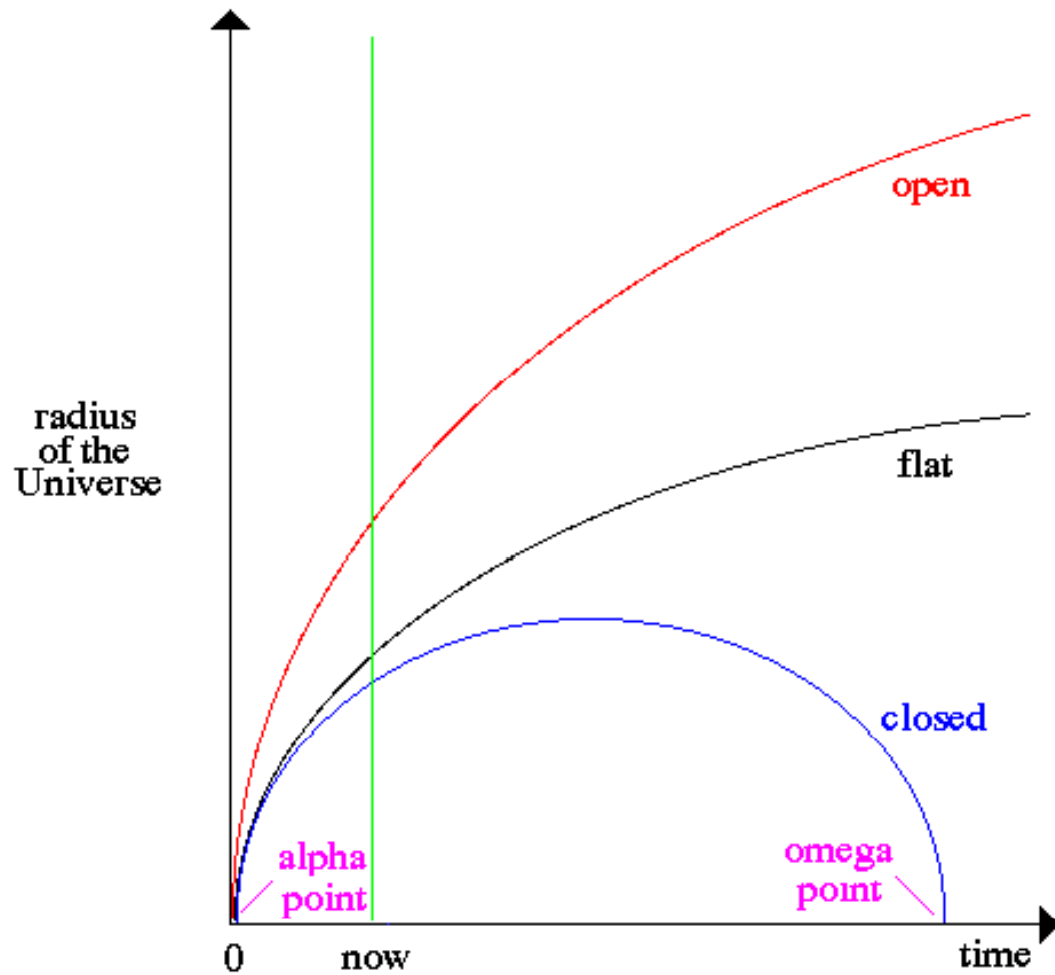




**Známe už definitivní
model vesmíru?**

Michael Prouza

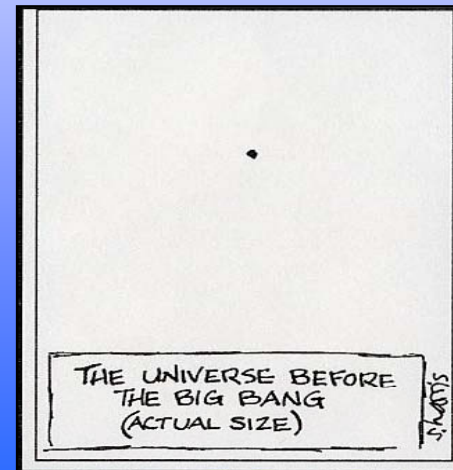
Klasický pohled na vývoj vesmíru



- Fridmanovo řešení Einsteinových rovnic
- podle množství hmoty (a energie) se dá snadno určit osud vesmíru
- tři možné varianty vývoje

Zlatá éra kosmologie

- v roce 1998 jsme díky pozorování vzdálených supernov vstoupili do nového období observační kosmologie, nazývaného některými jako „zlatá éra“ anebo „období precizní kosmologie“
- měření poskytují již nejen kvalitativní, ale i solidní kvantitativní údaje, u mnoha zásadních kosmologických parametrů již byla pokořena magická hranice 10% chyby měření
- navíc prakticky všechna měření ve vzácné shodě ukazují na jediný vítězný model



Parametry vítězného modelu

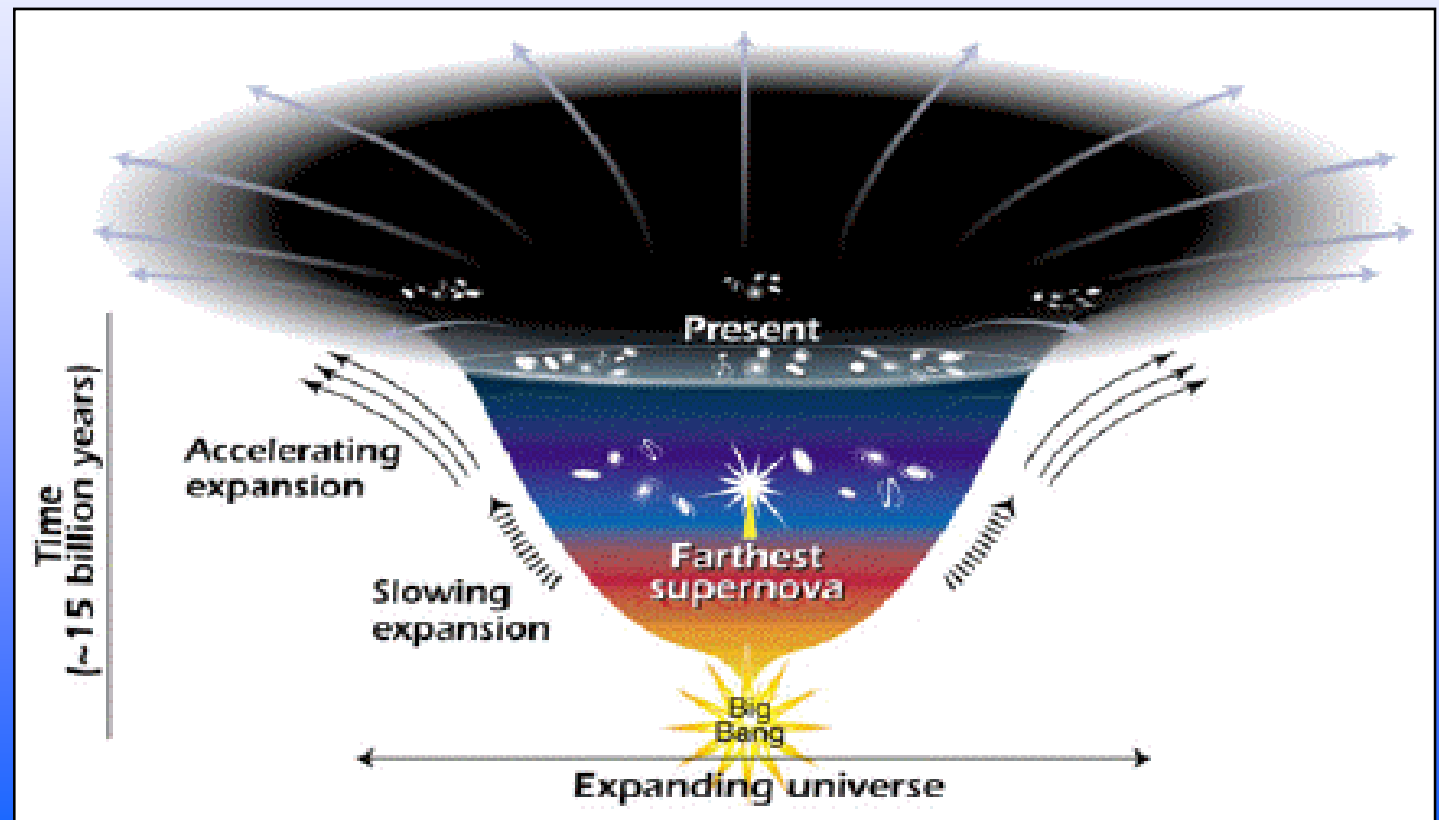
- v současné době vítězí model Λ CDM kosmologie („concordance model“, model shody)
- vznikl horkým velkým třeskem
- vesmír je plochý, obsahuje přesně kritické množství hmoty a energie, jeho rozpínání se zrychluje
- 10^{-32} s po velkém třesku nastalo období **inflace**, kdy se díky kvantovým fluktuacím utvořily počáteční nehomogenity vesmíru nezbytné pro vznik všech struktur
- k pozorované kritické hustotě přispívá ze dvou třetin **temná energie** (patrně kosmologická konstanta), z jedné třetiny **temná hmota**, zářící hvězdy tvoří zhruba půl procenta

Parametry vítězného modelu II

- hmota je tvořena především nebaryonickou chladnou temnou hmotou - (29 ± 4) % kritické hustoty, baryony (temná i zářící) hmota pak tvoří (4 ± 1) %, neutrina tvoří nejvýše 5 % kritické hustoty, nejspíš ale jen kolem 0,3 %

