A full-page image of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation map, showing a complex pattern of temperature fluctuations in shades of blue, purple, and red against a black background. The map is centered and fills most of the frame.

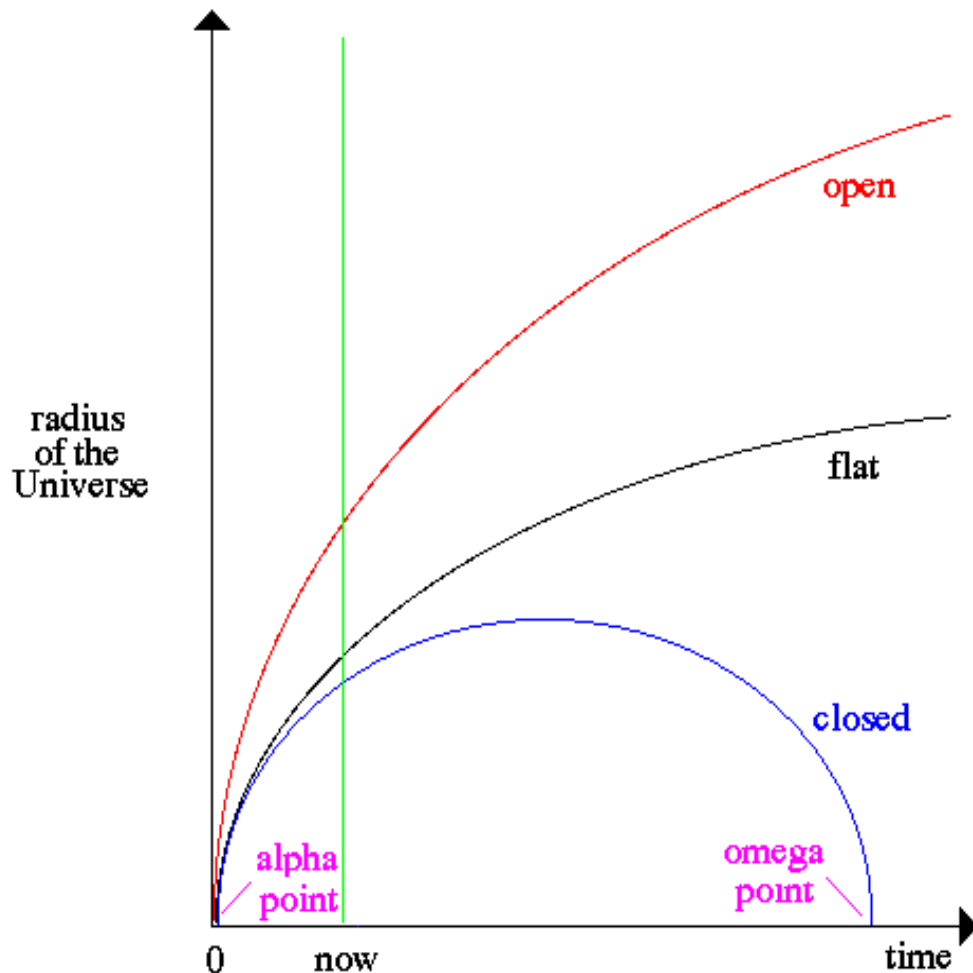
# **Temná hmota a temná energie v současné kosmologii**

31. října 2013

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

# Parametry vítězného modelu

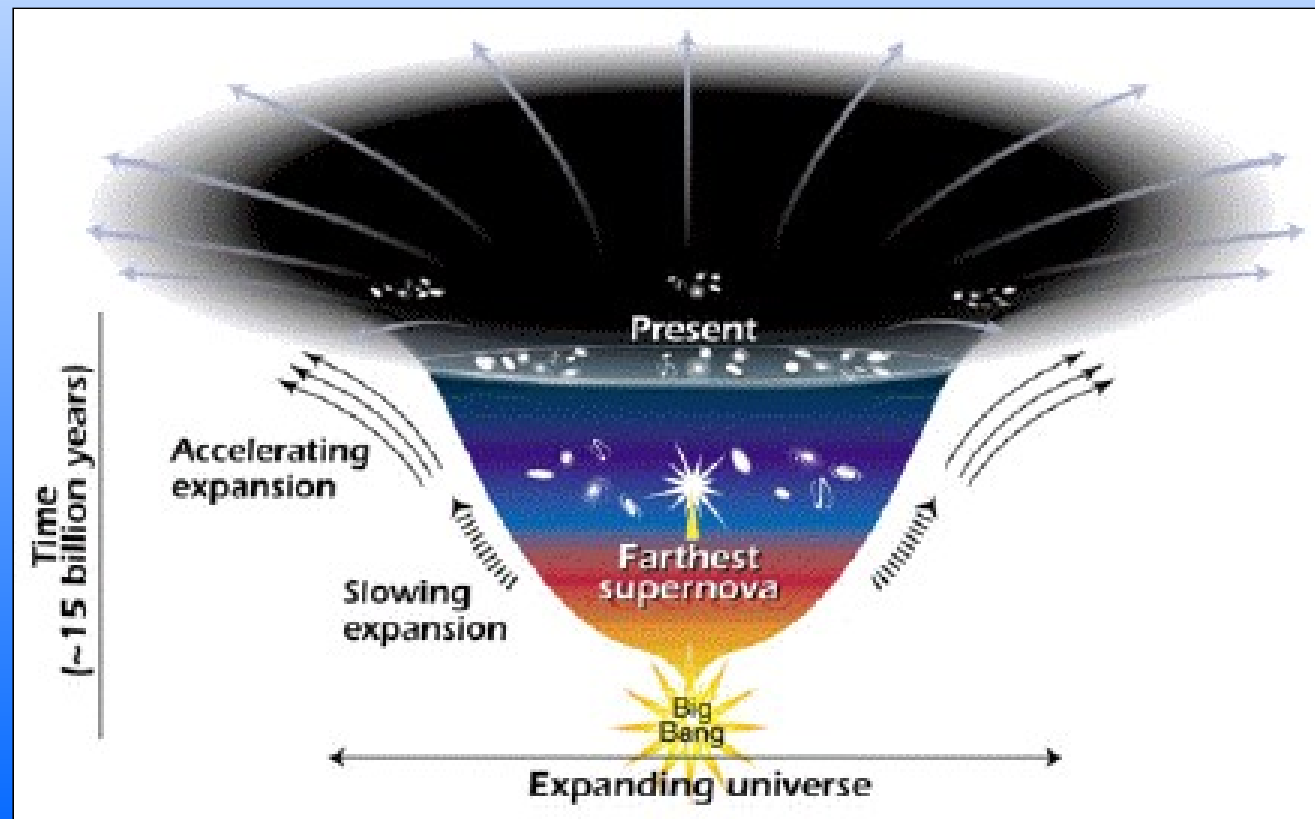
- v současné době vítězí model  $\Lambda$ CDM kosmologie („concordance model“, model shody)
- vznikl horkým velkým třeskem
- vesmír je plochý, obsahuje přesně kritické množství hmoty a energie, jeho rozpínání se zrychluje
- $10^{-32}$  s po velkém třesku nastalo období inflace, kdy se díky kvantovým 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 -  $(27 \pm 2)$  % kritické hustoty, baryony (temná i zářící) hmota pak tvoří  $(4,5 \pm 0,2)$  %, neutrina tvoří nejvýše 5 % kritické hustoty, nejspíš ale jen kolem 0,3 %

- stáří vesmíru je  $13,7 \pm 0,1$  Gyr

- Hubbleova konstanta má hodnotu  $(70,5 \pm 1,5)$   $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$

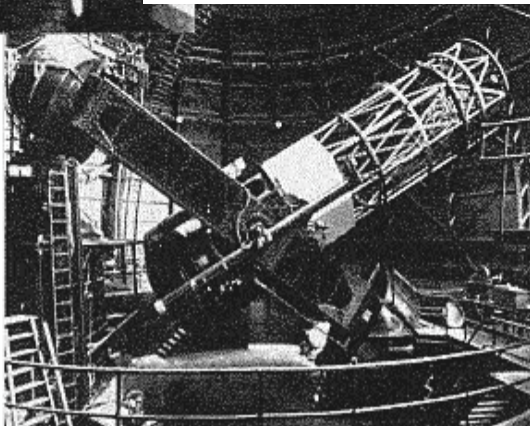




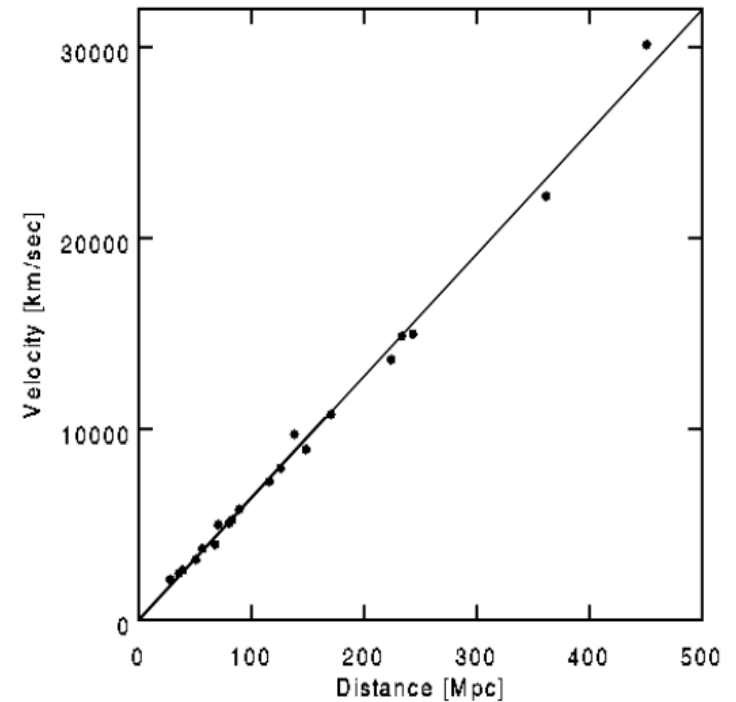
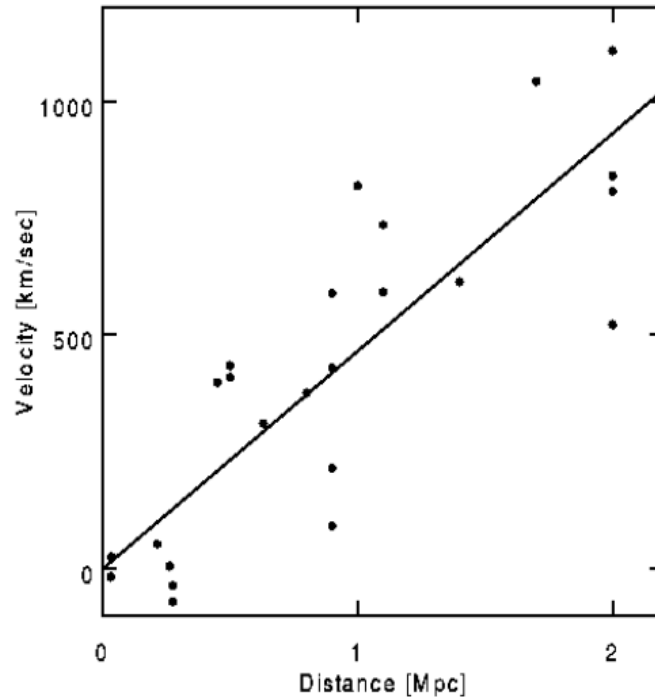
# Hubbleova konstanta $H_0$



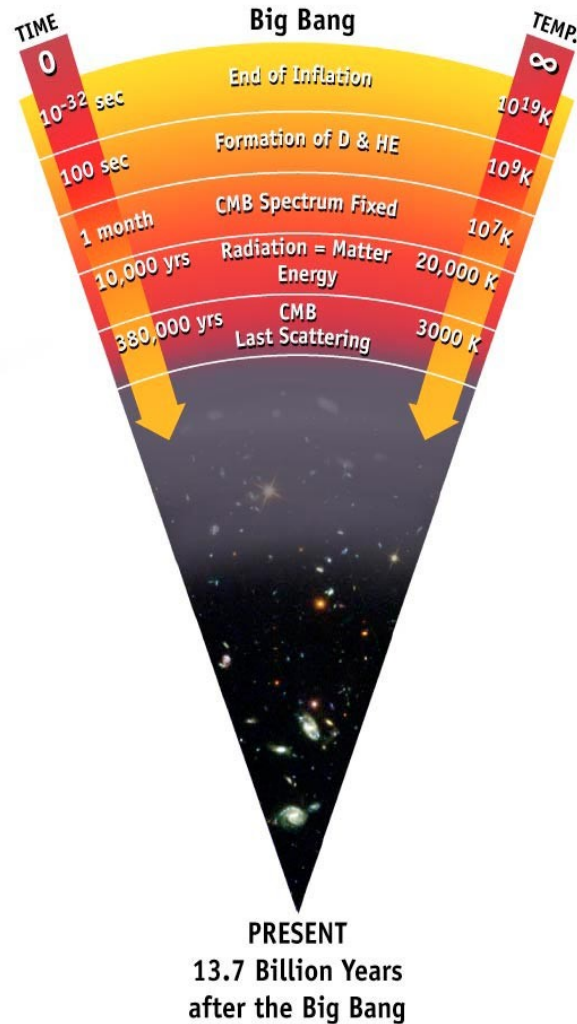
Edwin Hubble



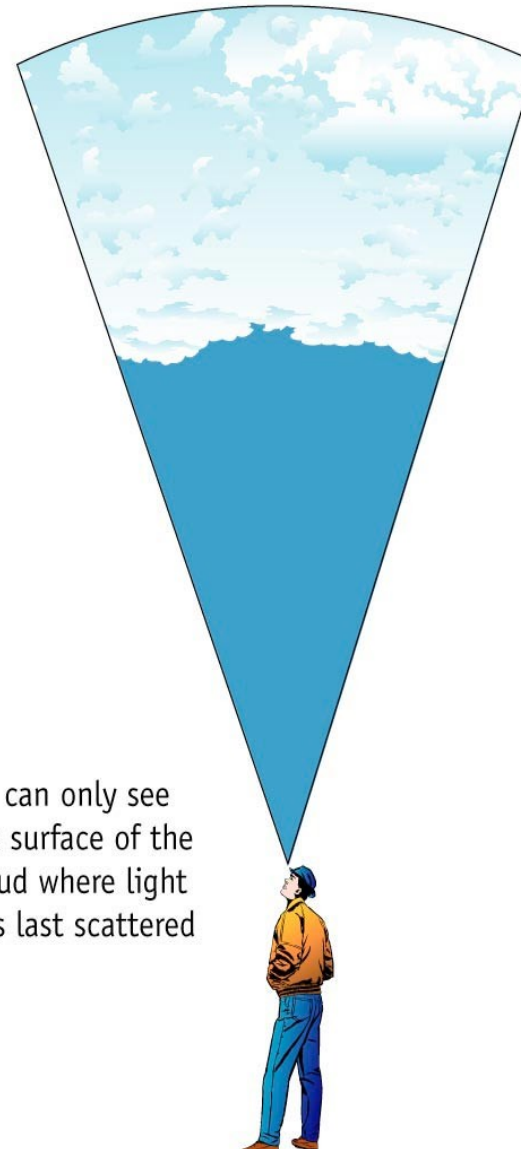
Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope



# Reliktní záření



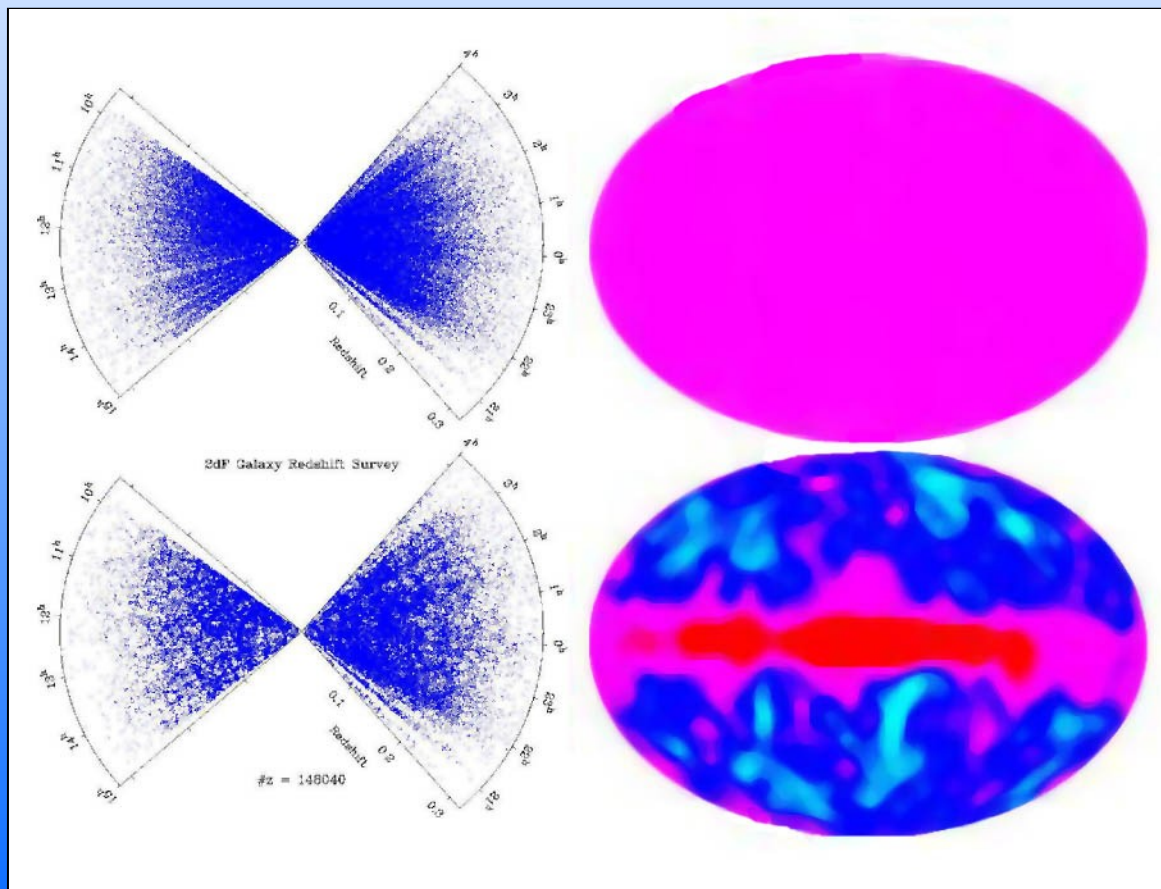
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



