovali

Andrej Linde

a Paul Steinhardt



## Zvídavé otázky tvůrcům standardního modelu

- problém baryonové asymetrie (proč ve vesmíru nepozorujeme antihmotu?)
- problém magnetických monopolů (kde jsou?)
- kde se vzaly počáteční fluktuace nutné k tvorbě galaxií?
- proč je dimenze vesmíru právě 4 (tři prostorové dimenze a jedna časová)?