- stáří vesmíru je 14 ± 1 Gyr

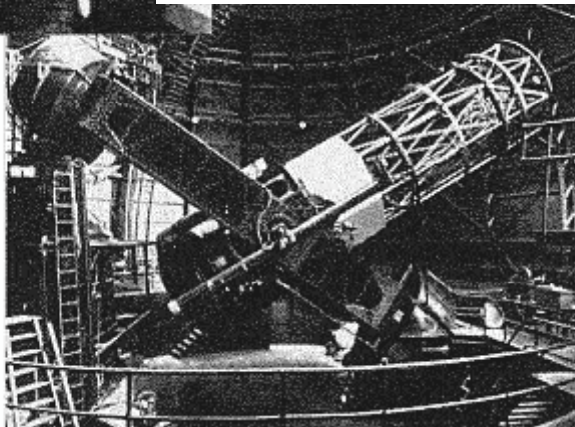
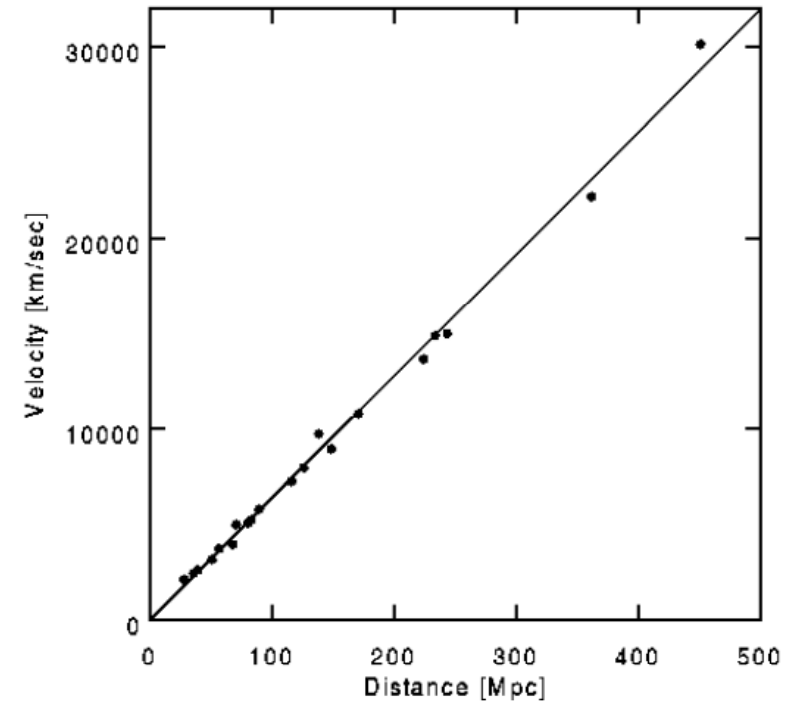
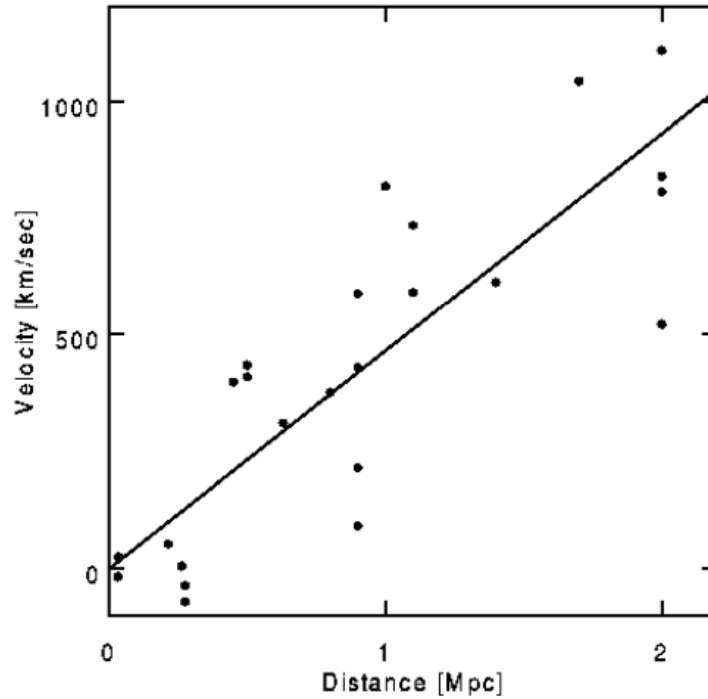
- Hubbleova konstanta má hodnotu (72 ± 7) $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$



Hubblova konstanta H_0 ...



Edwin Hubble



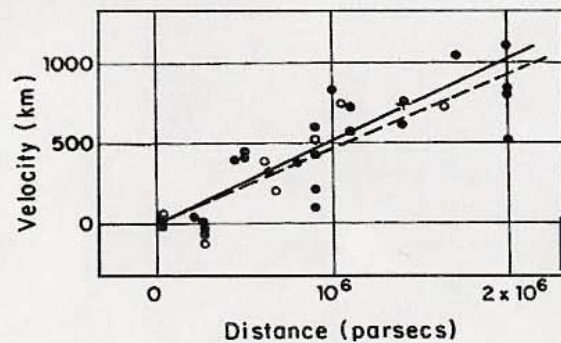
Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

Hubblova konstanta H_0 ...

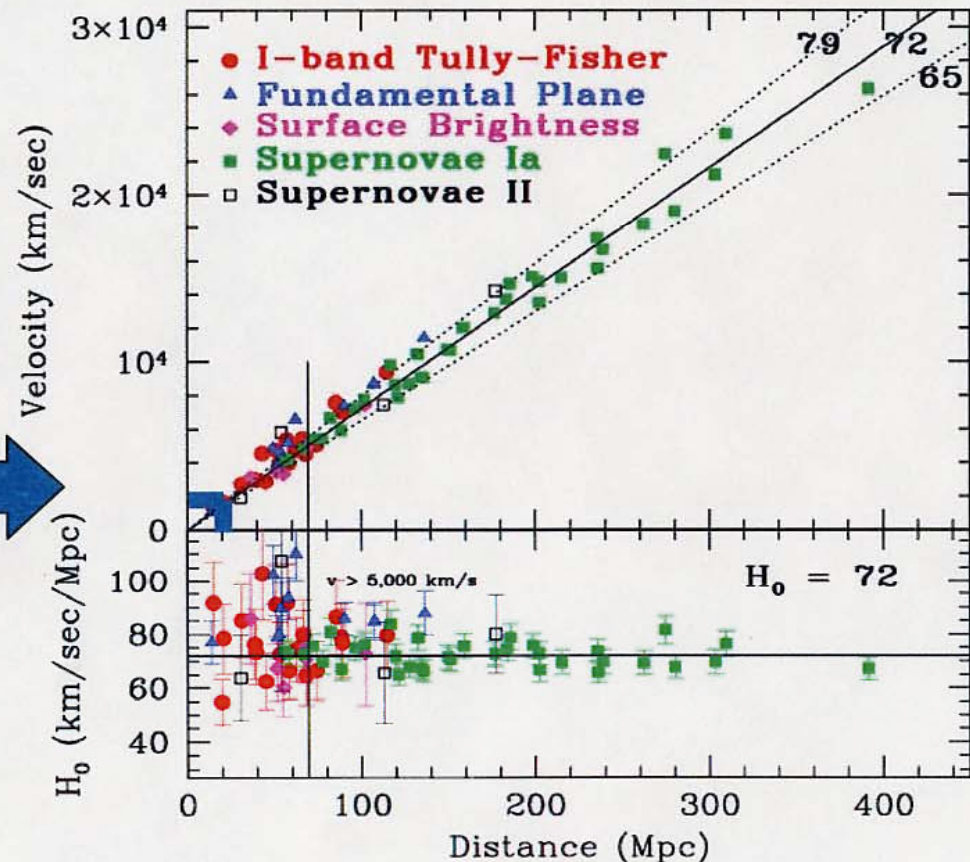
HST H_0 Key Project - výsledky zveřejněny v roce 2001

Freedman et al. (2001), Ap.J.

Hubble (1929)

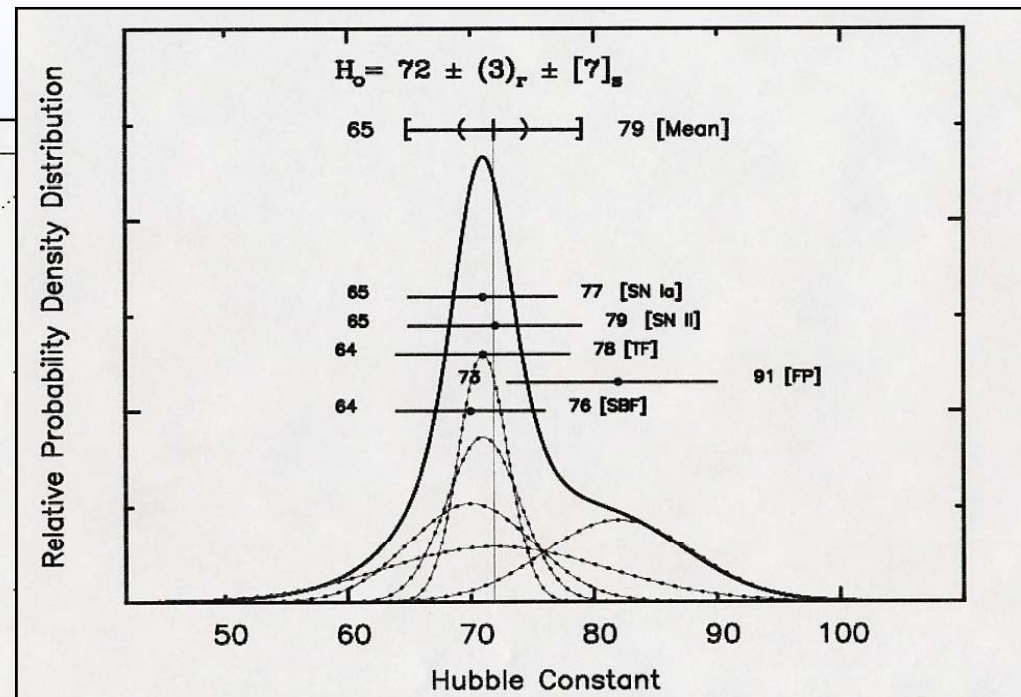
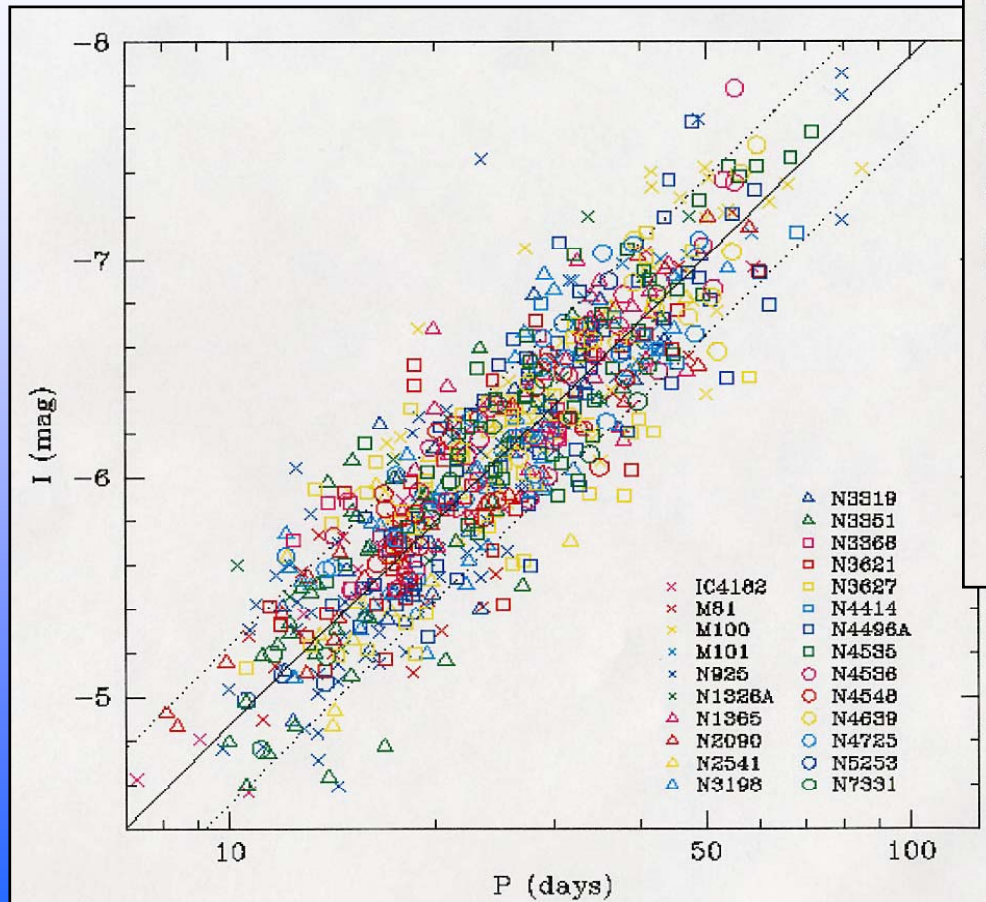