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:



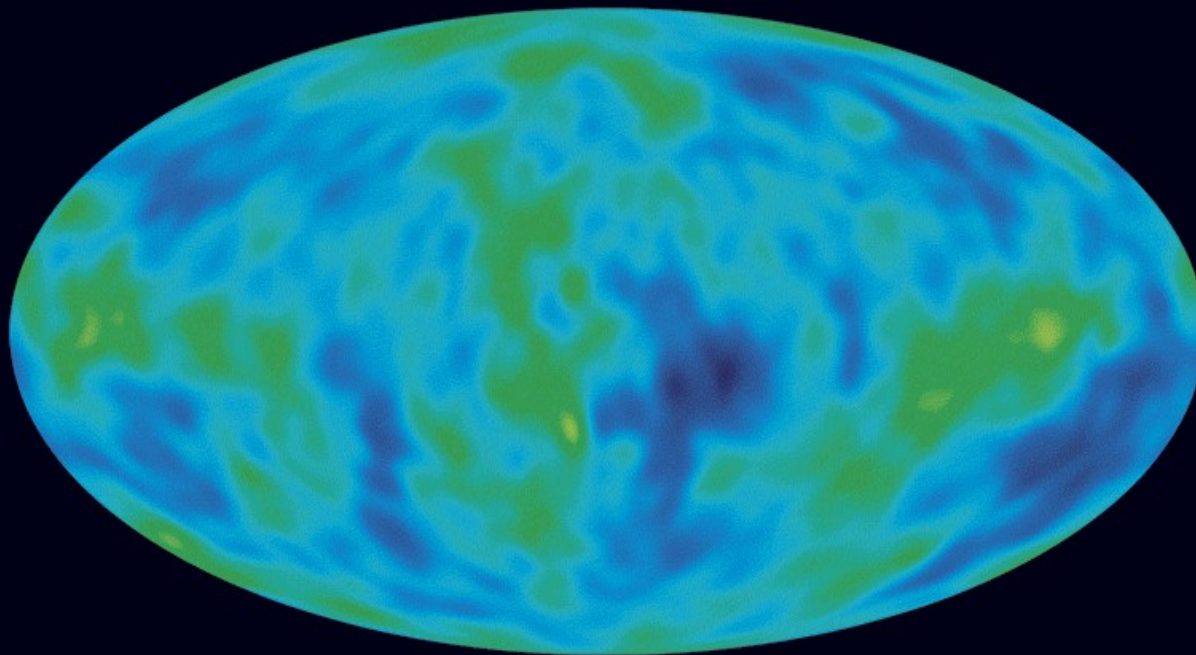


# Měření teplotních fluktuací reliktního záření

- 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**, finální výsledky za 7 let měření
- 14. května 2009 odstartovala a od 13. srpna 2009 sbírá data sonda **PLANCK**, která přinese opět další zpřesnění – data byla zveřejněna počátkem v březnu 2013, v lednu 2012 již došlo chladicí médium jednomu z přístrojů sondy

# Měření teplotních fluktuací reliktního záření – COBE vs. WMAP

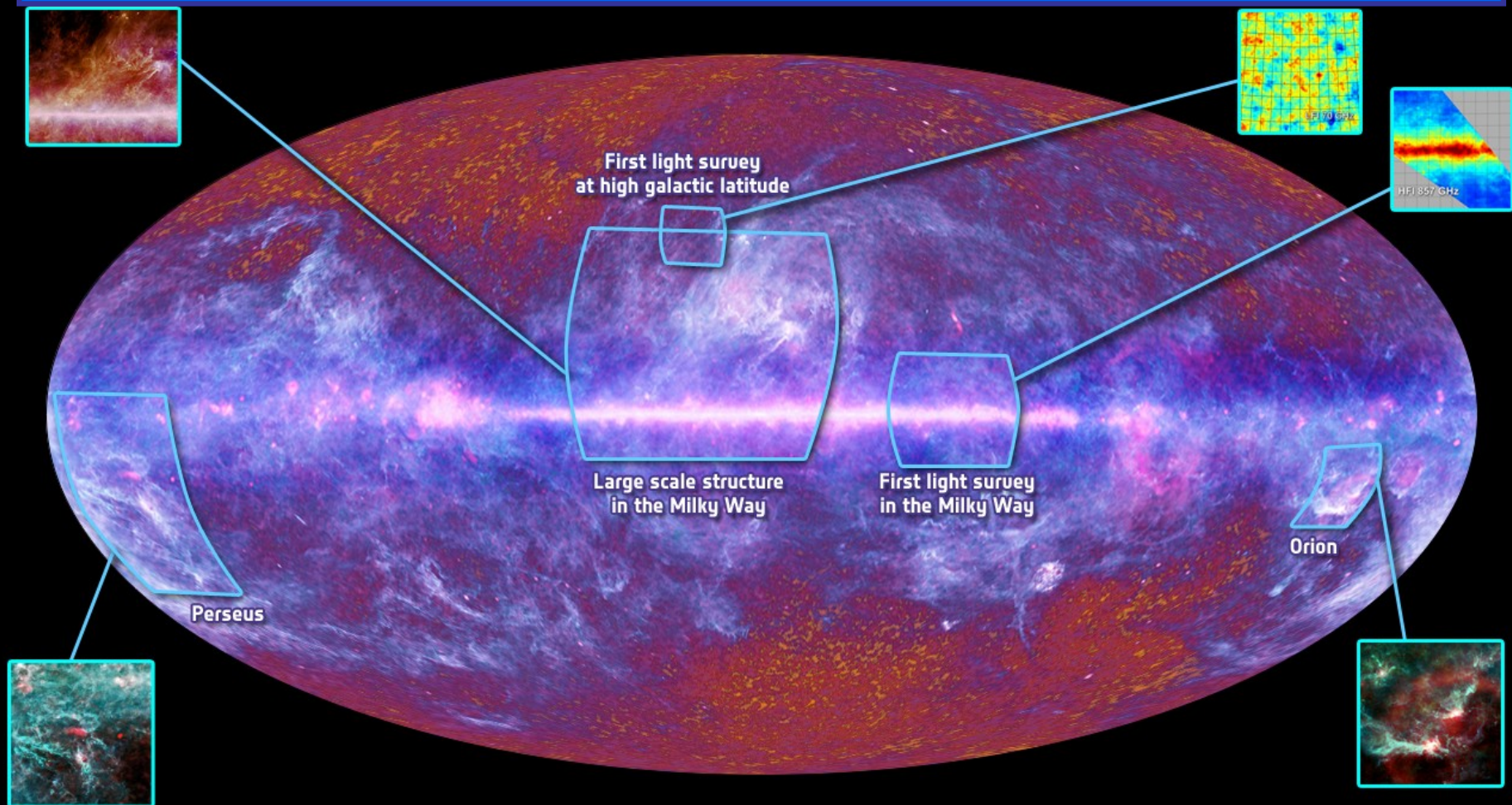
National Aeronautics and Space Administration



**COBE**

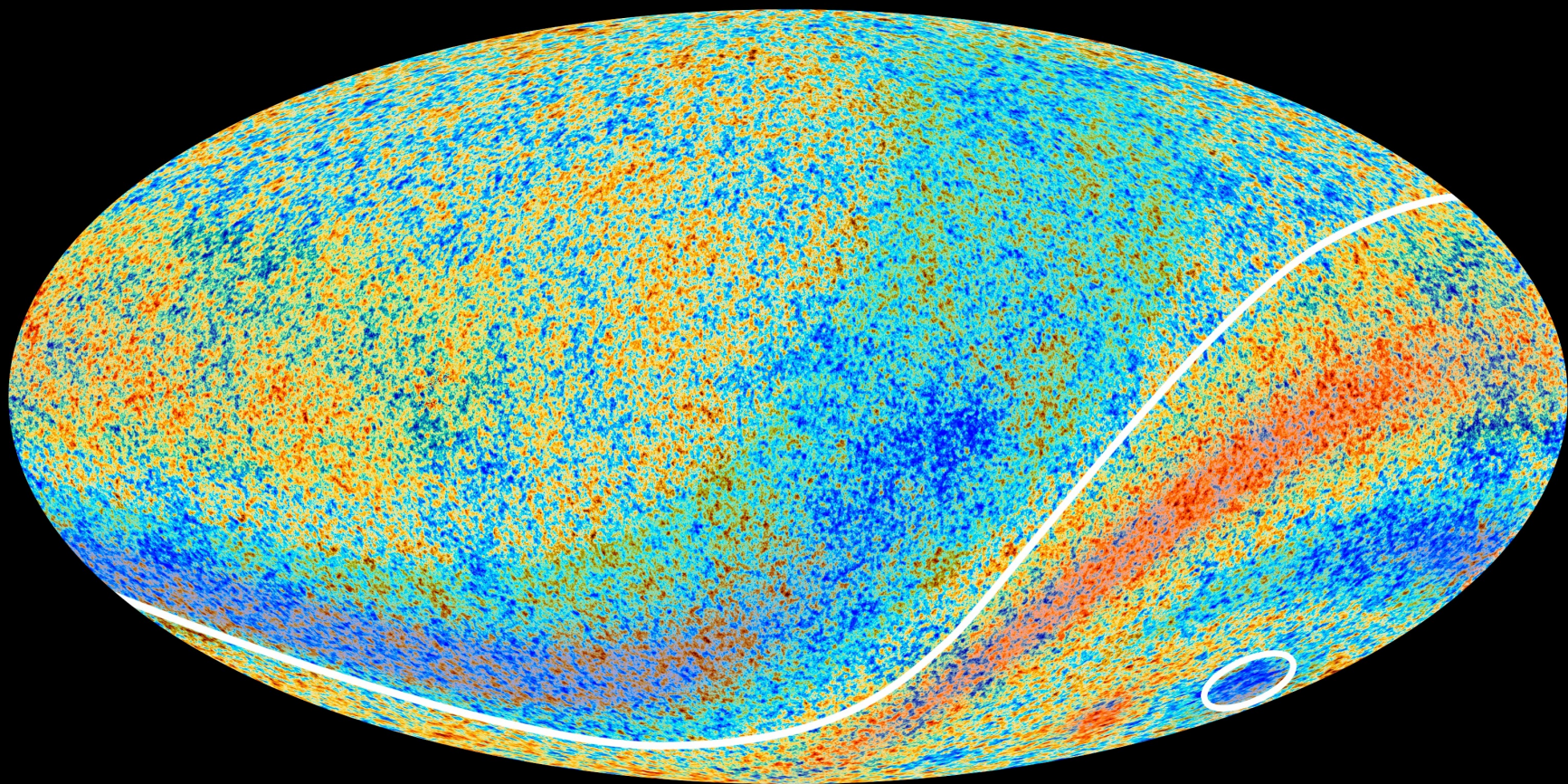
[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

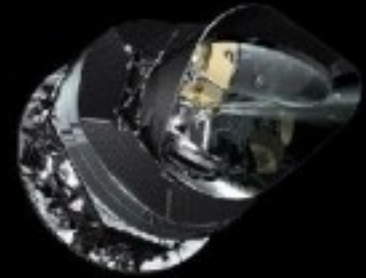
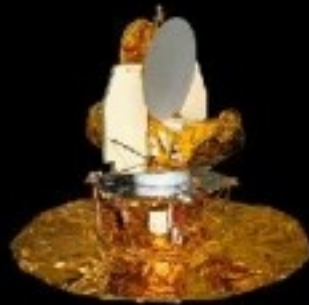
# První výsledky sondy PLANCK



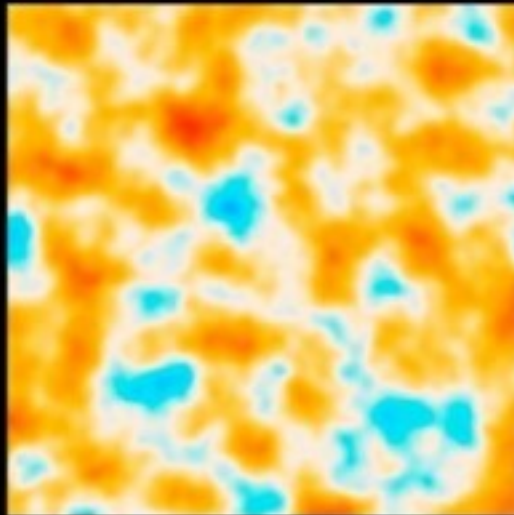
6. července 2010



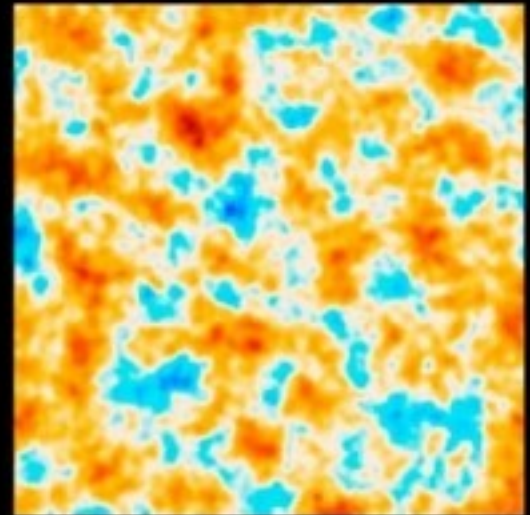




COBE



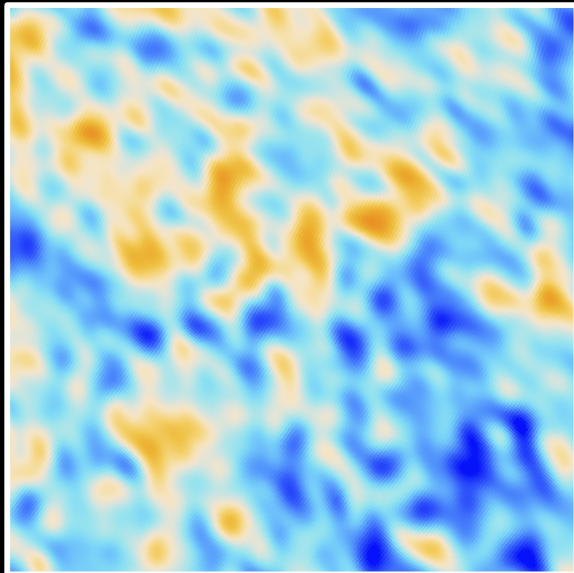
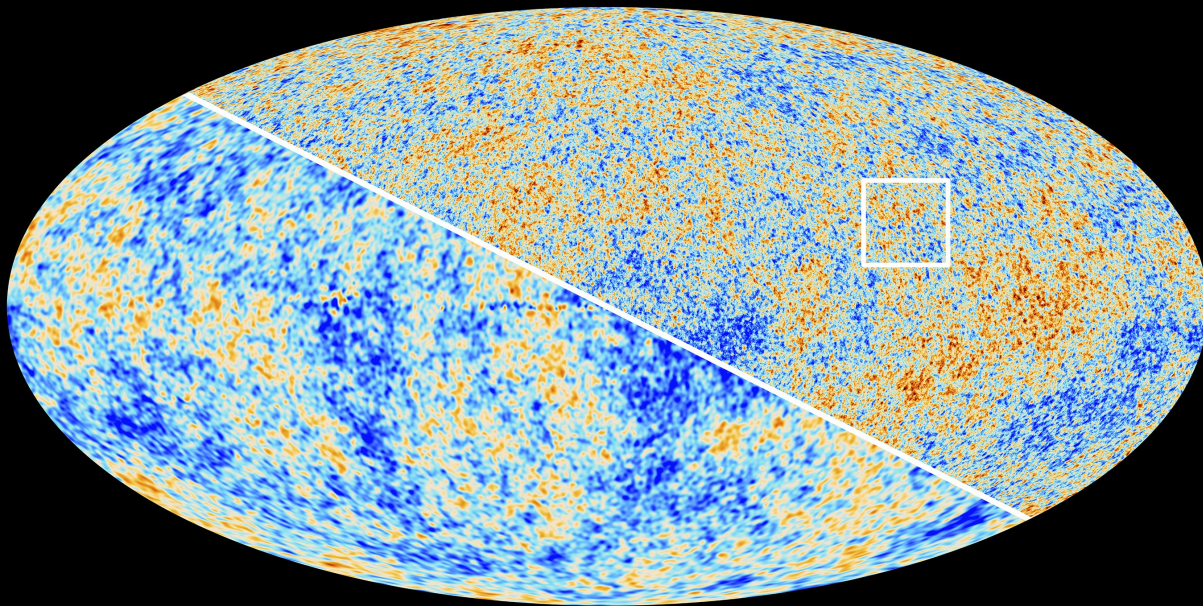
WMAP