1st tick mark



HST H_0 Key Project

- pozorováno více než 800 cefeid v 24 galaxiích



- chyba měření $\pm 11\%$
- ve shodě s měřením GL, SZ, CMB, LSS, ...

... a stáří vesmíru

- jak ukazuje tabulka, nově změřená H_0 v podstatě nepřipouští vesmír s nulovou Λ

Flat, $\Omega_m = 1$:

$$t_0 = \frac{2}{3} H_0^{-1}$$

Open, $\Omega_m < 1$:

$$t_0 = H_0^{-1} \frac{\Omega_m}{2(\Omega_m - 1)^{3/2}} \left[\cos^{-1}(2\Omega_m^{-1} - 1) - \frac{2}{\Omega_m} (\Omega_m - 1)^{1/2} \right]$$

Flat, $\Omega_\Lambda > 0$:

$$t_0 = \frac{2}{3} H_0^{-1} \Omega_\Lambda^{-1/2} \ln \left[\frac{1 + \Omega_\Lambda^{1/2}}{(1 - \Omega_\Lambda)^{1/2}} \right]$$

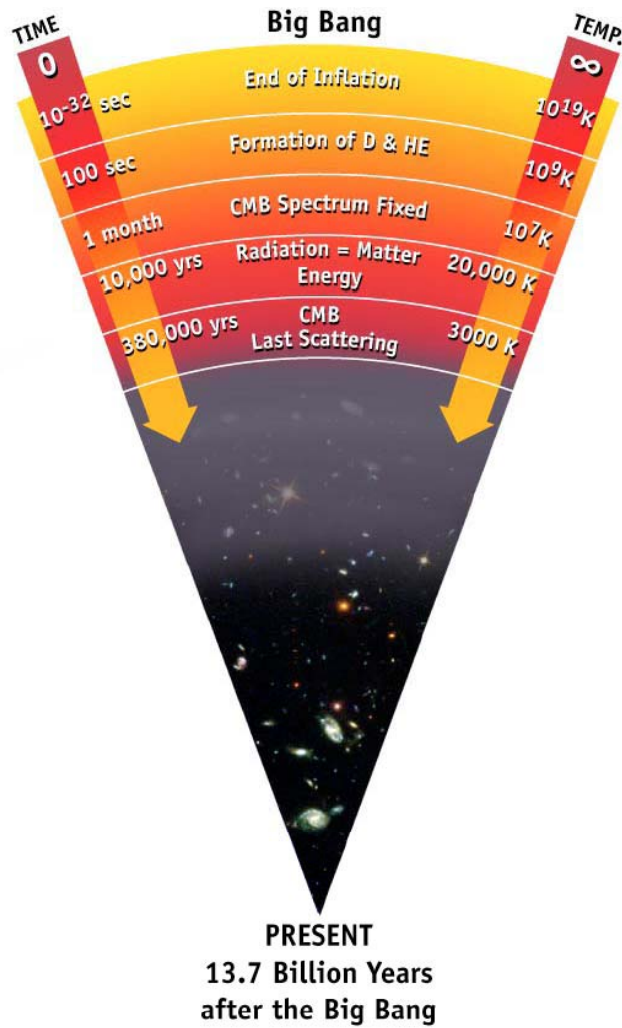
$H_0 = 70$	Ω_m	Ω_Λ	t_0 (Gyr)
Open	0.2	0	12 ± 1
Open	0.3	0	11 ± 1
Flat	0.2	0.8	15 ± 1.5
Flat	0.3	0.7	13.5 ± 1.5
Flat	1.0	0	9 ± 1

... a stáří vesmíru - podle hvězd

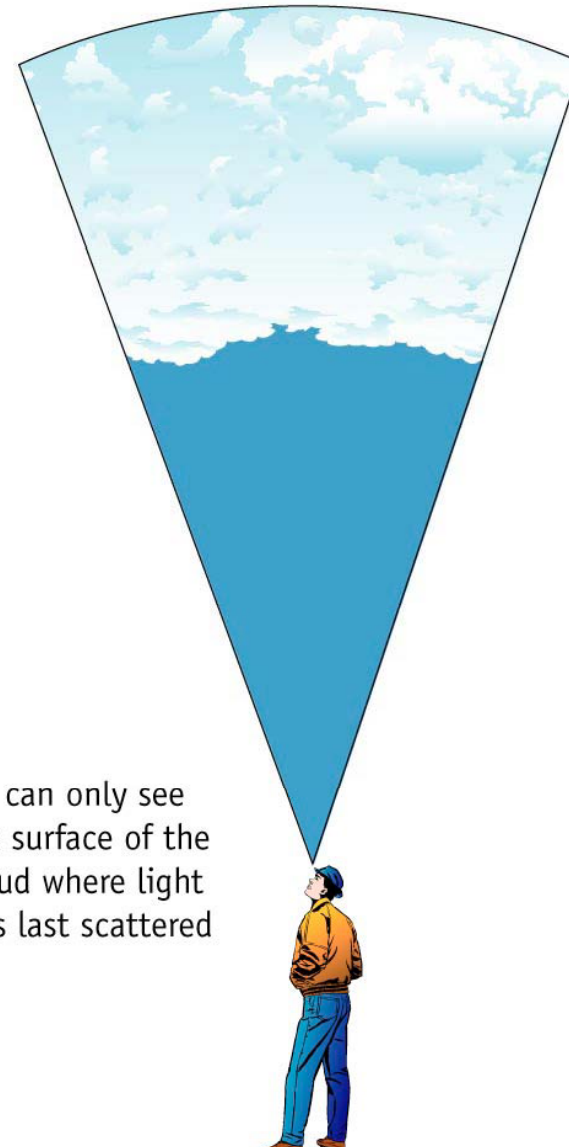
Pro odhad minimálního stáří vesmíru můžeme použít několik typů hvězd:

- podle obsahu thoria a uranu v hvězdách chudých na kovy v halu Galaxie: 12 ± 3 Gyr
- minimální věk bílých trpaslíků v kulové hvězdokupě M4 je 9 Gyr, s nejlepším odhadem: 12 - 13 Gyr
- zákrytová dvojhvězda v kulové hvězdokupě Omega Cen má stáří $11,1 \pm 0,7$ Gyr
- nejstarší kulové hvězdokupy mají stáří kolem 12,6 Gyr (chyba necelé 2 Gyr)

Reliktní záření



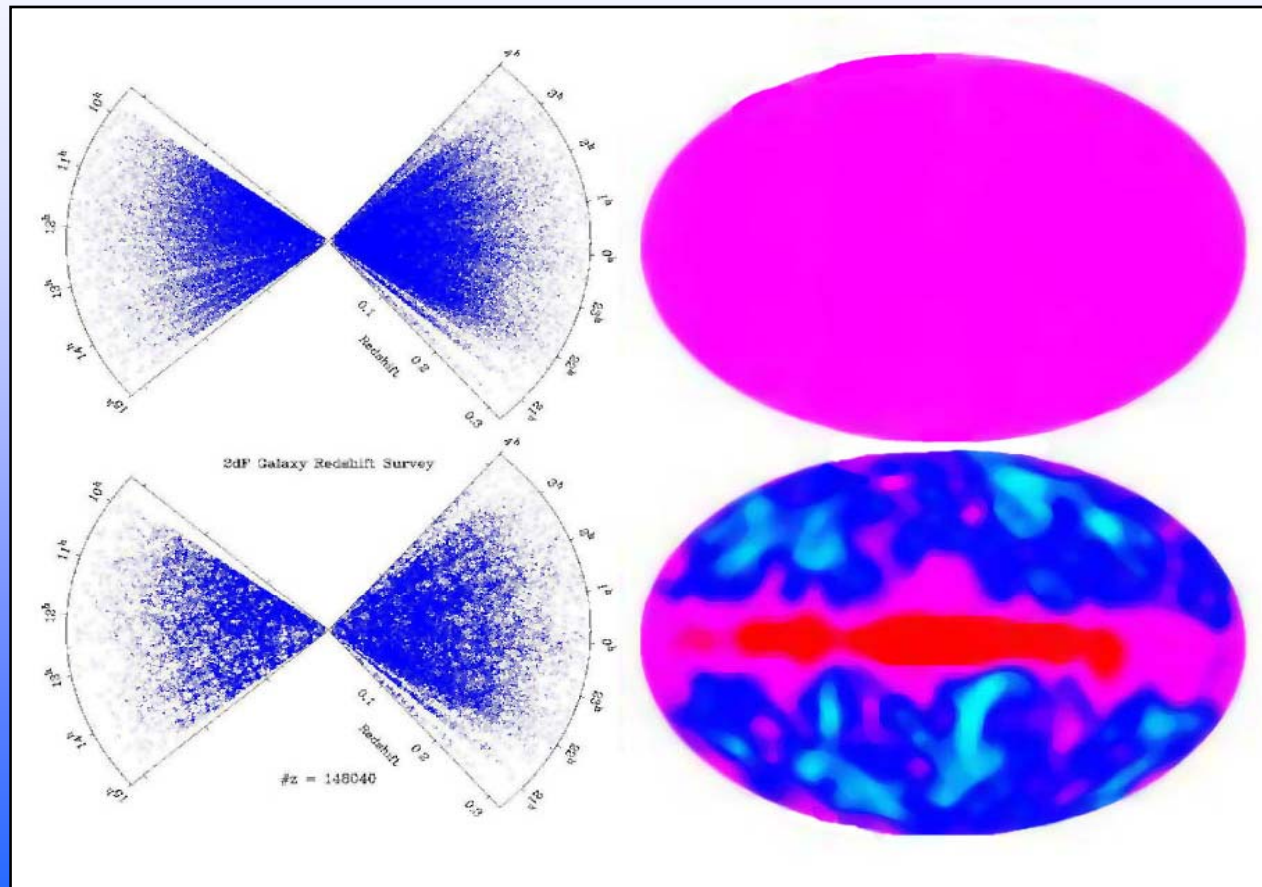
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

Reliktní záření

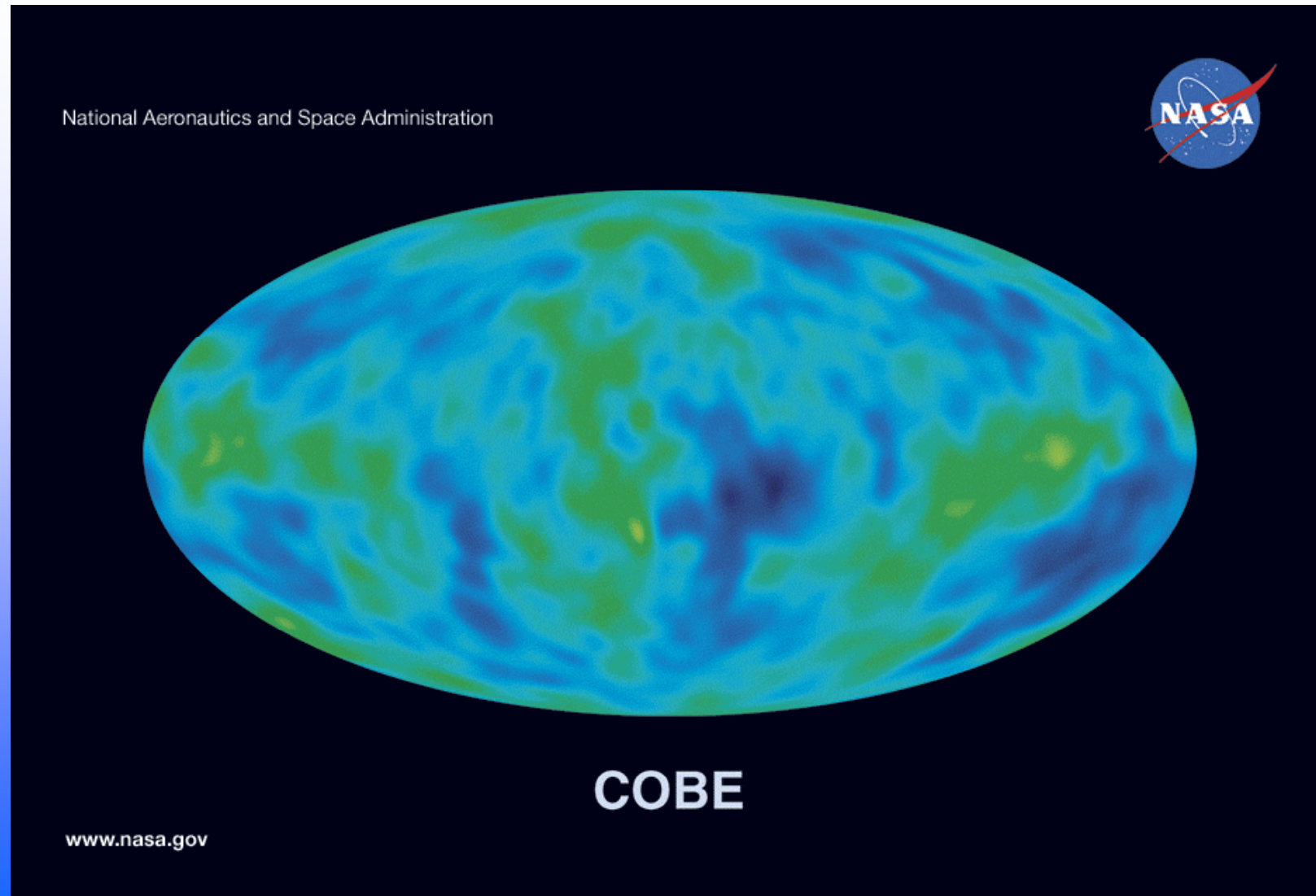
Patrně největšího experimentálního pokroku bylo dosaženo na poli pozorování teplotních fluktuací reliktního záření; motivace:



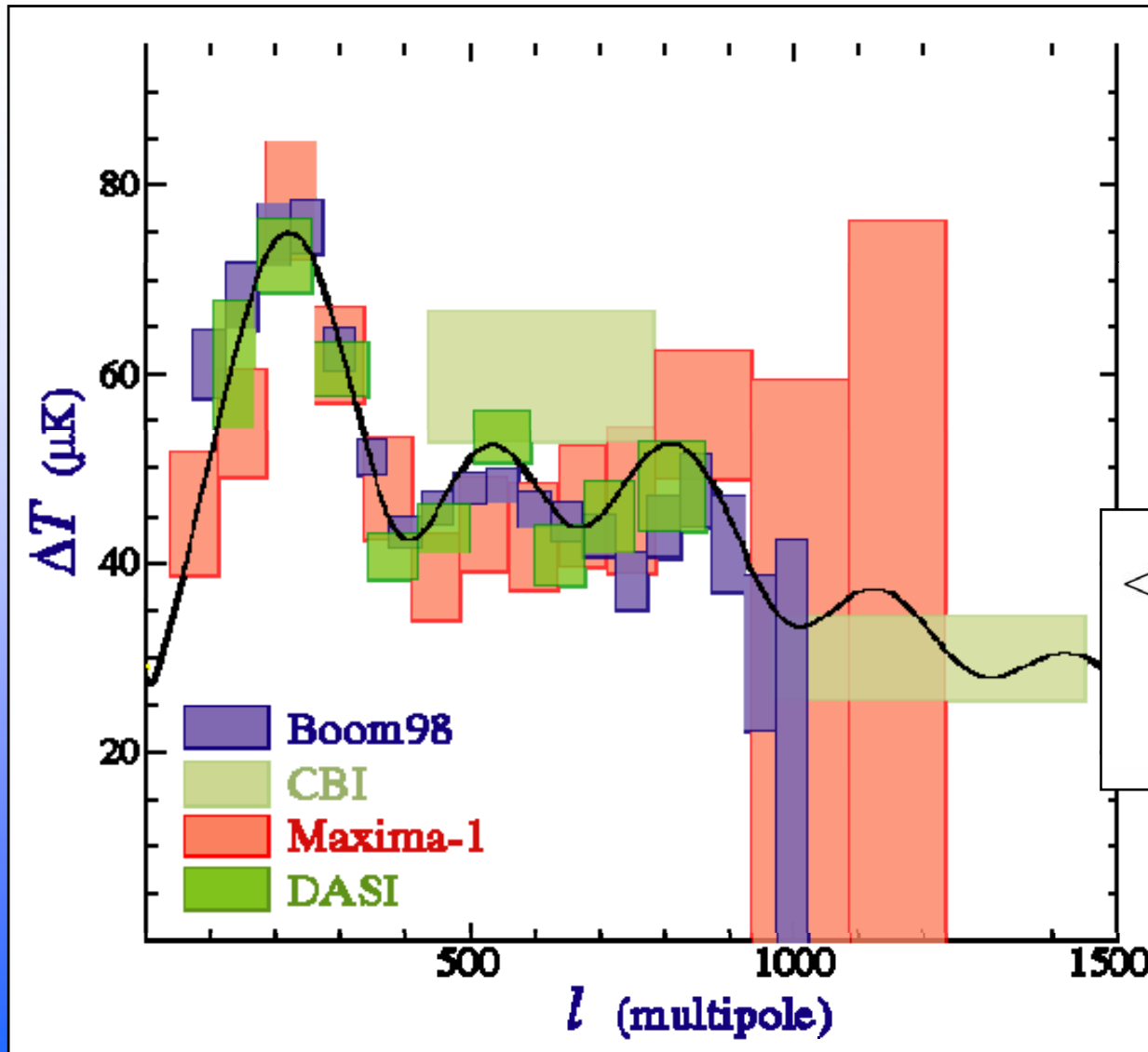
Měření teplotních fluktuací reliktního záření

- fluktuace objevila družice **COBE** (vypuštěna v roce 1989, první výsledky v roce 1992)
- na ní navázaly po roce 1998 experimenty **BOOMERANG** (balón), **MAXIMA** (další balón) a **DASI** (interferometr na Amundsenově-Scottově základně na jižním pólu), jejichž týmy publikovaly v roce 2001 souhrnné výsledky
- od konce června 2001 je na oběžné dráze rovněž sonda **WMAP**
- za měsíc odstartuje ještě sonda **PLANCK**, která přinese opět další zpřesnění

Měření teplotních fluktuací reliktního záření – COBE vs. WMAP



Multipólový rozvoj



- rozviňme do kulových funkcí:

$$\frac{\delta T}{T}(\hat{n}) = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\hat{n})$$