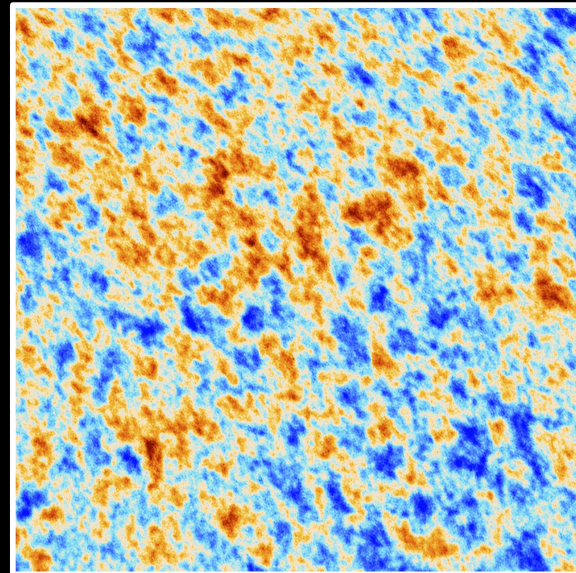
Planck



*The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP*

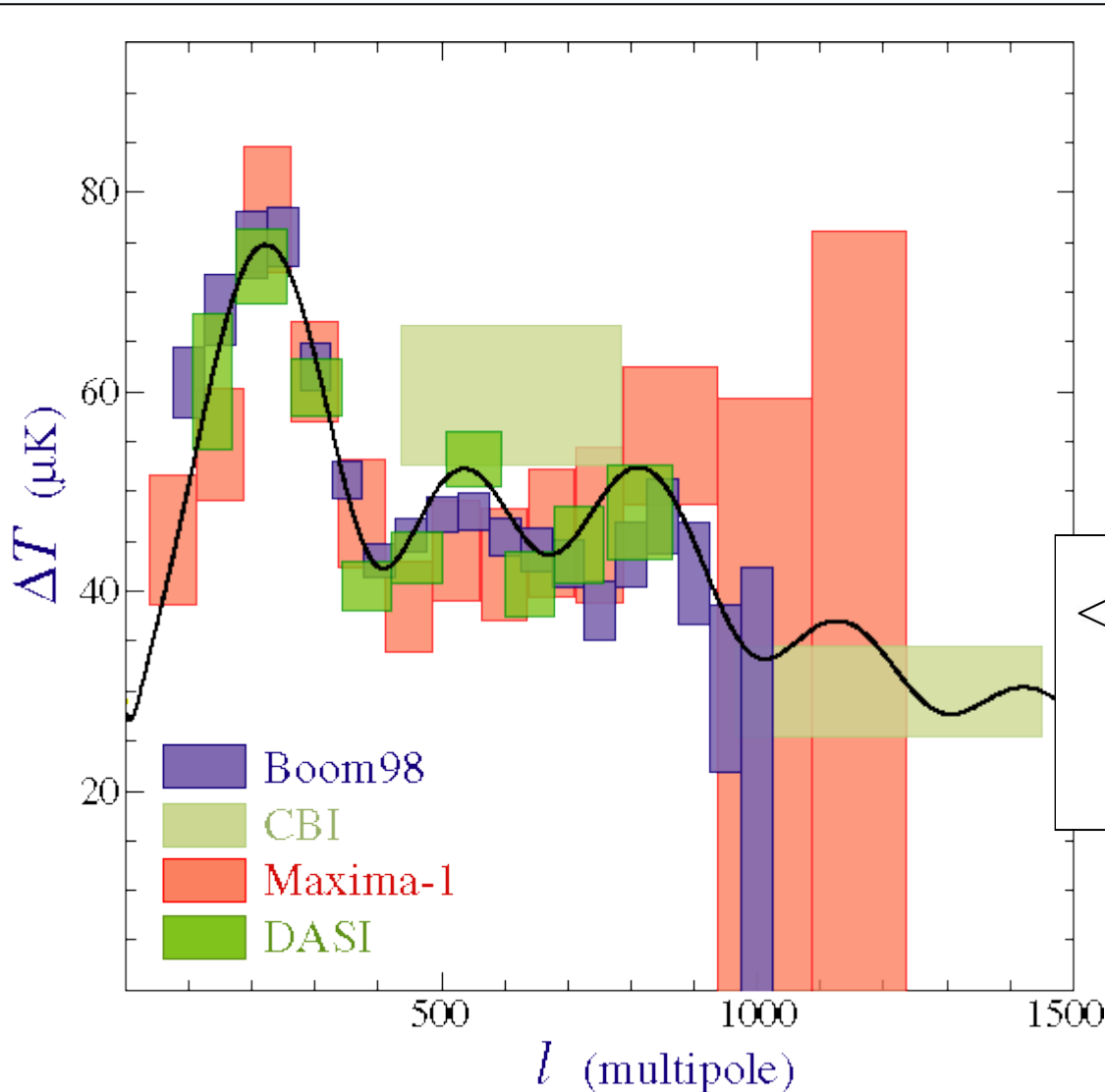


*WMAP*



*Planck*

# Multipólový rozvoj



- rozvíňme do kulových funkcí:

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

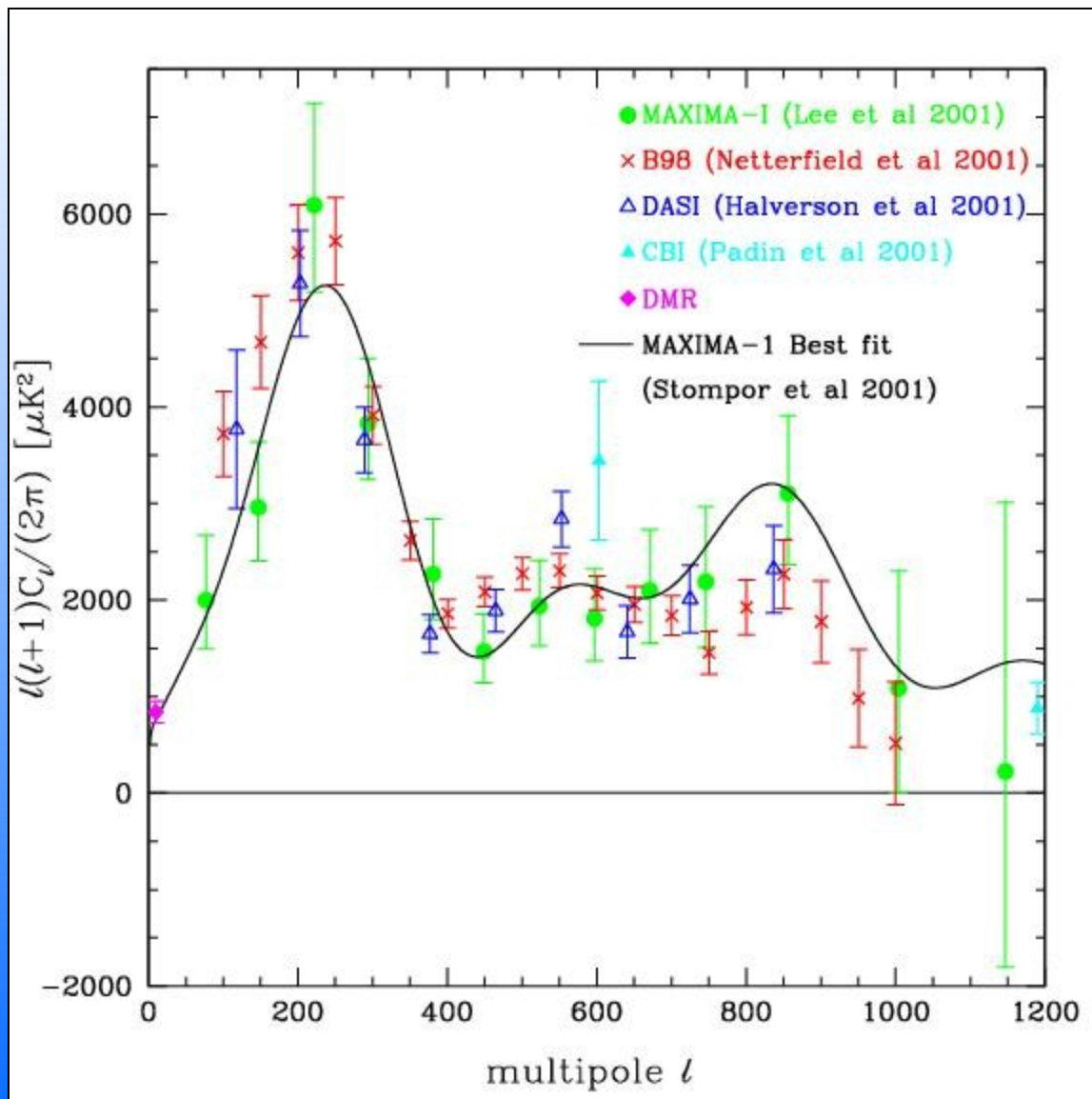
- dvoubodová korelační funkce může být rozvinuta do Legendrových polynomů

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

- 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 ( $H_{\text{CMB}}^{-1}$ ), 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

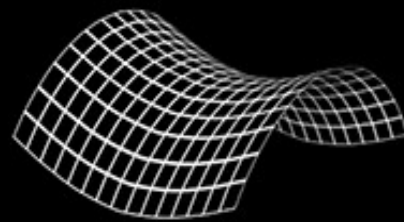
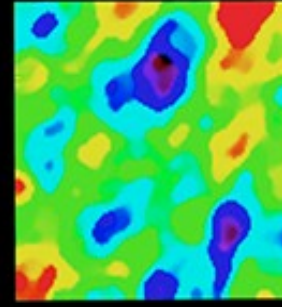
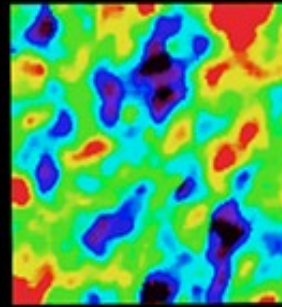
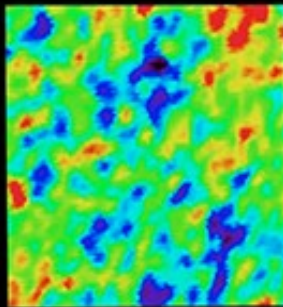
zhruba platí  $l_{\text{peak}} \sim 220 \Omega^{-1/2}$

poloha druhého peaku (kolem  $l \sim 400$ ) je citlivá na hustotu baryonů

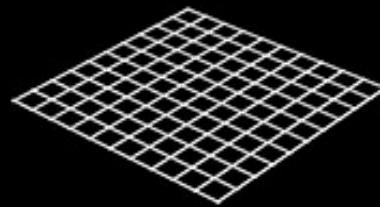


# Multipólový rozvoj

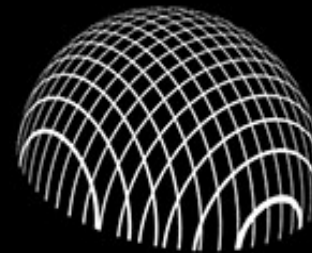
## GEOMETRY OF THE UNIVERSE



**OPEN**

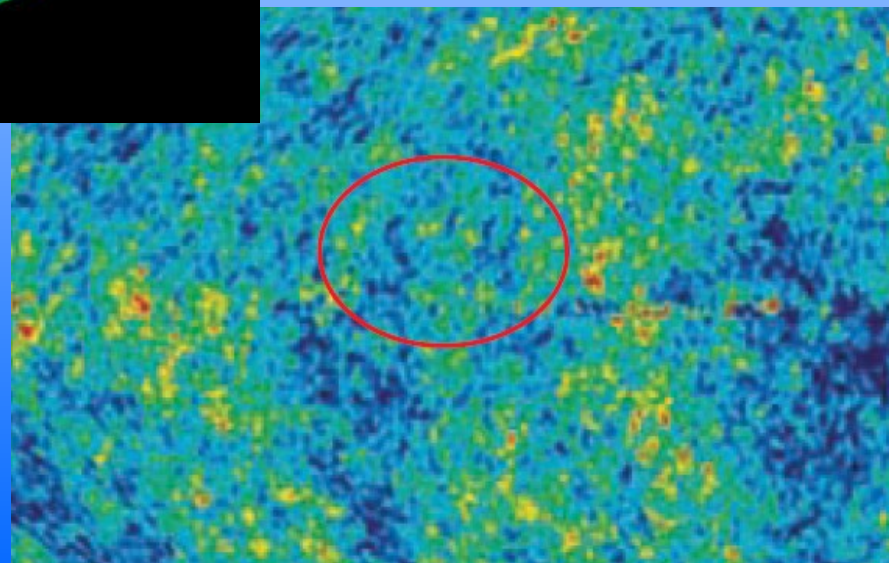
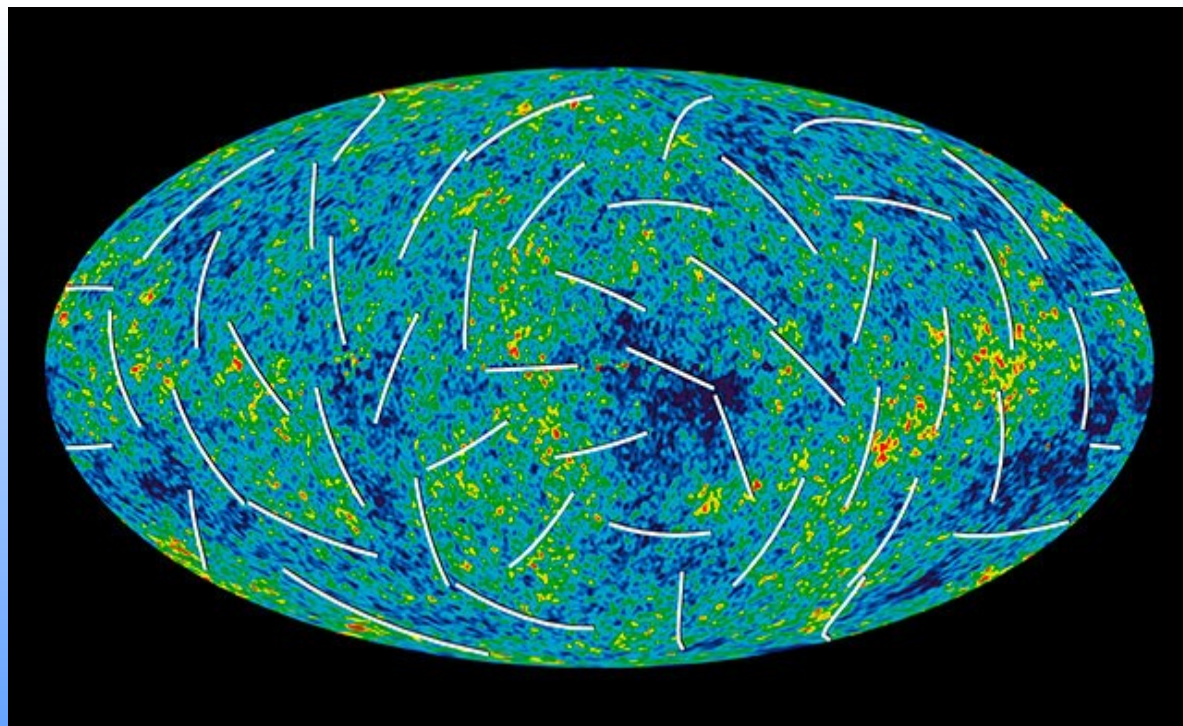