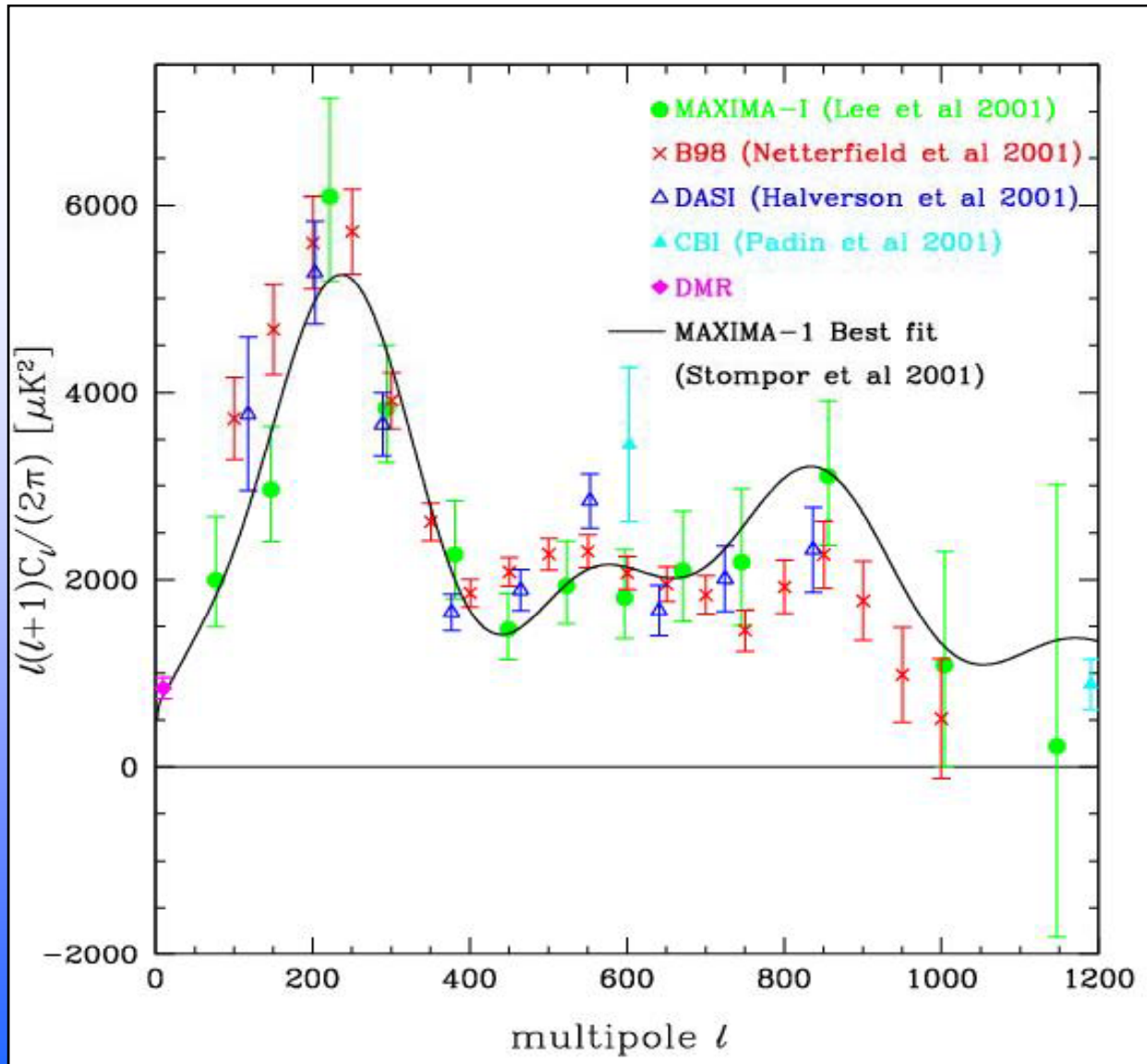
- dvoubodová korelační funkce může být rozvinuta do Legendrových polynomů

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\delta T}{T}(\hat{n}) \frac{\delta T}{T}(\hat{n}') \right\rangle_{\hat{n} \cdot \hat{n}' = \cos \theta} &= \\ &= \sum_l \frac{2l+1}{4\pi} C_l P_l(\cos \theta) \end{aligned}$$

- kde platí vztah:

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{lm}|^2$$

Multipólový rozvoj



• interpretace:

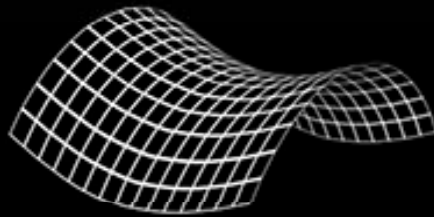
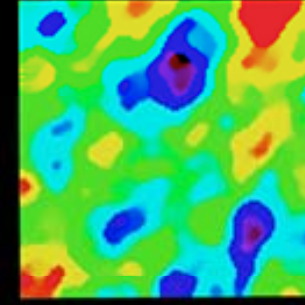
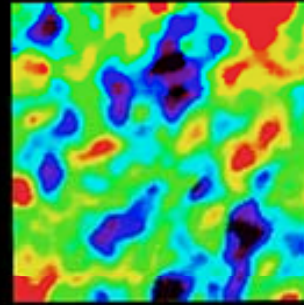
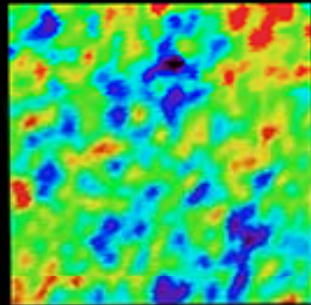
poloha prvního peaku
koresponduje s úhlovou
velikostí Hubblova poloměru v
čase rekombinace (H^{-1}_{CMB}),
která je přímo ovlivněna
geometrií vesmíru – je-li vesmír
otevřený (resp. uzavřený),
budou se dráhy fotonů
přibližovat (resp. vzdalovat), a
to povede k menšímu (většímu)
pozorovanému úhlu; kde

zhruba platí $l_{\text{peak}} \sim 220 \Omega^{-1/2}$

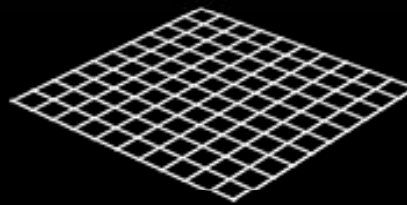
poloha druhého peaku (kolem l
 ~ 400) je citlivá na hustotu
baryonů

Multipólový rozvoj

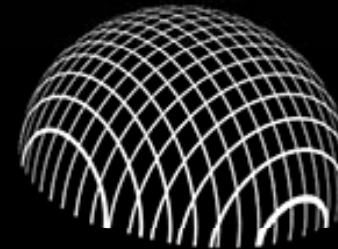
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN

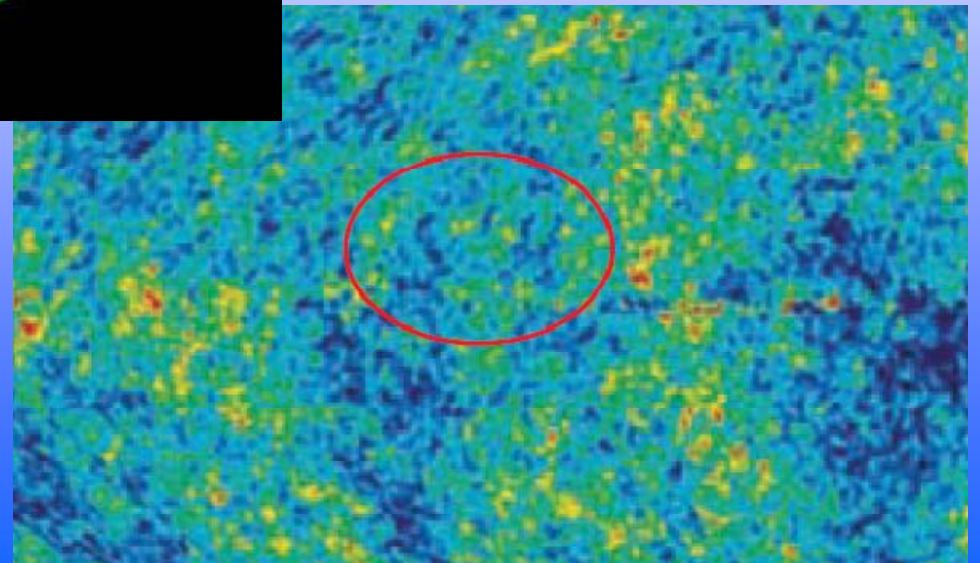
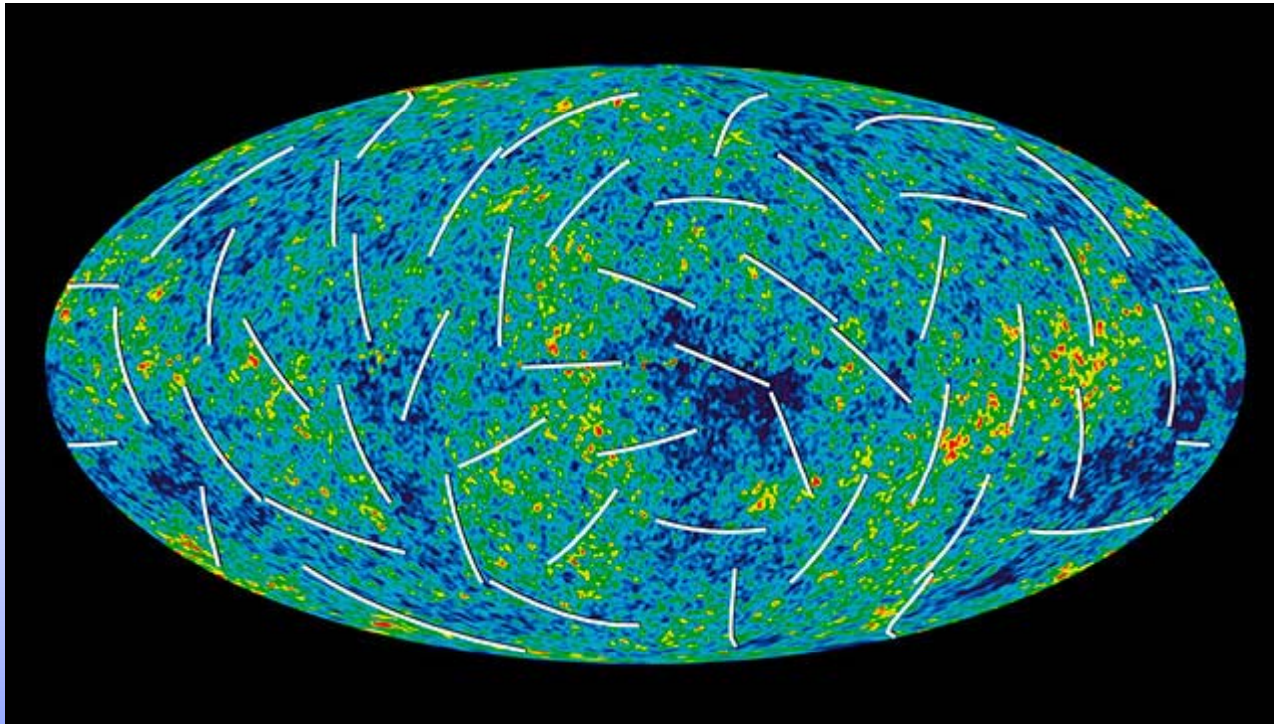


FLAT



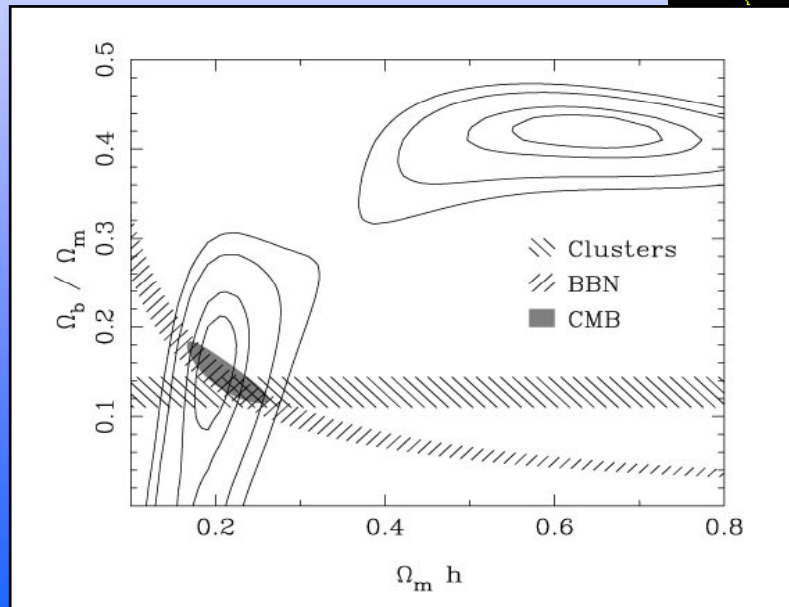
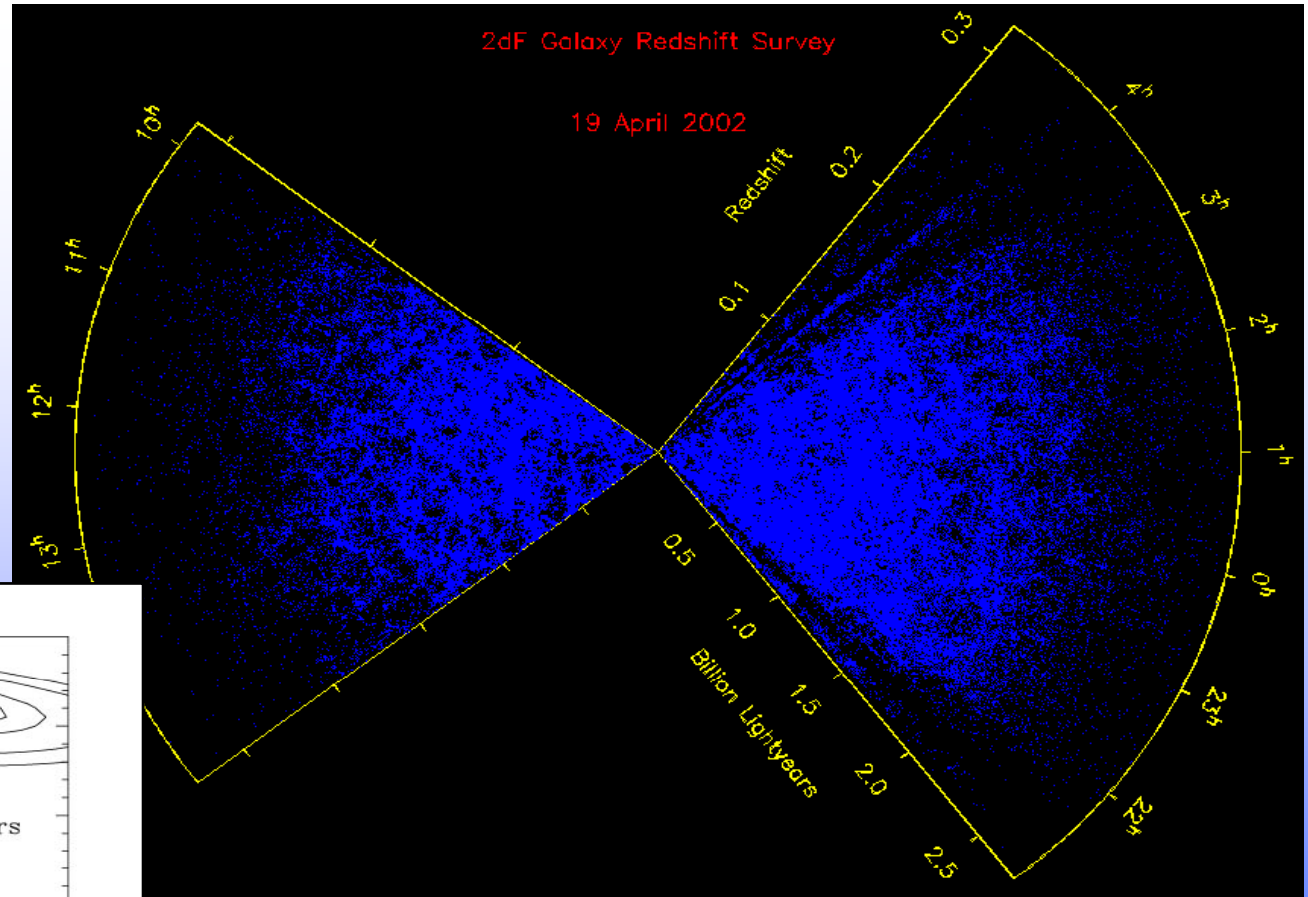
CLOSED

Polarizace a rafinovanosti CMB



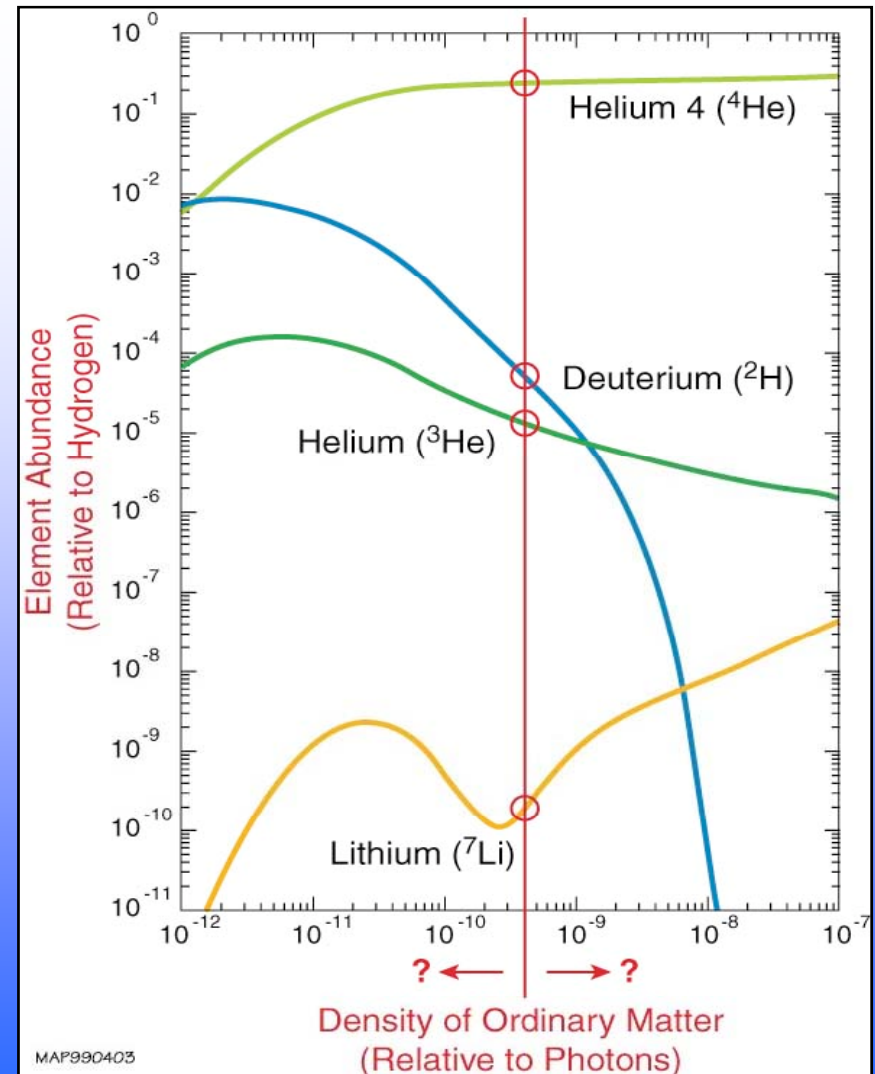
Přehledky galaxií

- 2dFGRS -
220 000 galaxií
- SDSS -
více než milión
galaxií



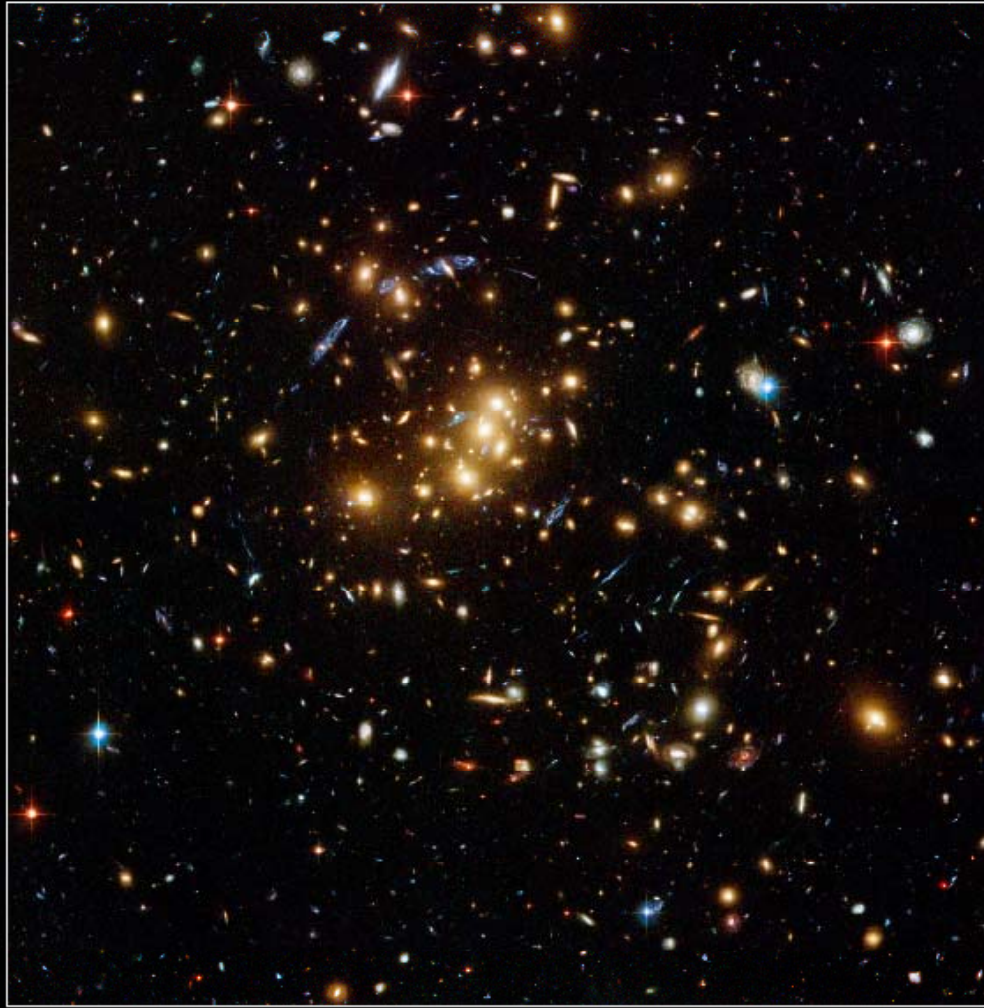
Hmota ve vesmíru

- ve srovnání s dalšími oblastmi nebylo dosaženo tak výrazného pokroku
- přímá detekce temné hmoty je velmi chabá a dokumentuje jen její malý zlomek - několik detekcí hnědých trpaslíků v rámci projektů MACHO, OGLE
- pokrok jen v měření výskytu primordiálních chemických prvků
- baryonická temná hmota - trpaslíci všech barev, černé díry, planety