**FLAT**



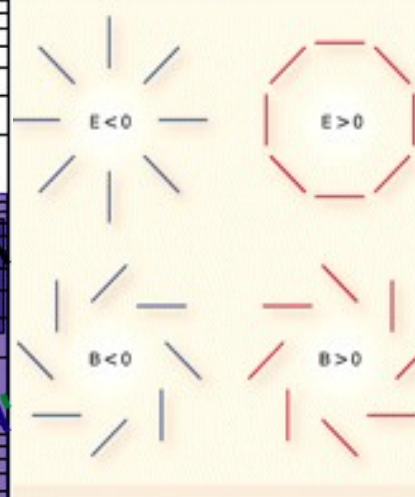
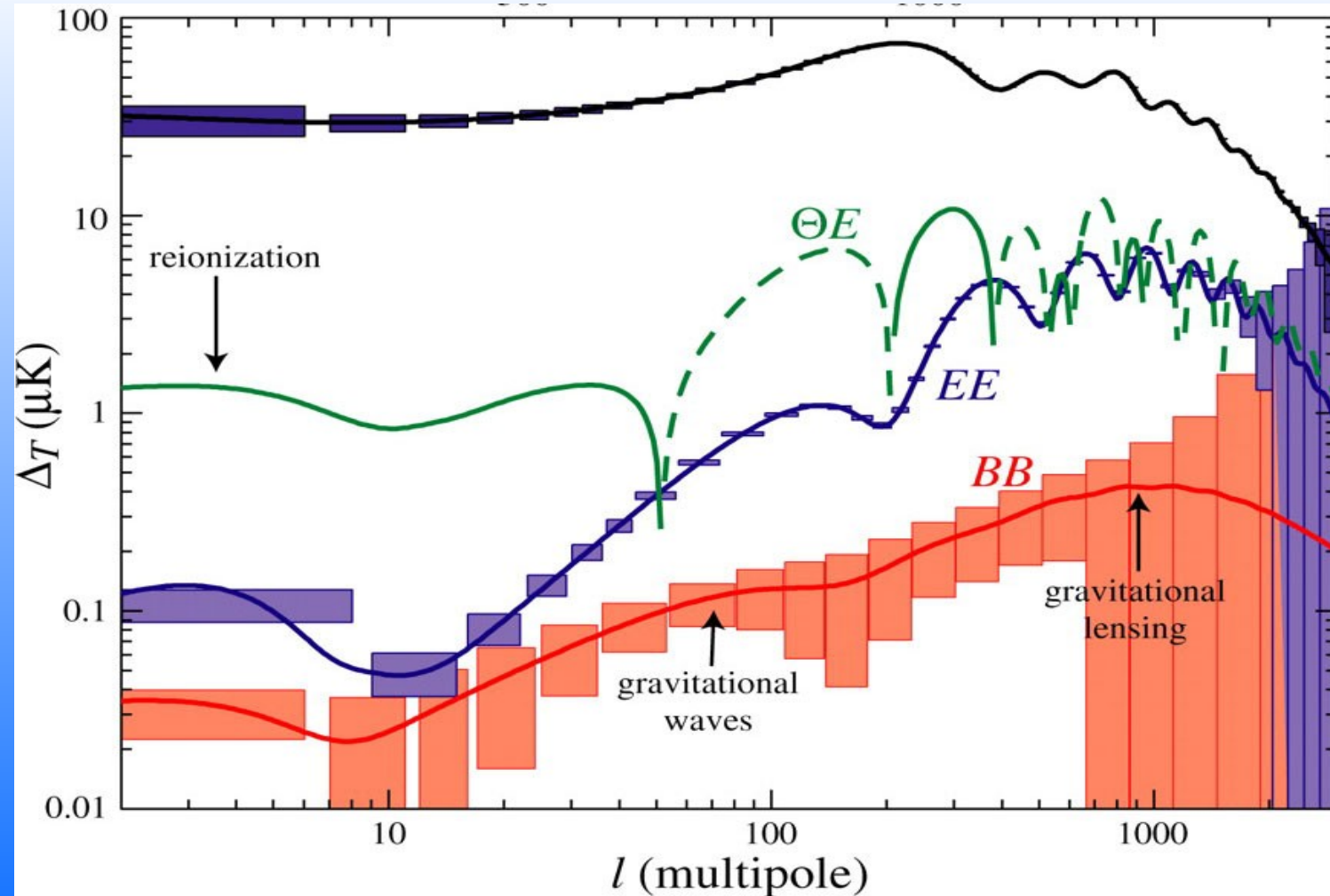
**CLOSED**

# Polarizace a rafinovanosti CMB

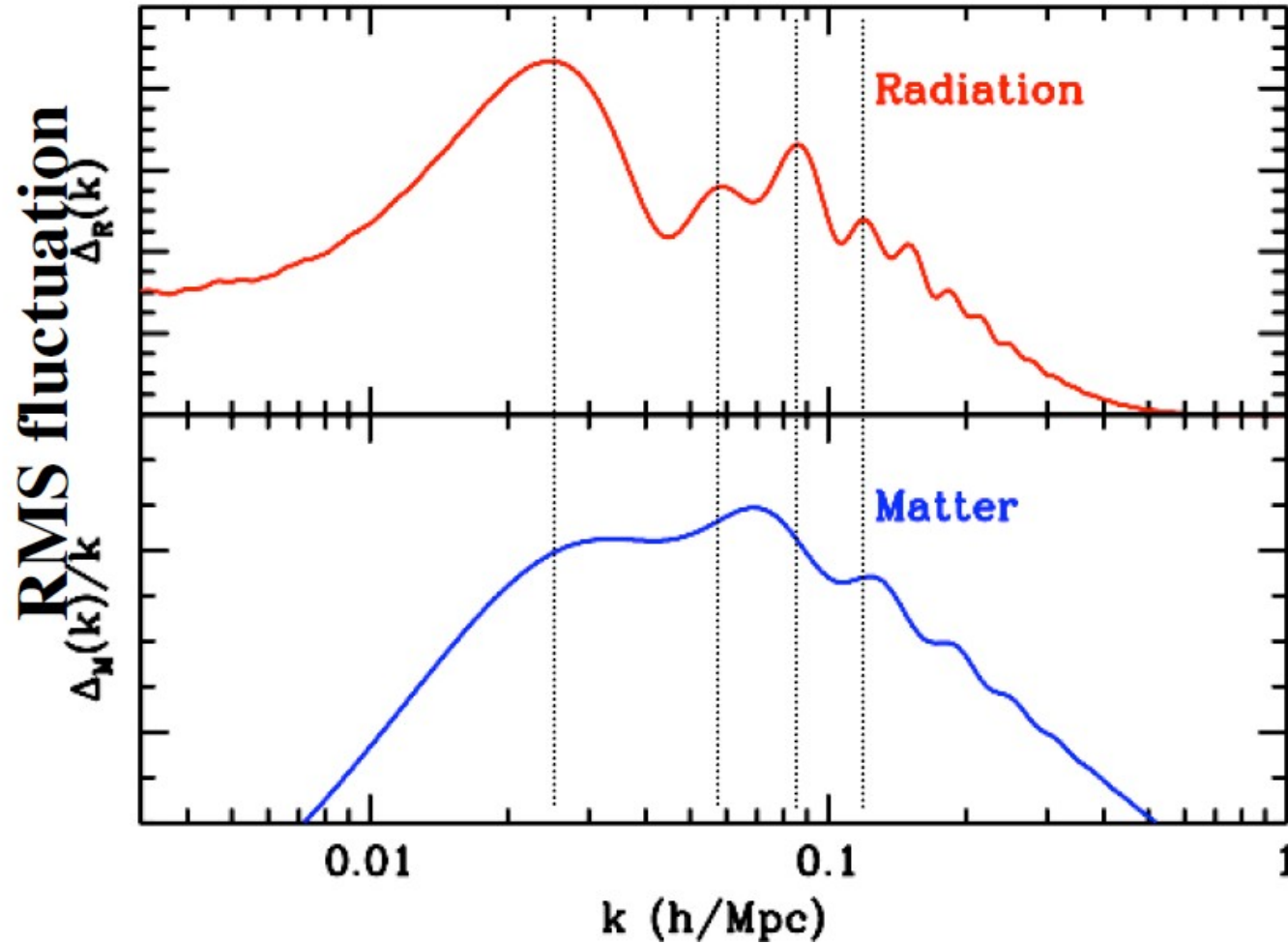




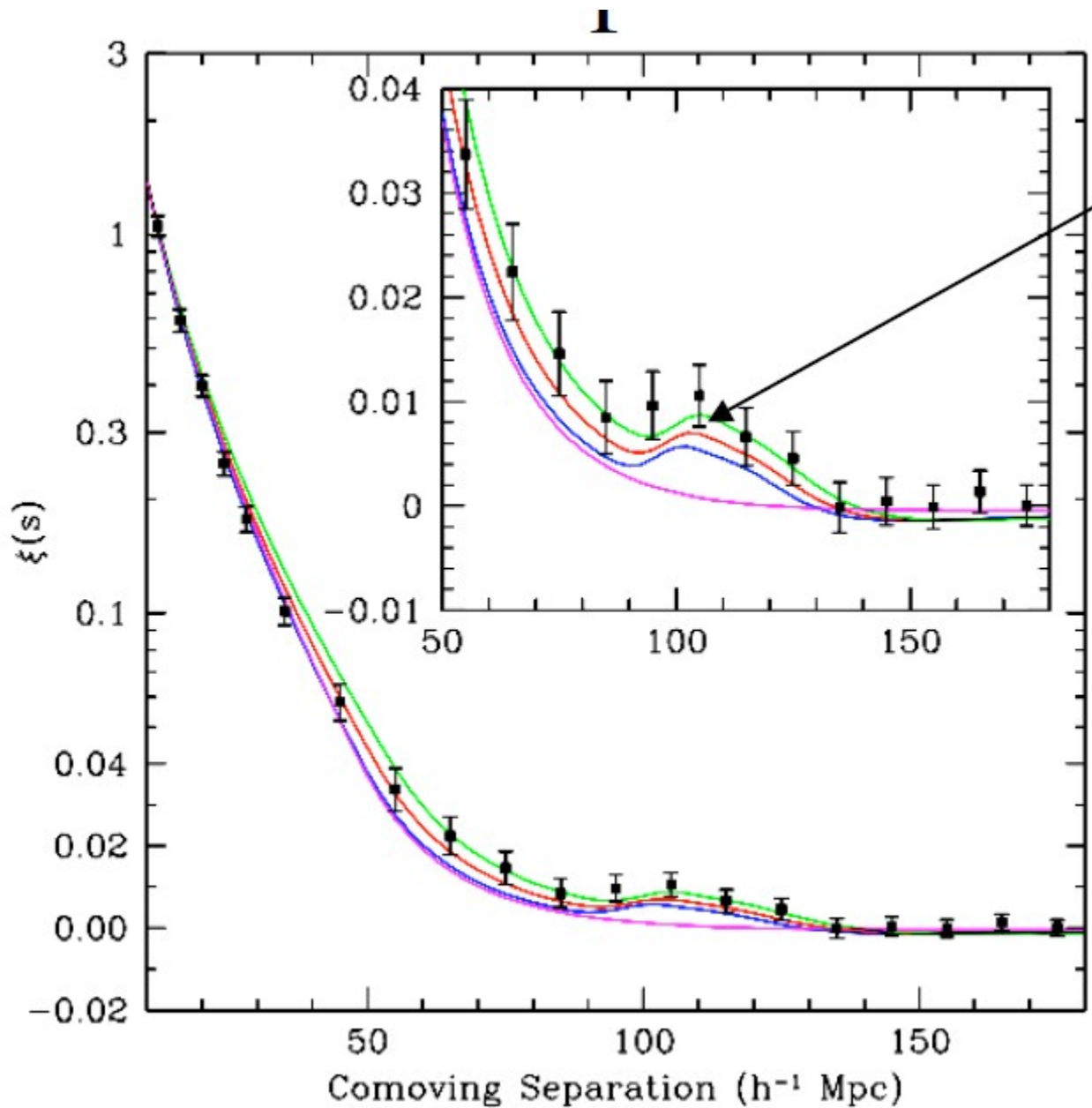
# Polarizace CMB



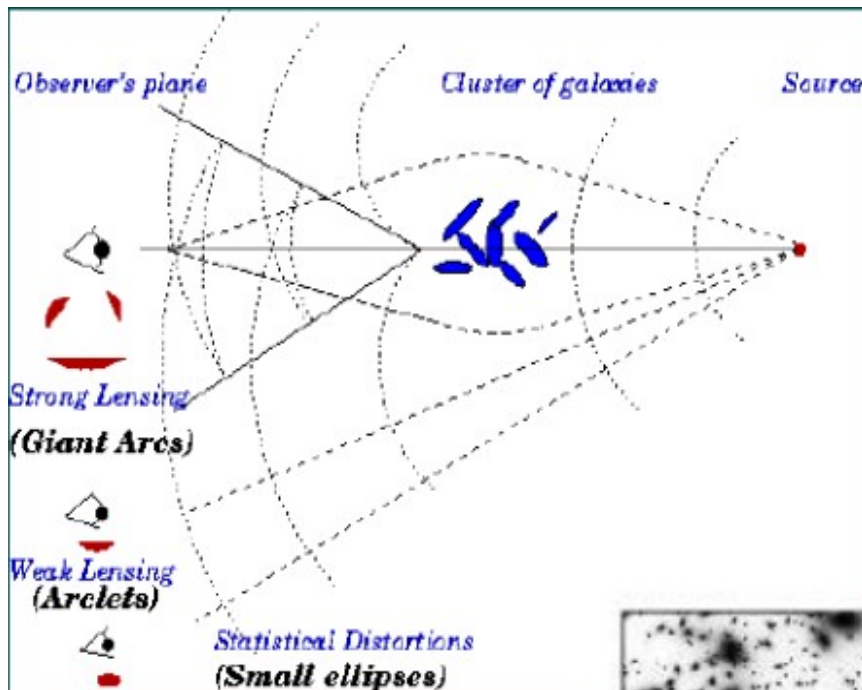
# Baryonové akustické oscilace



# SDSS a další přehlídky vidí BAO



# Gravitační čočkování

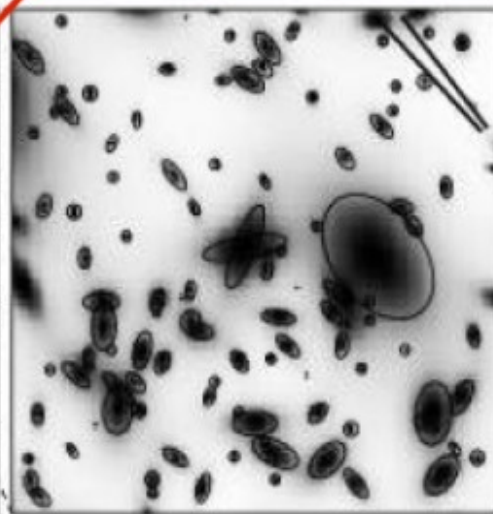
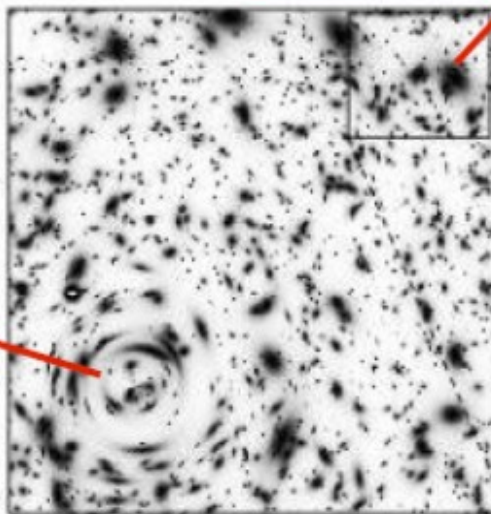


- deflection of light around massive objects

- sensitive to all mass not just luminous matter!

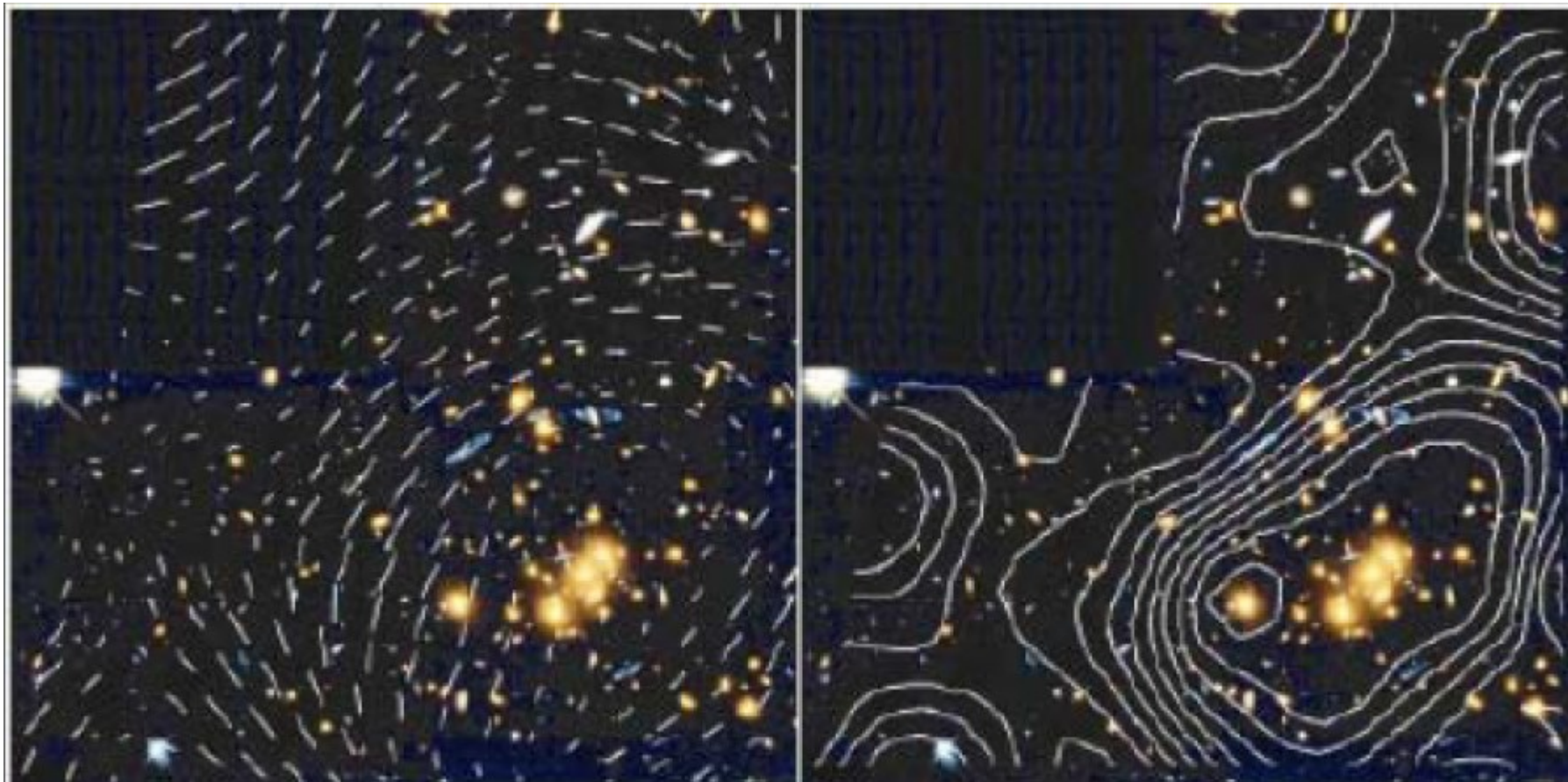
Weak Lensing Regime

Strong Lensing Regime





# Slabé čočkování a “shear”





# Gravitační čočkování

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



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

STScI-PRC07-17b

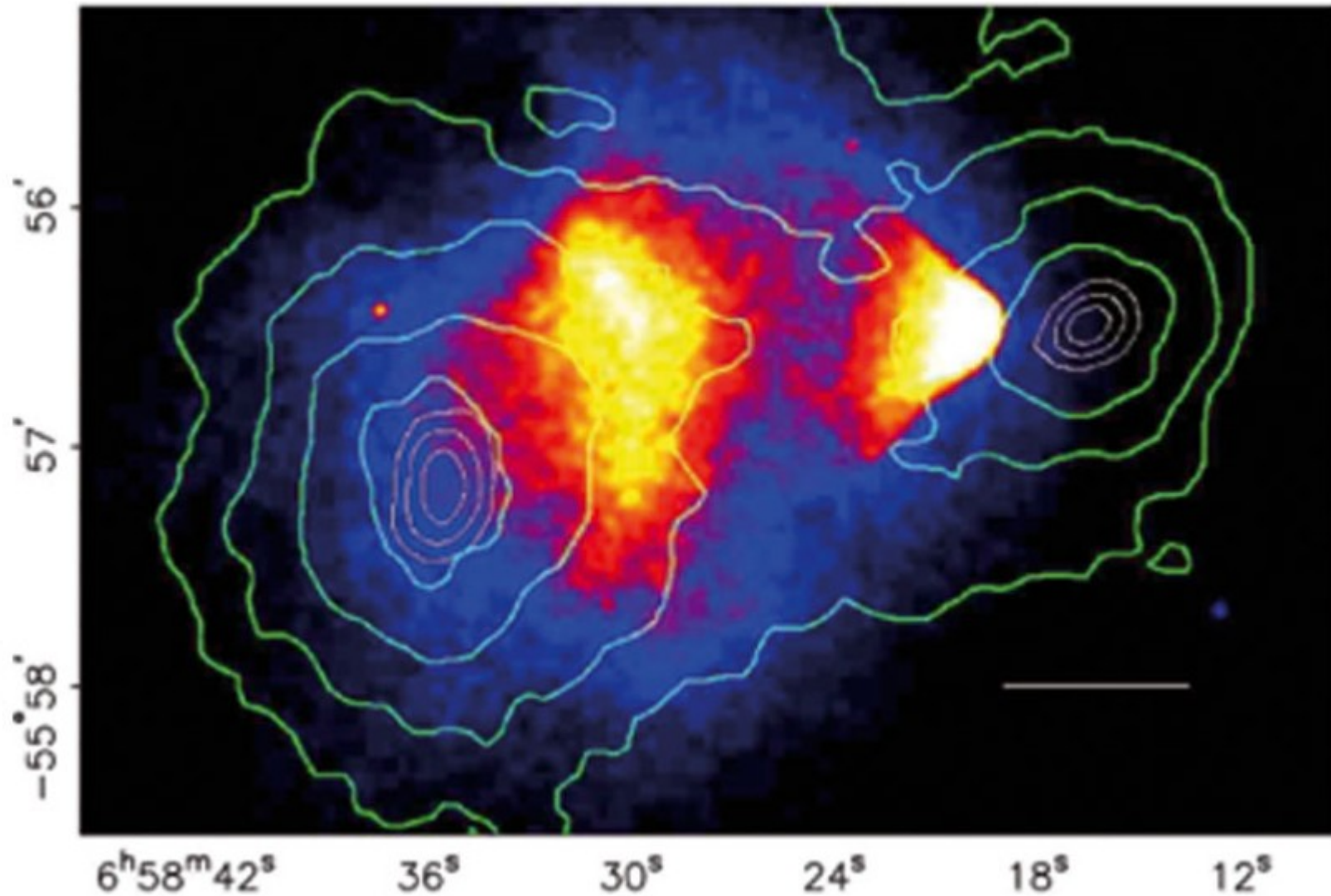
Dark Matter Ring in Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652) HST • ACS/WFC



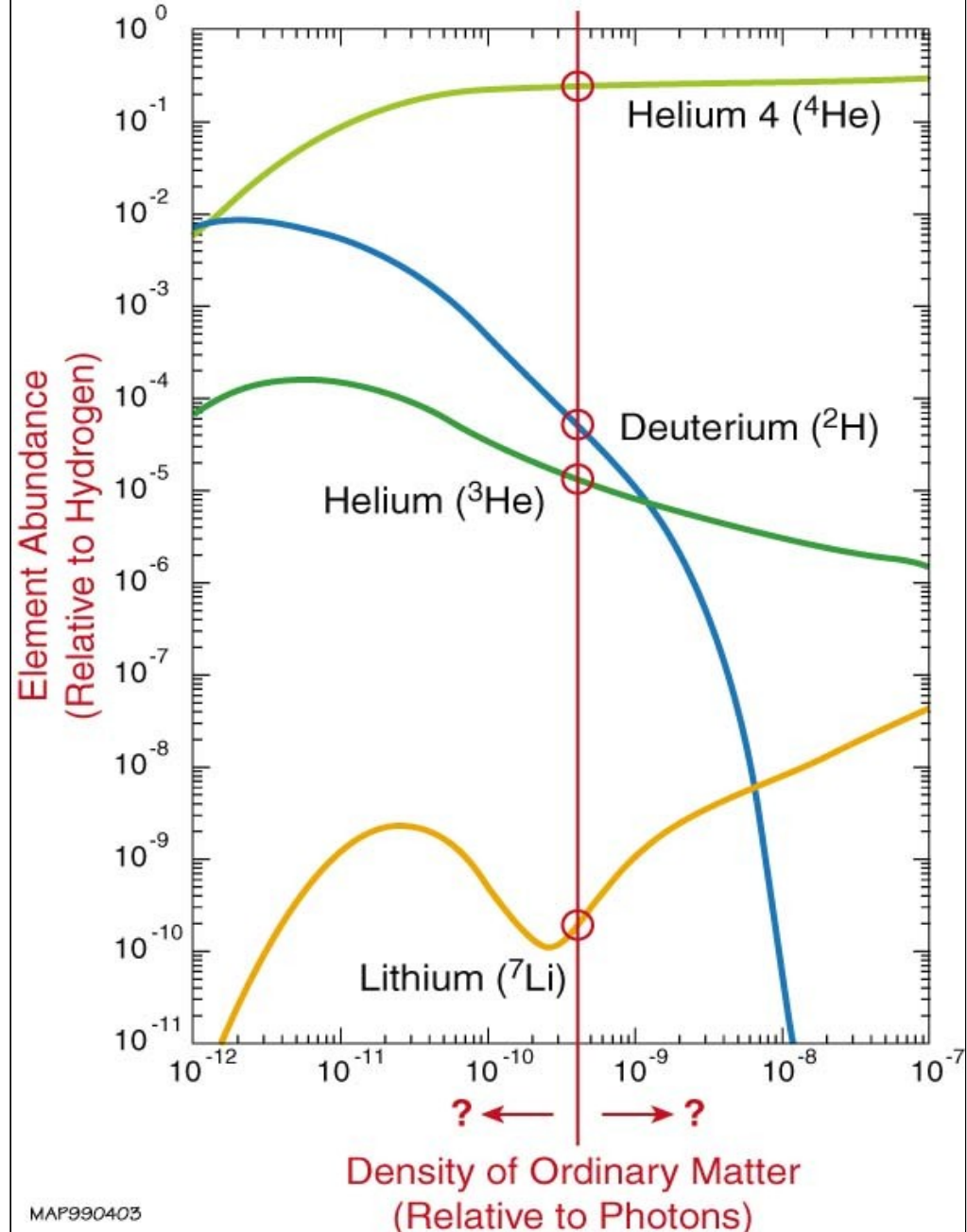
NASA, ESA, and M.J. Jee (Johns Hopkins University)