Hmota ve vesmíru

Galaxy Cluster Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652) HST • ACS/WFC



NASA, ESA, and M.J. Jee (Johns Hopkins University)

STScI-PRC07-17b

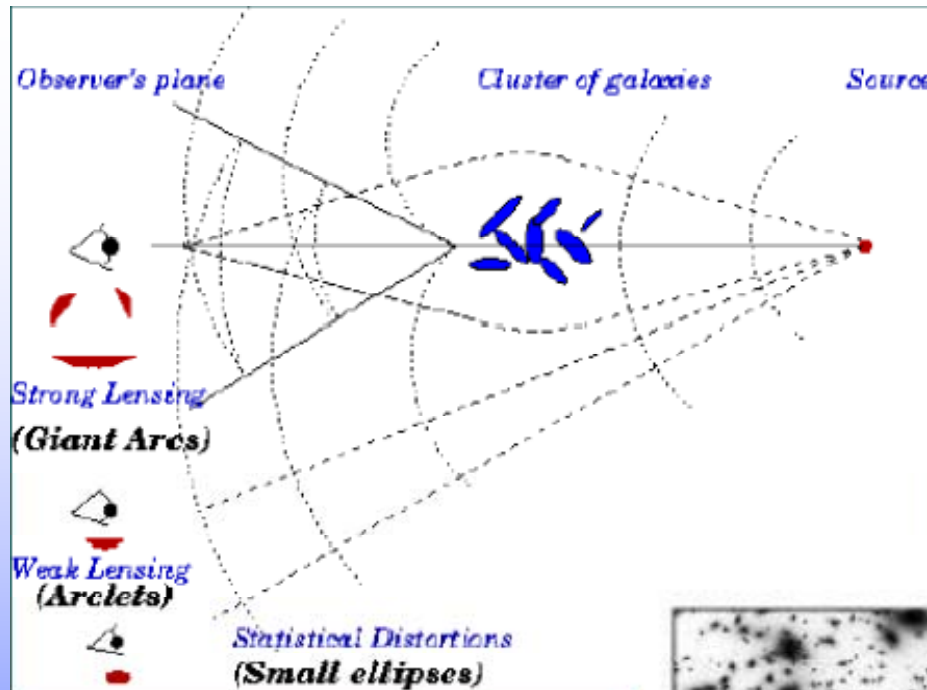
Dark Matter Ring in Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652) HST • ACS/WFC



NASA, ESA, and M.J. Jee (Johns Hopkins University)

STScI-PRC07-17b

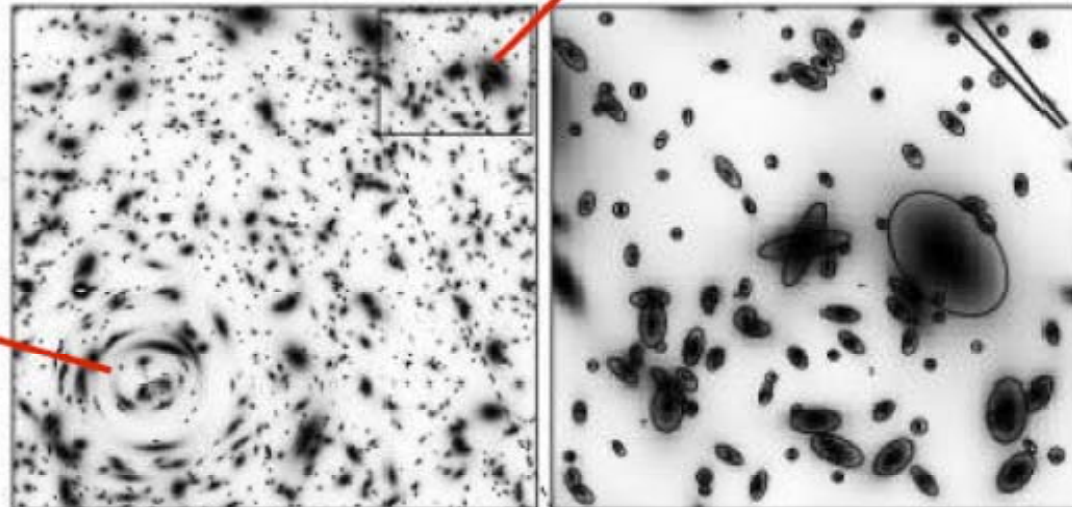
Hmota ve vesmíru



- deflection of light around massive objects
- sensitive to all mass not just luminous matter!

Weak Lensing
Regime

Strong Lensing
Regime

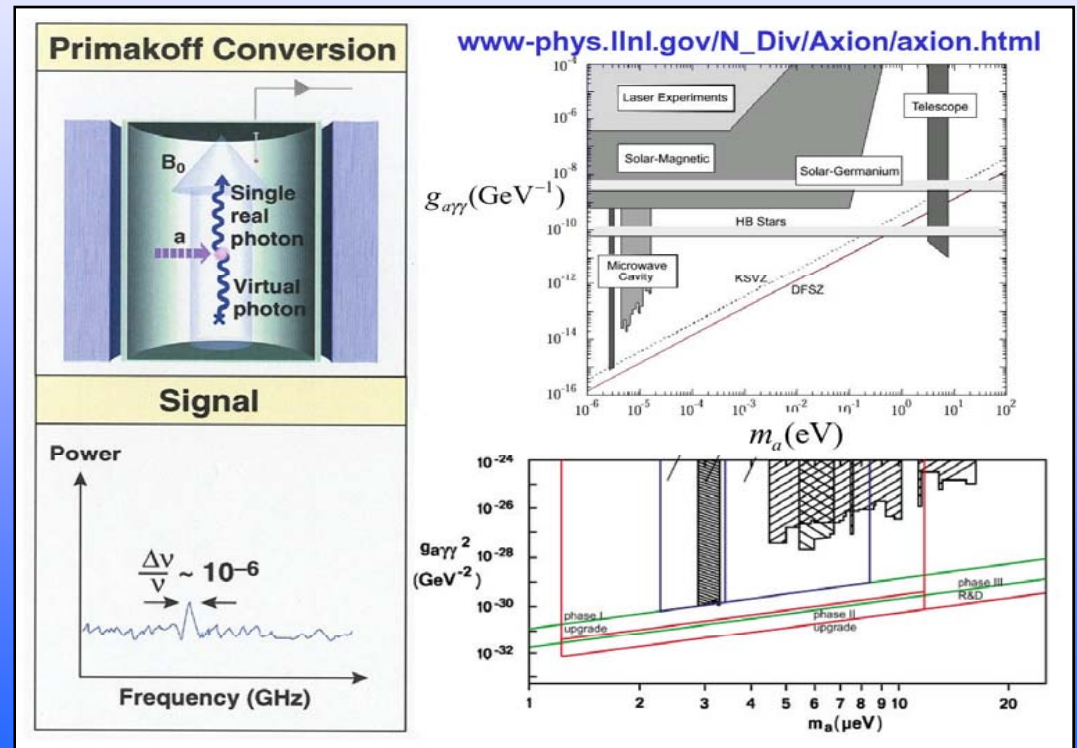


Kandidáti nebaryonické hmoty

Zatím neznáme „toho pravého“, ale několik nedávno ještě žhavých kandidátů lze naopak vyloučit, a to:

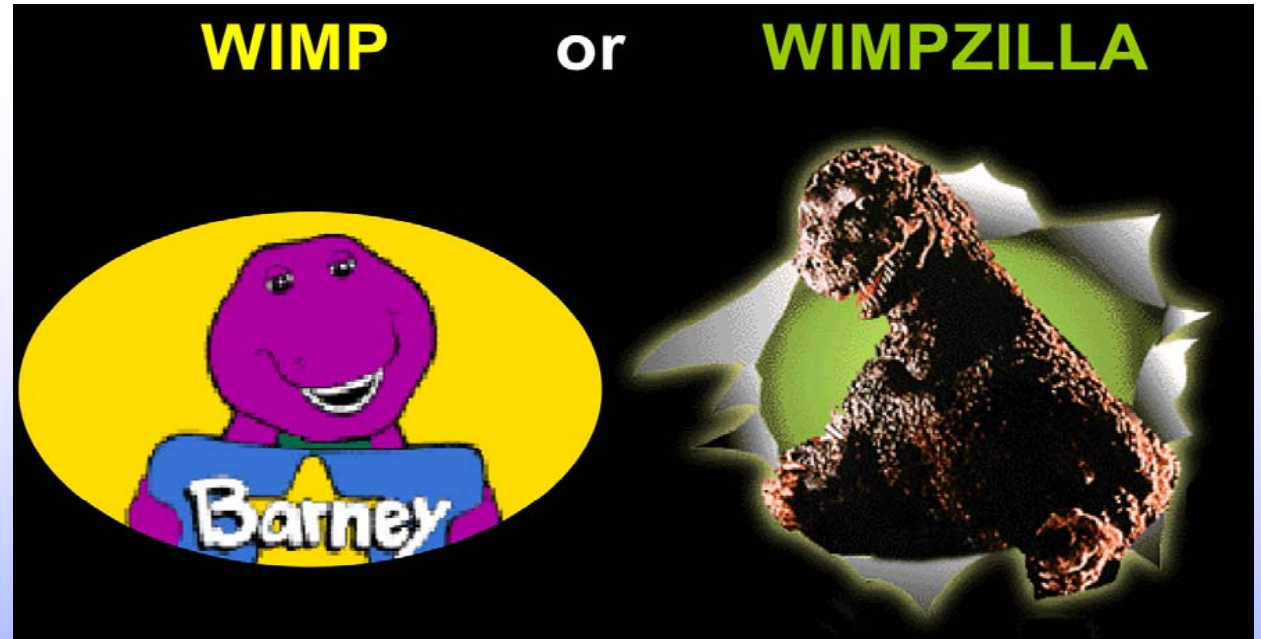
- **neutrino** - víme sice, že alespoň jeden druh má nenulovou klidovou hmotnost, ale i tak mohou tvořit nejvýše 5 % hmoty vesmíru