STScI-PRC07-17b

# „Bullet cluster” 1E0657-558



# Primordiální nukleosyntéza



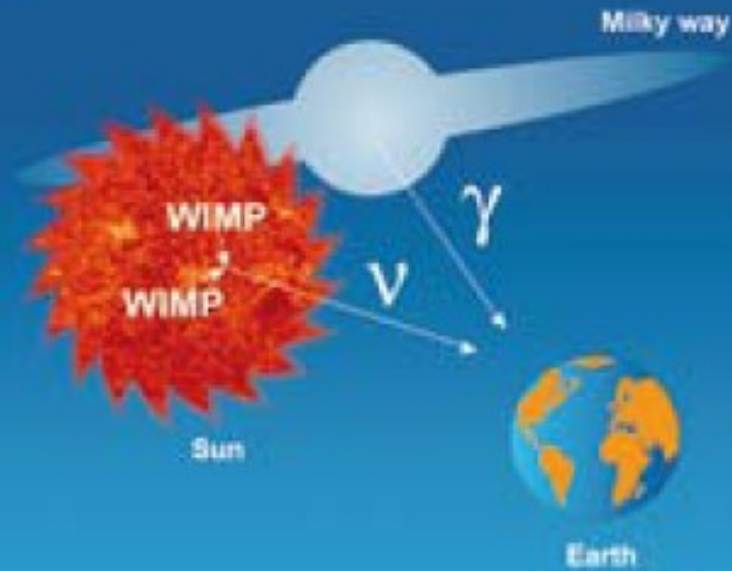


# Dark matter search strategies

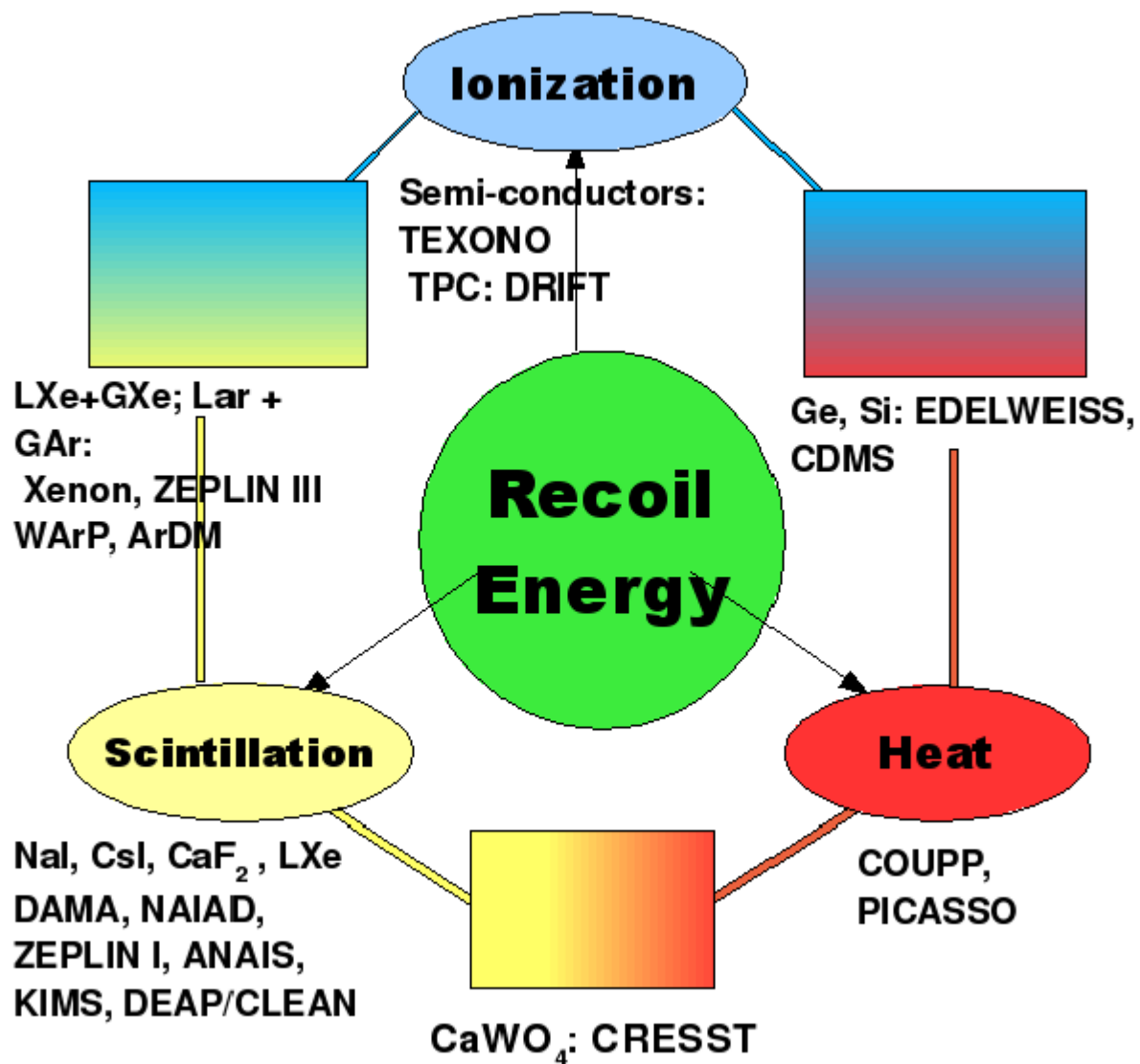
1. Direct detection >



2. Indirect detection >



< 3. Production at the Large Hadron Collider



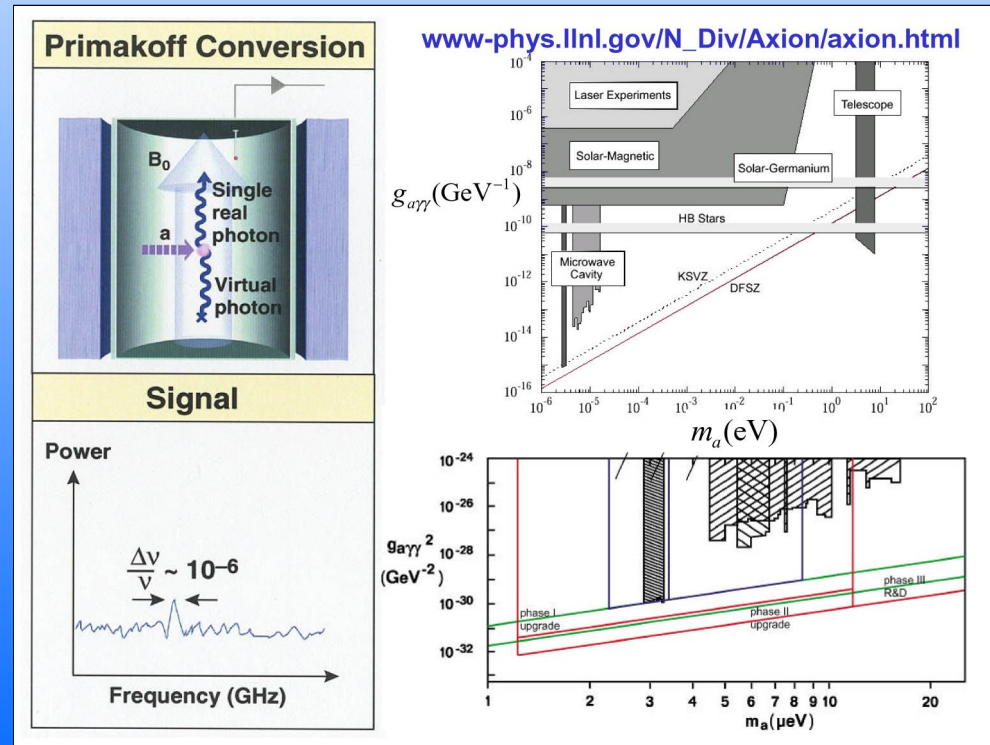


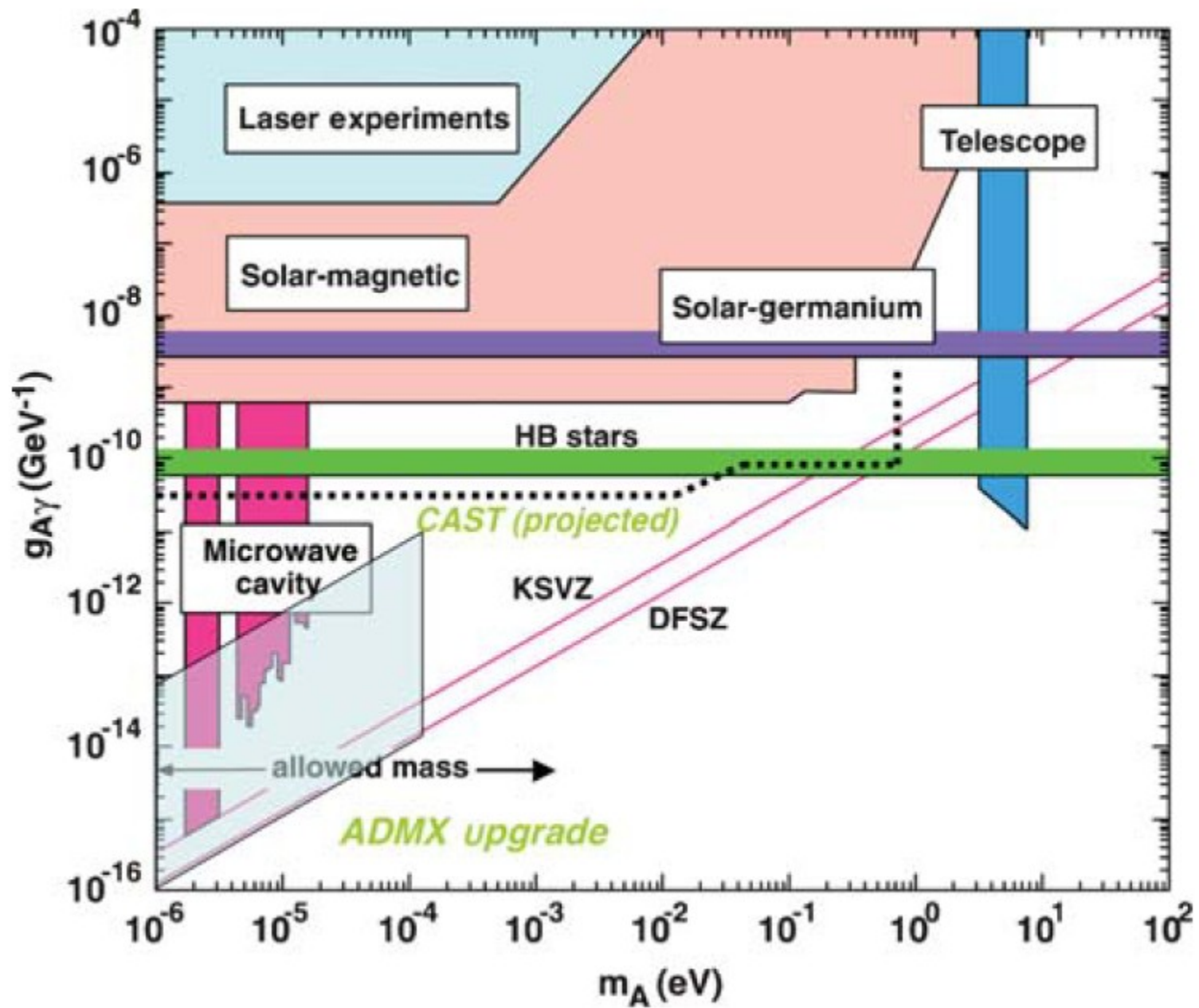
# Kandidáti nebaryonické hmoty

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

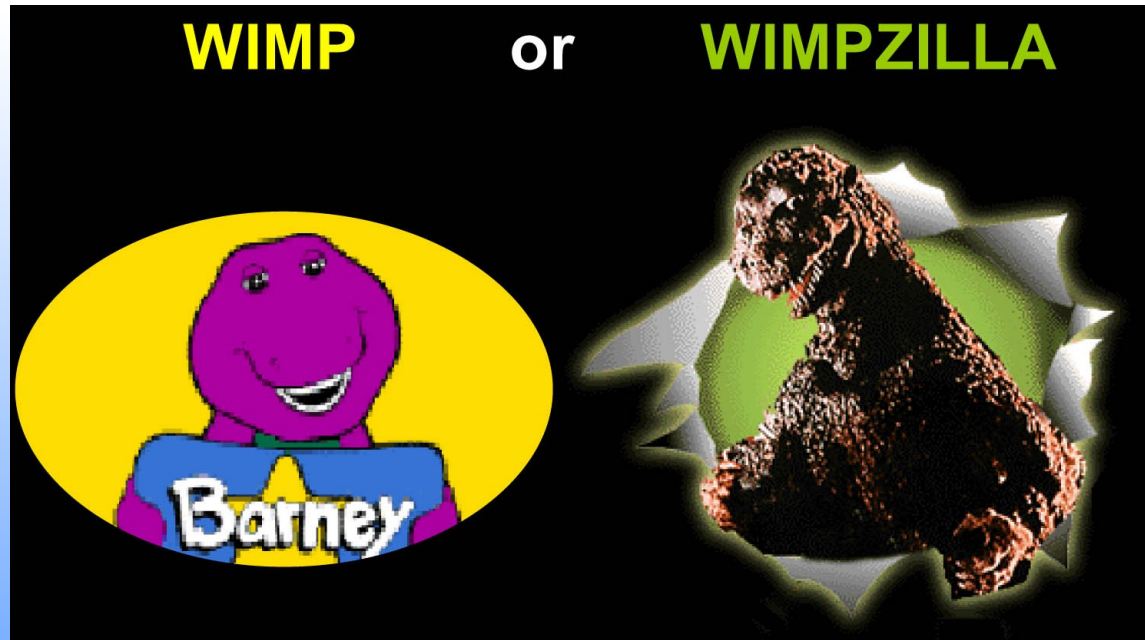




# Kandidáti nebaryonické hmoty II

- tedy zbývají  
WIMPy a WIMPZILLy

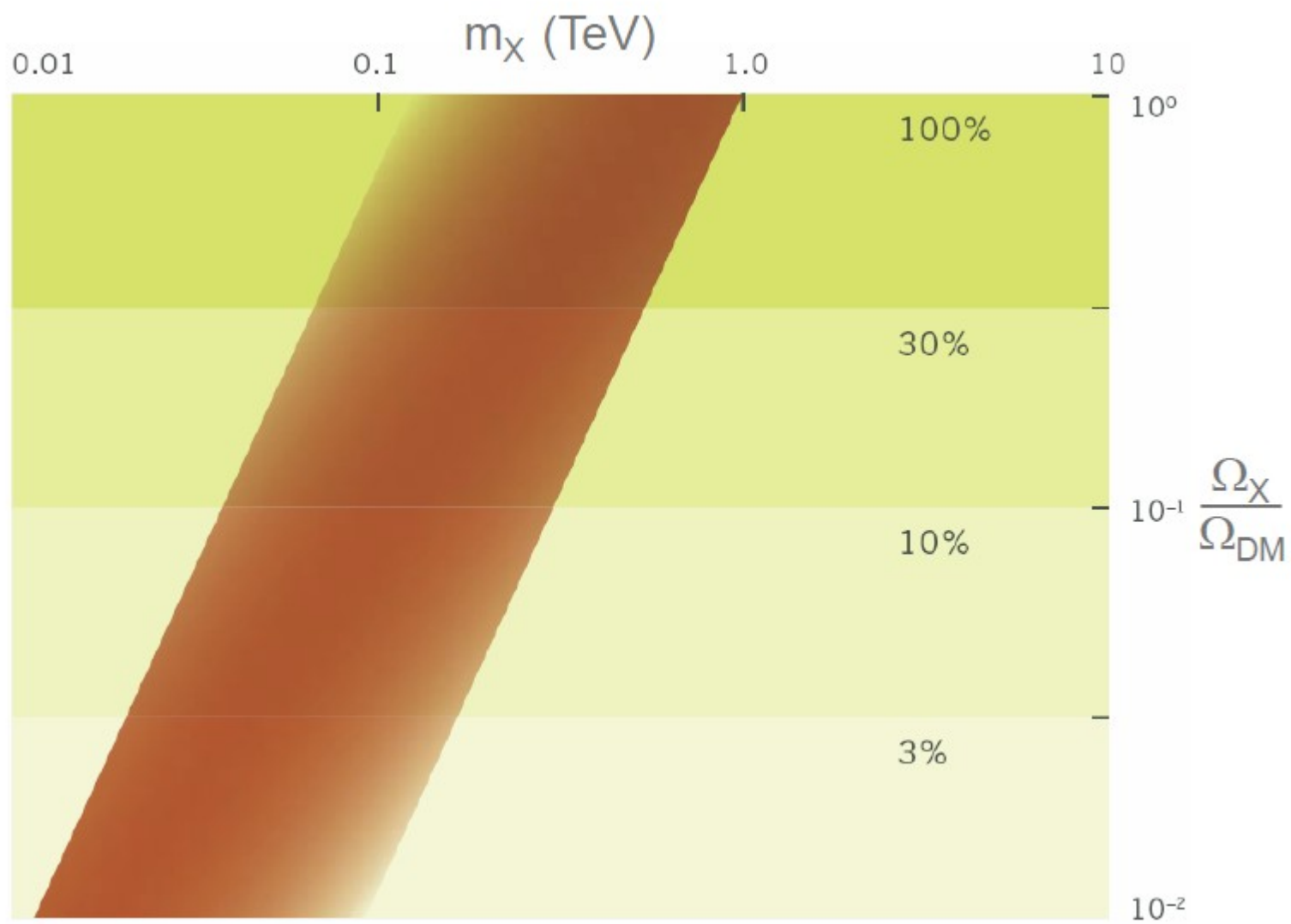
- WIMPZILLy jsou  
supermasivní WIMPy  
(klidová hmotnost  
 $10^9 - 10^{19}$  GeV)

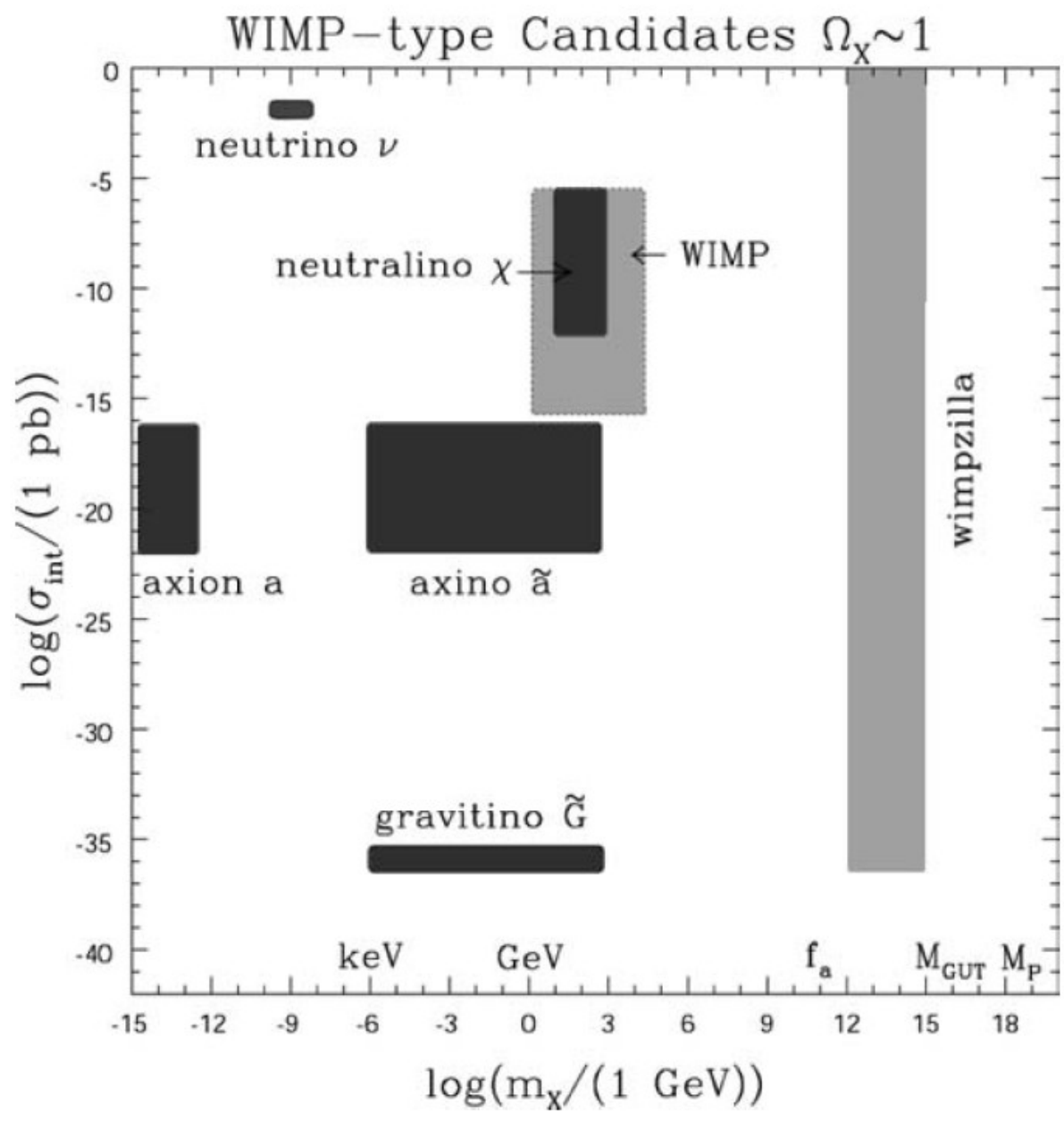


- jako nejpravděpodobnější WIMP se jeví v současnosti nejlehčí předpovězená supersymetrická částice, **neutralino**, na níž útočí jak experimentátoři (klidová hmotnost  $> 100$  GeV), tak teoretici (klidová hmotnost  $< \sim \text{TeV}$ )

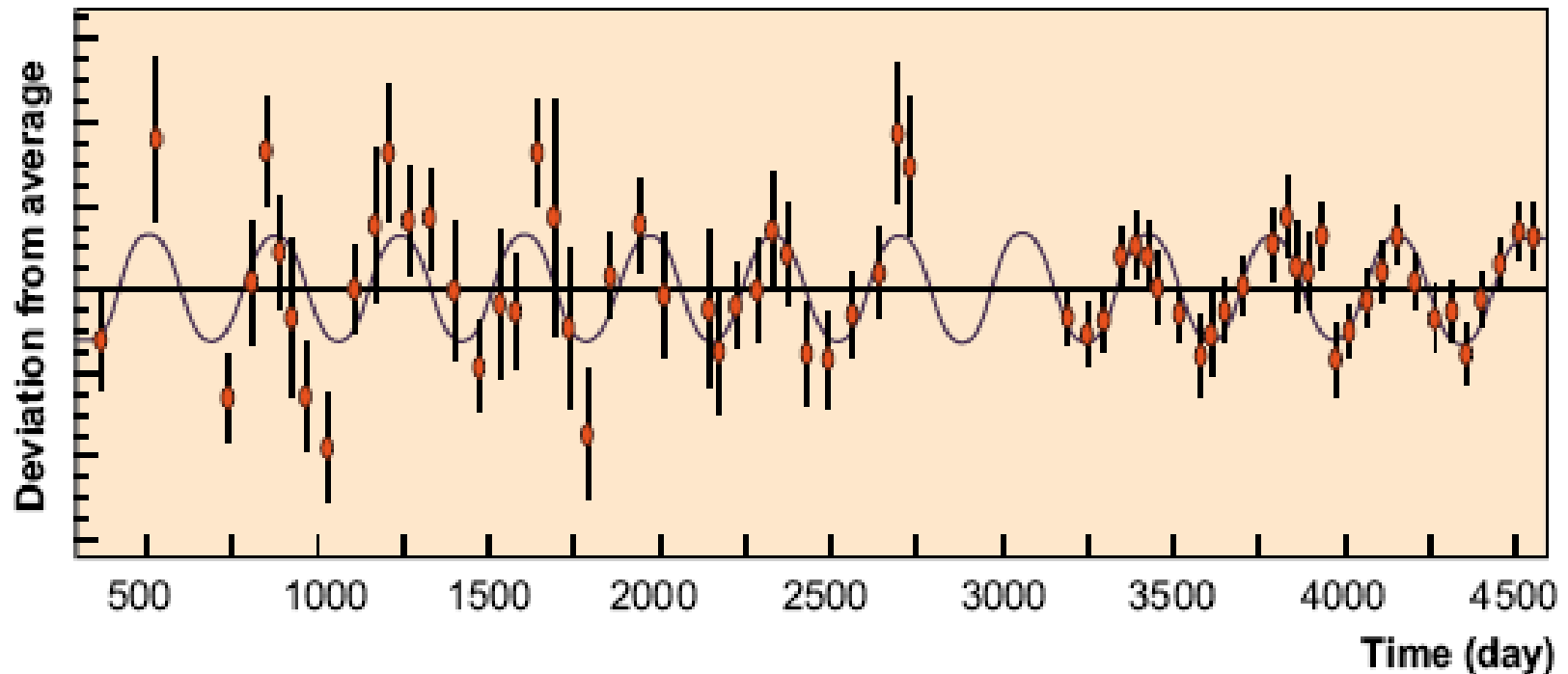
- ať tak či tak, oba typy byly patrně vytvořeny v období od konce inflace do rekombinace



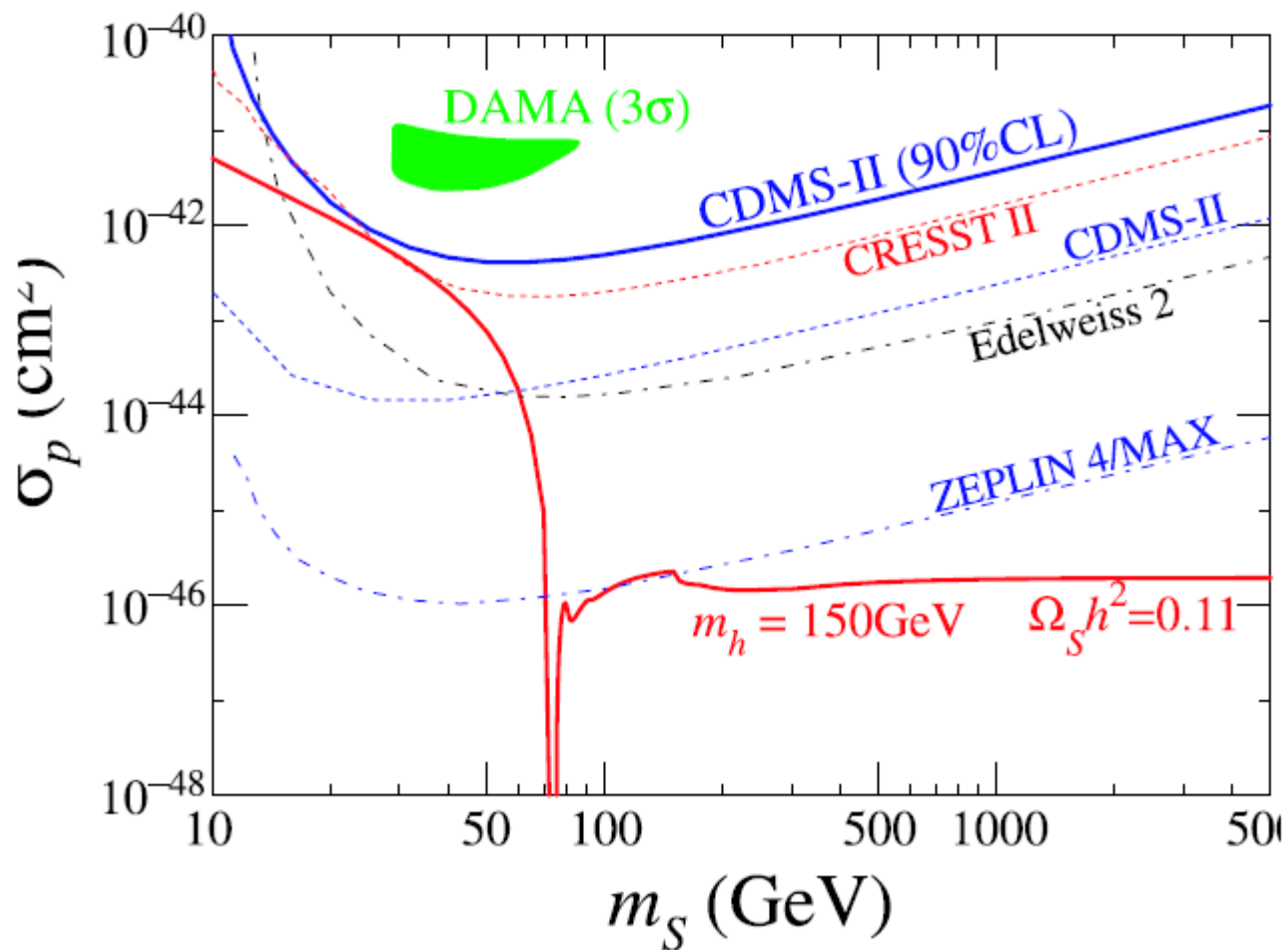


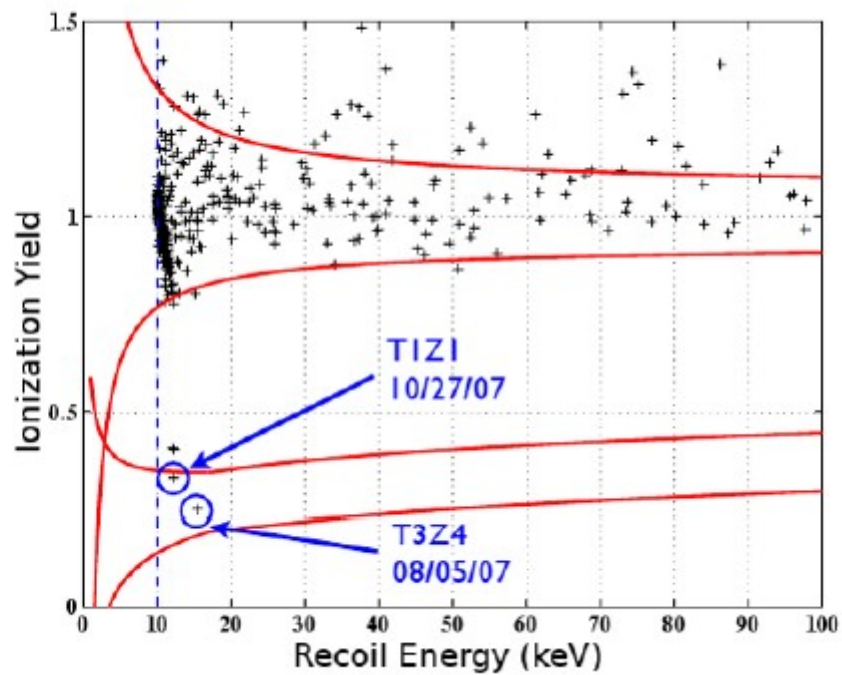
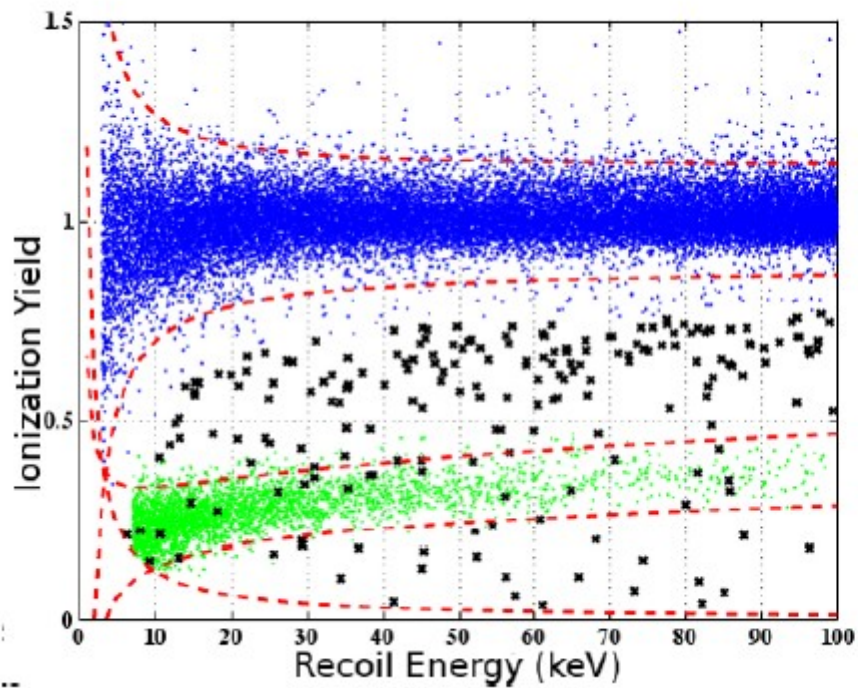


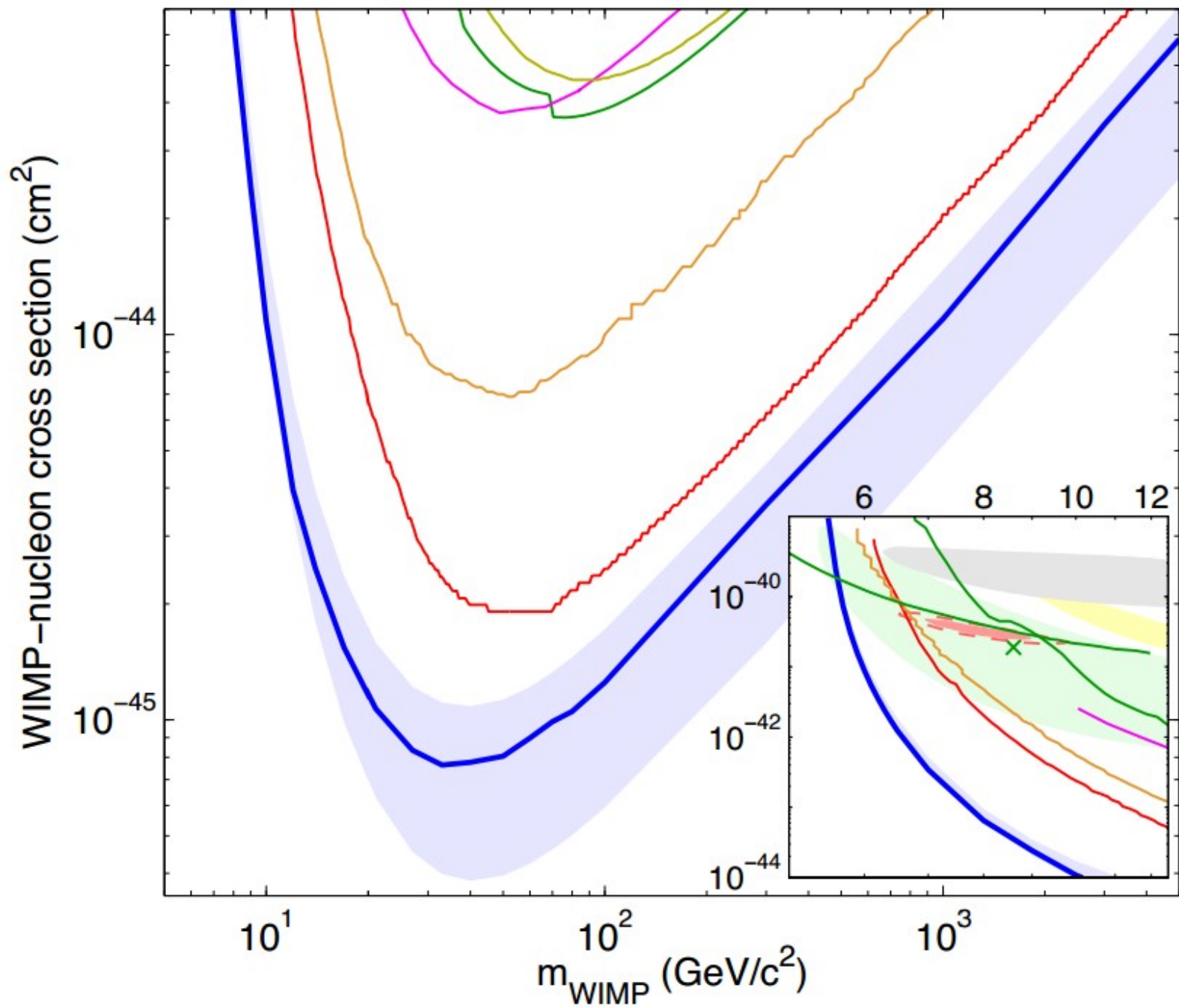
# Pozorovaná modulace v experimentu DAMA