- **axiony** - hypotetické částice navržené k vysvětlení nulového dipólového momentu neutronu, detekce pomocí tzv. Primakoffovy konverze experimenty pomalu vyloučena



Kandidáti nebaryonické hmoty II

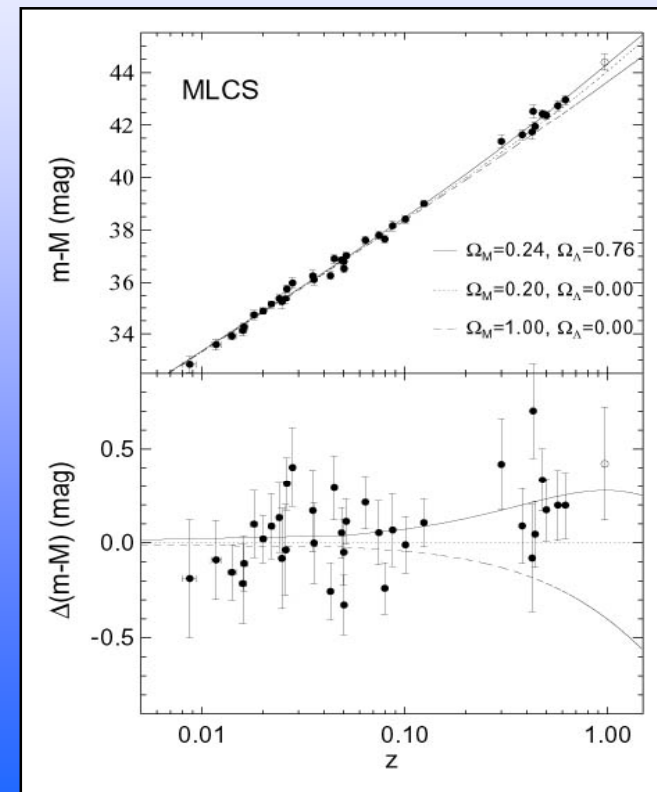
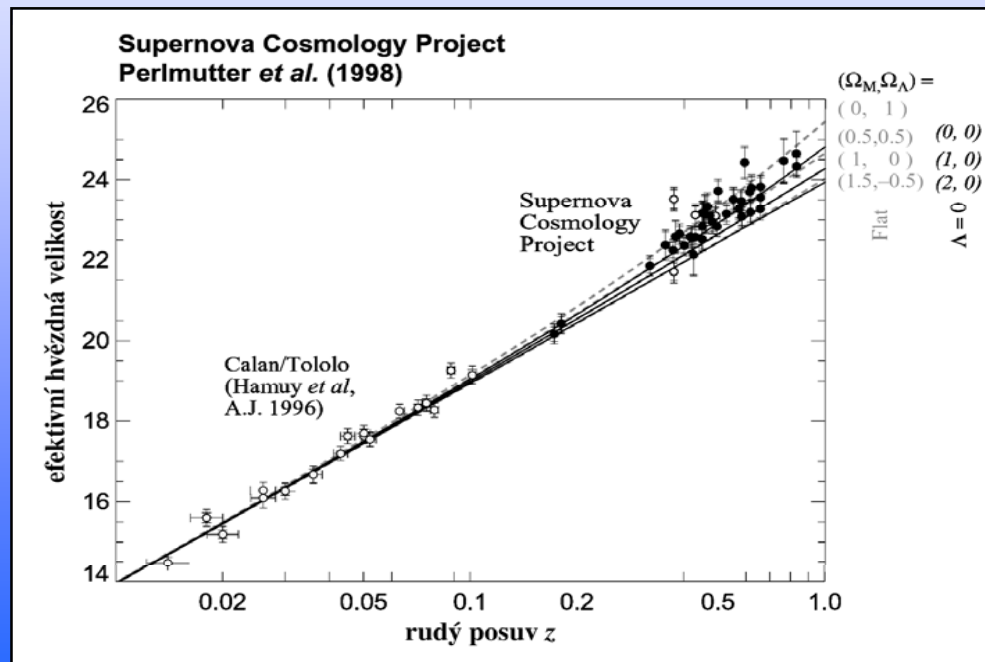
- tedy zbývají
WIMPy a WIMPZILLY
- WIMPZILLY jsou
supermasivní WIMPy
(klidová hmotnost
 $10^9 - 10^{19}$ GeV)



- jako nejpravděpodobnější WIMP se jeví v současnosti nejlehčí předpovězená supersymetrická částice, **neutralino**, na níž útočí jak experimentátoři (klidová hmotnost > 100 GeV), tak teoretici (klidová hmotnost < 200 TeV)
- ať tak či tak, oba typy byly patrně vytvořeny v období od konce inflace do rekombinace

Temná energie

- díky pozorováním z posledních let byla oživena idea kosmologické konstanty, „největšího omylu Einsteinova života“ - důkazy o nenulové Λ přináší nejvýrazněji pozorování supernov typu Ia, dále pak CMB, gravitačních čoček, ...



Temná energie II

- Einsteinova rovnice s kosmologickou konstantou:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{a^2 R_0^2}$$

$$\rho_{\text{vac}} = \rho_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{8\pi G}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

- důležitá je stavová rovnice:

$$p_{\text{vac}} = -\rho_{\text{vac}}$$

- kosmologická konstanta je obvykle interpretována jako vnitřní energie vakua, dle kvantové teorie pole můžeme chápat prázdný prostor jako nekonečně mnoho harmonických oscilátorů; „odřezáváme“ módy pro energie vyšší, než je platnost užívané teorie

$$\rho_{\Lambda} \sim \hbar k_{\text{max}}^4$$

$$\rho_{\Lambda}^{\text{Pl}} \sim (10^{18} \text{ GeV})^4 \sim 2 \times 10^{110} \text{ erg/cm}^3$$

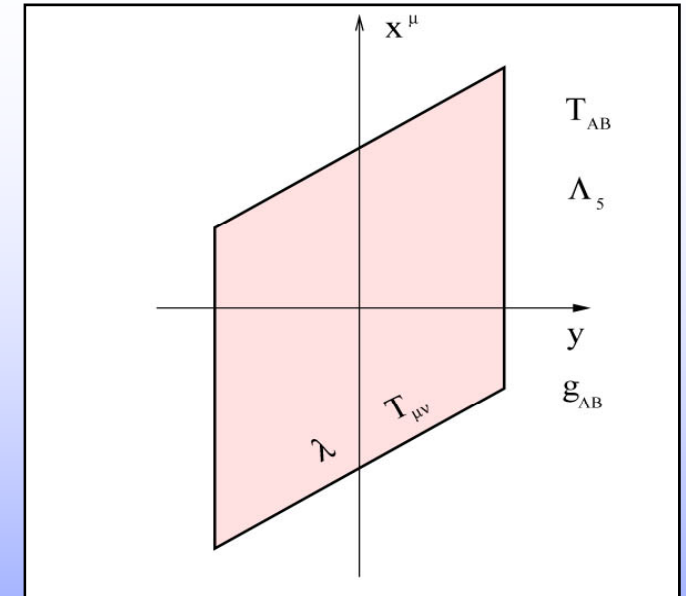
$$|\rho_{\Lambda}^{(\text{obs})}| \leq (10^{-12} \text{ GeV})^4 \sim 2 \times 10^{-10} \text{ erg/cm}^3$$

} **rozdíl 120 řádů !**
(největší chyba ve fyzice vůbec)

“Brane cosmology”

(Membránová kosmologie)

- aplikace strunových teorií v kosmologii
- 11 dimenzí celkem, 6 svinutých, kompakťikovaných, žijeme v 5-rozměrném „bulku“ (rozvinutém objemu), náš čtyřrozměrný časoprostor je nazýván „brane“ (membrána) a pohybuje se podél páté dimenze



- srážkou dvou membrán vznikl vesmír namísto velkého třesku - tzv. „ekpyrotický vesmír“
- motivace - extra dimenze řeší „problém hierarchie“ - $E_{PL} \gg E_{EW}$, po srážce dvou membrán dochází přirozeně k období nadsvětlené expanzi - k „inflaci“

Velký třesk

... opravdu za všechno může ...

- **10^{-43} sekundy:**

Planckův čas – začíná fyzika:

teplota 10^{32} K; energie částic 10^{28} eV;

hustota 10^{97} kg/m³;

narušení supersymetrie (gravitace se oddělila od velkého sjednocení GUT), asymetrie hmoty a antihmoty (narušení parity?) v poměru $(10^9+1)/10^9$

- **10^{-35} sekundy:**

kosmologická inflace – rozepnutí 10^{30} krát!

volné kvarky, leptony a fotony:

energie $< 10^{23}$ eV, teplota $< 10^{27}$ K

narušení GUT (silná jaderná síla se oddělila od elektroslabé)

- **10^{-10} sekundy:**

éra hadronová

narušení symetrie elektroslabé interakce na elektromagnetickou a slabou jadernou interakci

energie 100 GeV, teplota 1 PK

- **0,1 milisekundy:**

éra leptonová

energie 100 MeV, teplota 1 TK, hustota 10^{17} kg/m³



• **0,1 sekundy:**

vesmír je průhledný pro neutrina

hustota 10^7 kg/m^3

anihilace párů elektron-pozitron na záření gama

• **10 sekund:**

energie 500 keV , teplota 5 GK , hustota 10^4 kg/m^3

éra záření

• **3 minuty:**

vznik jader $\text{H/He} = 3/1$ (podle hmotnosti)

dominuje *reliktní záření*

- **380 tisíc let:**

záření se odděluje od látky

elektrony se slučují s atomovými jádry na neutrální atomy
průhledný vesmír ztmavne – **šerověk** (*Dark Age*)

- **200 mil. let:**

vznik I. generace velmi hmotných hvězd H/He

výbuchy supernov začínají obohacovat vesmír

o chemické prvky C → U

černé díry se slévají na zárodky kvasarů a jader galaxií

- **1 miliarda let:**

první galaxie a kupy galaxií, hvězdy II. generace



• **7 miliard let:**


rozpínání vesmíru se díky skryté energii začíná znovu zrychlovat

• **9 miliard let:**

vzniká Slunce a planetární soustava včetně Země

• **13,5 miliard let:**

pomalu končí tato přednáška



Ačkoliv se fyzika mikrosvěta a astronomie vydaly před sto lety opačným směrem, nedávno se podivuhodně sešly: stručné dějiny vesmíru lze popsat díky vzájemné interakci částicové fyziky a astronomických pozorování.

Hloubení tunelu pod Mt. Blancem z italské a francouzské strany bez jakéhokoliv zaměření: bezešvé setkání vrtných souprav uprostřed –astročásticová fyzika.****