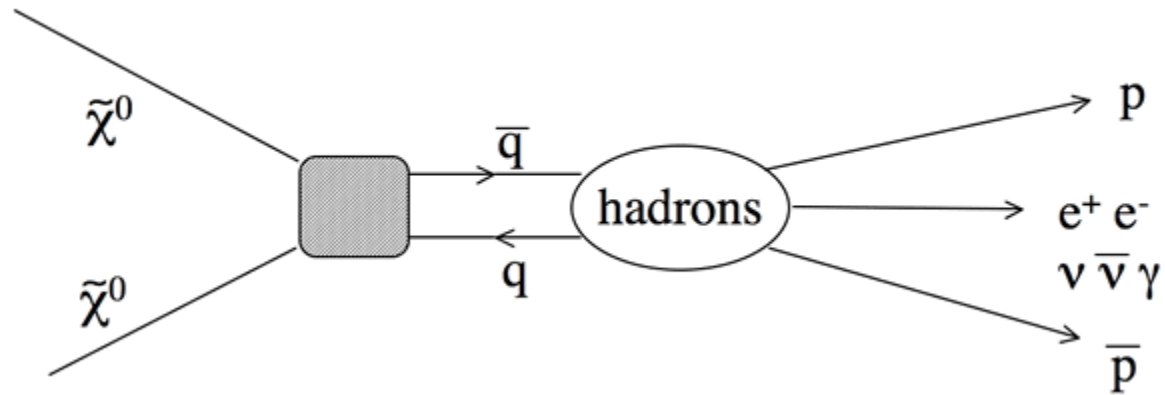


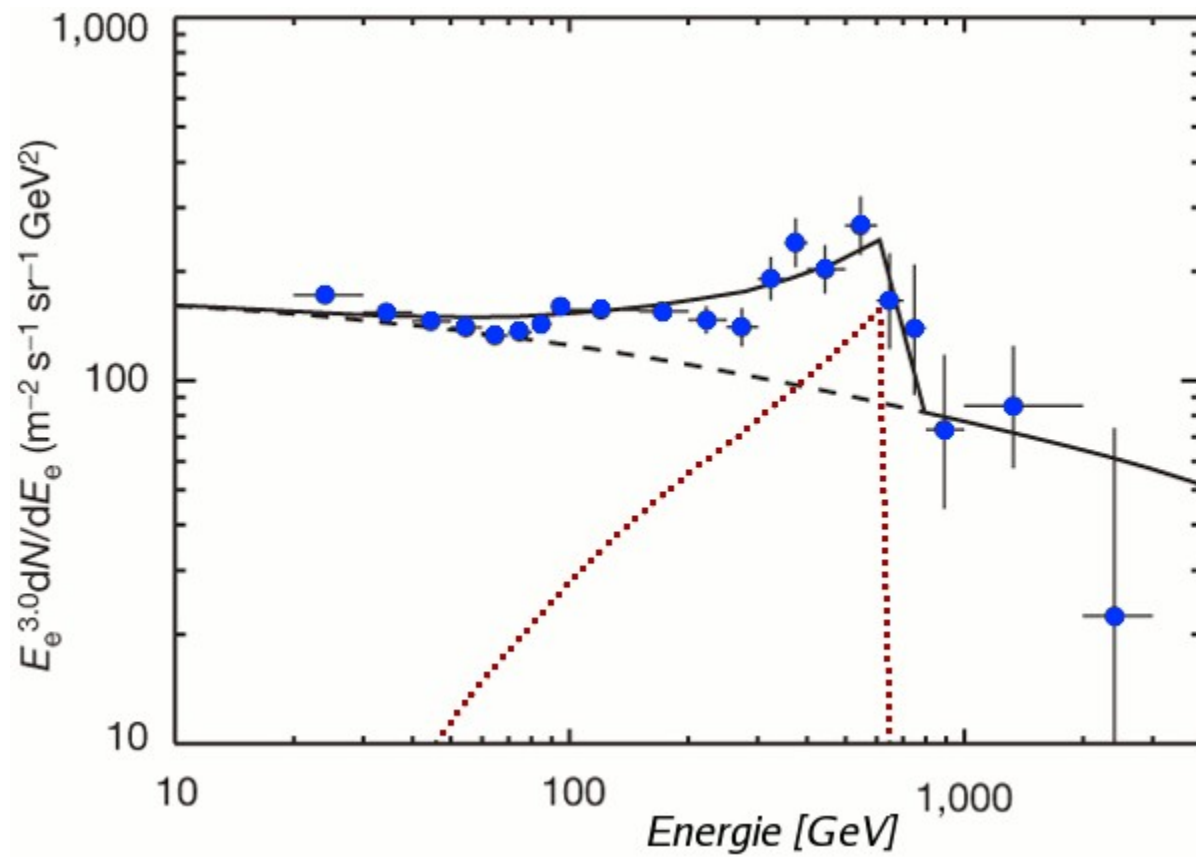


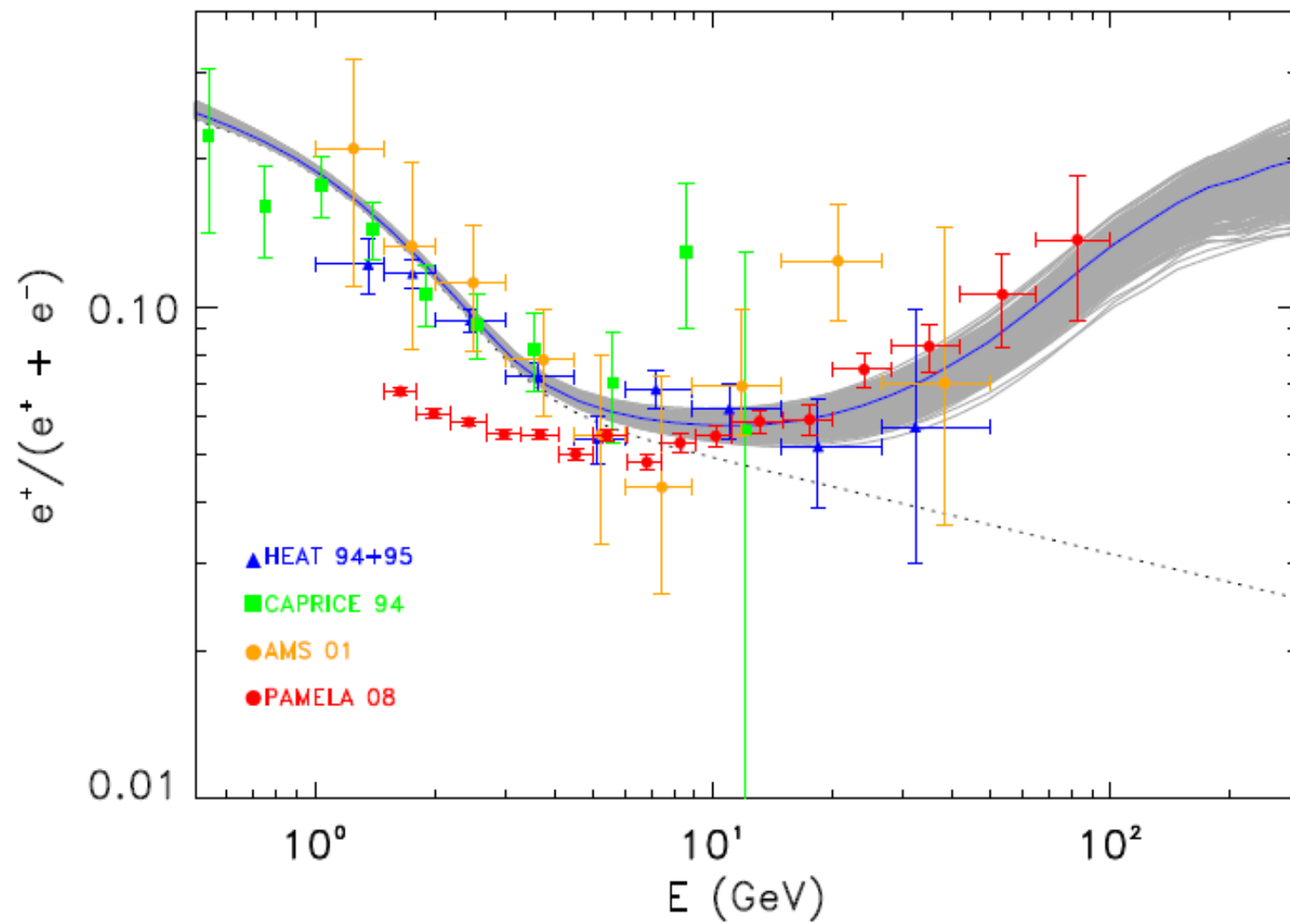


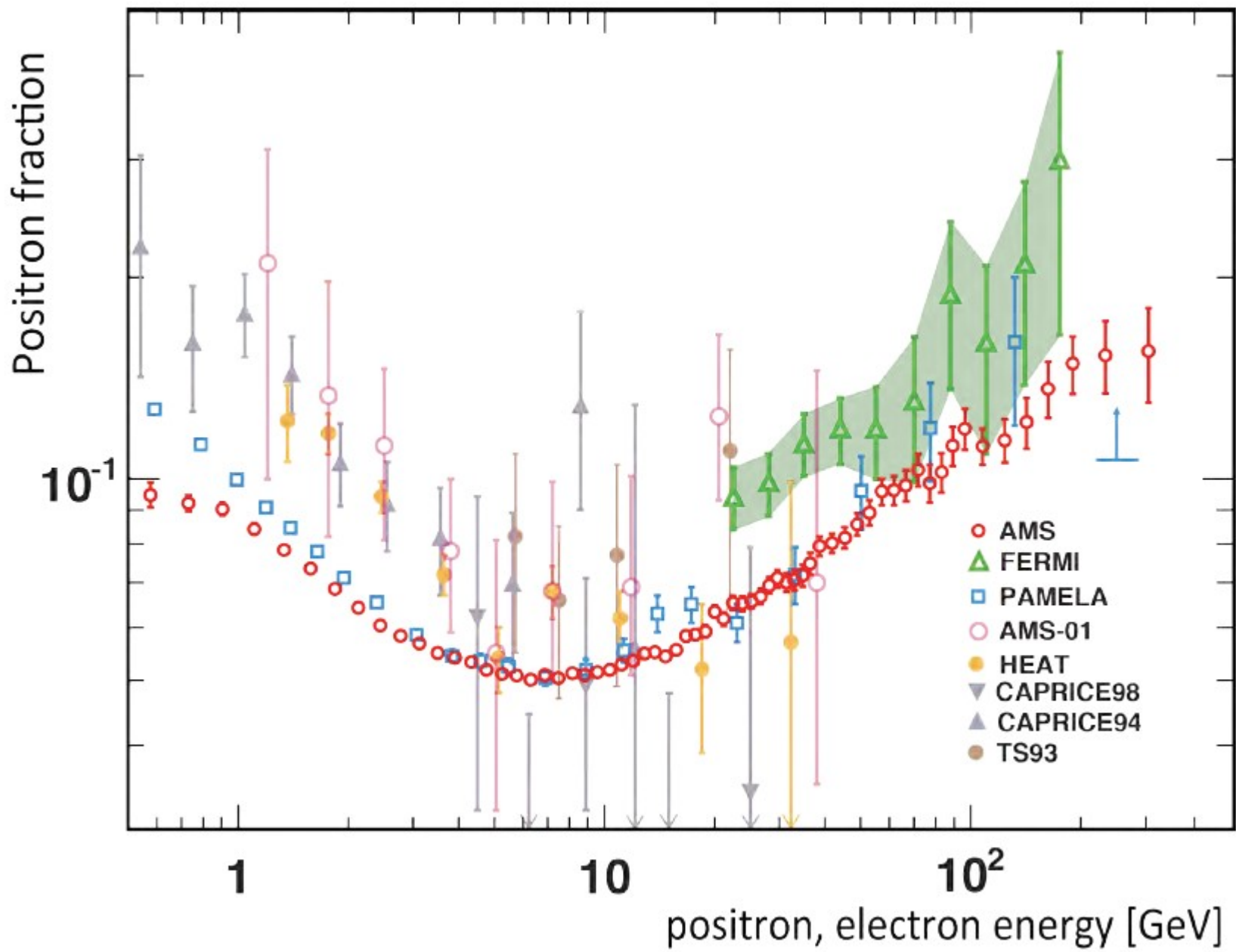


**Anihilace neutralin (jde o majoranovské částice; jejich antičástice jsou tedy identické)**

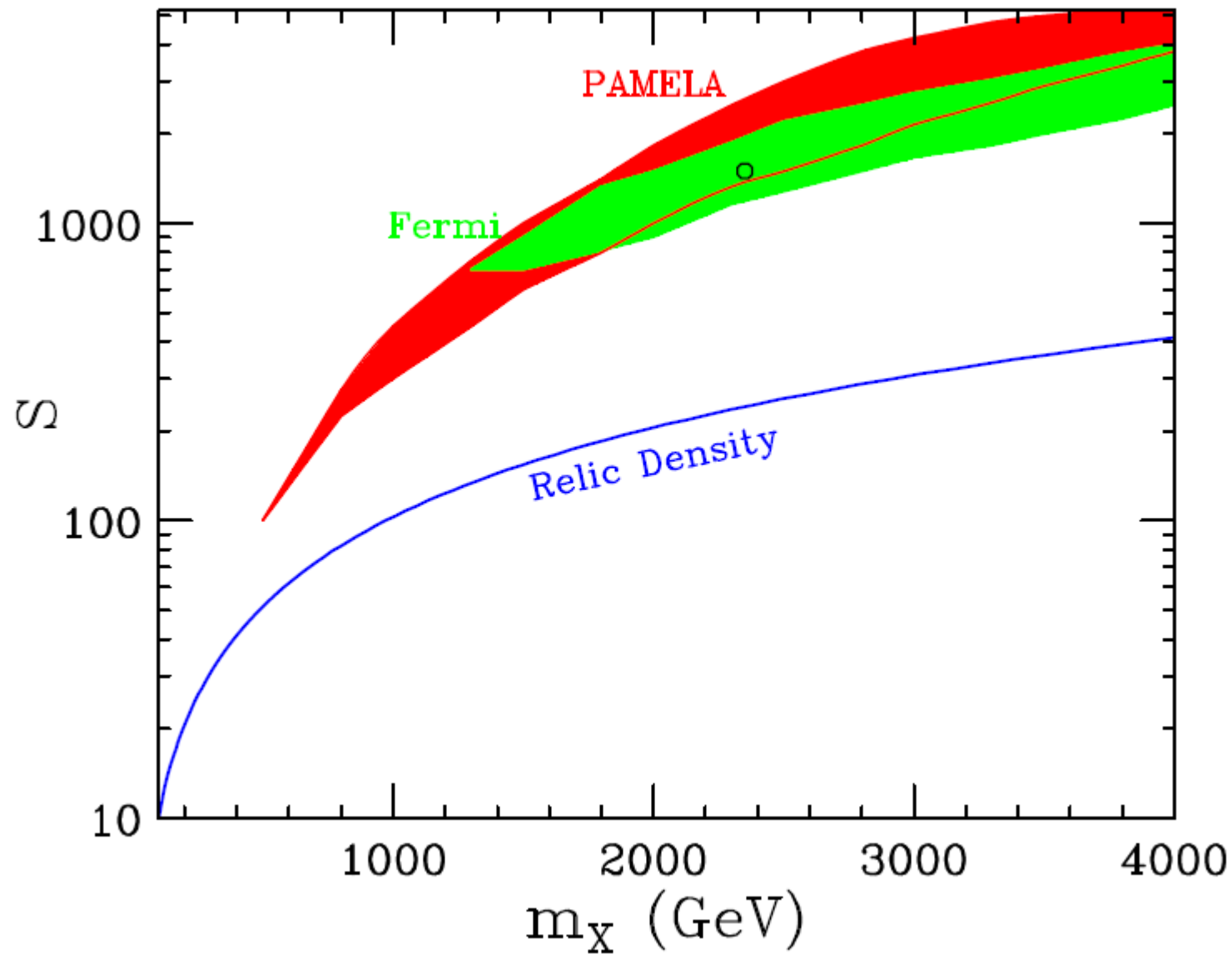






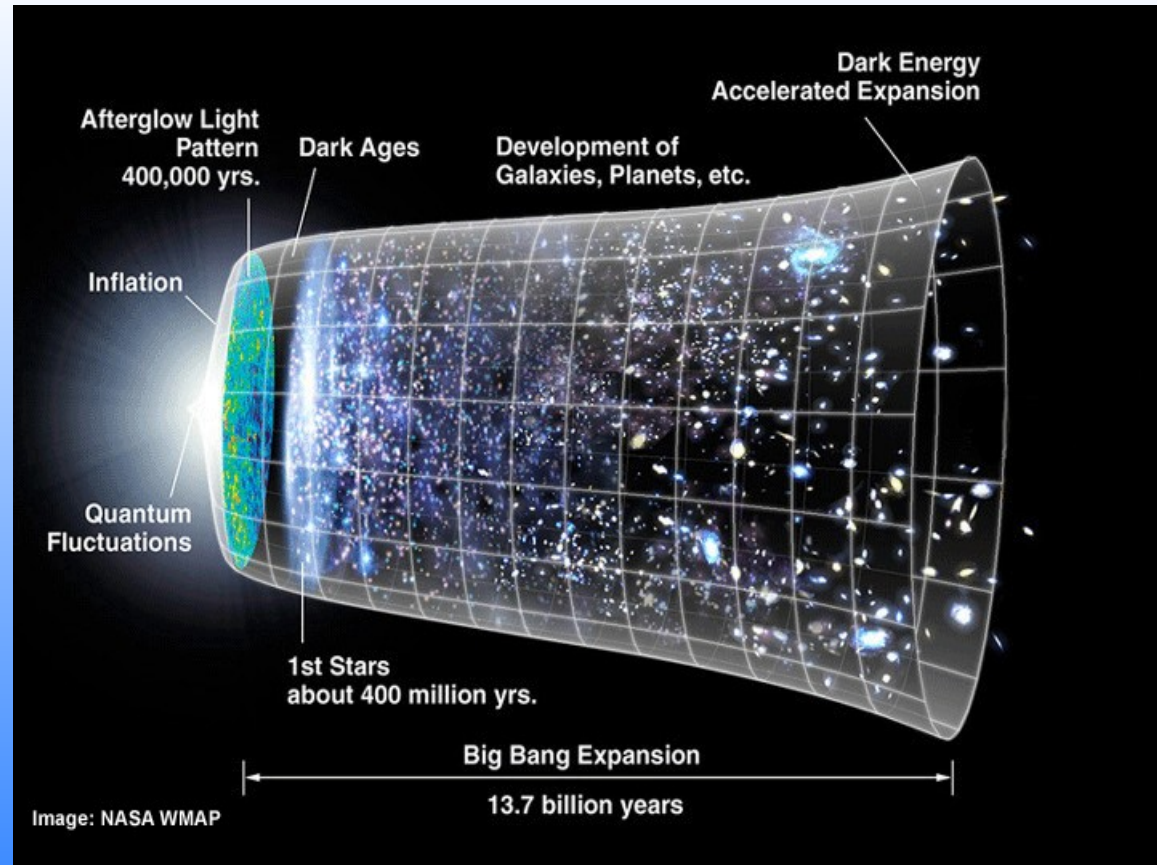






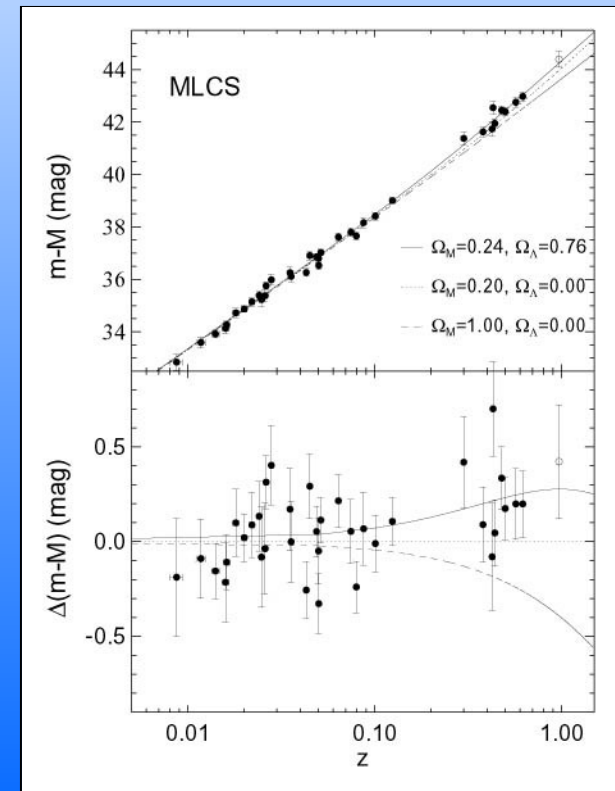
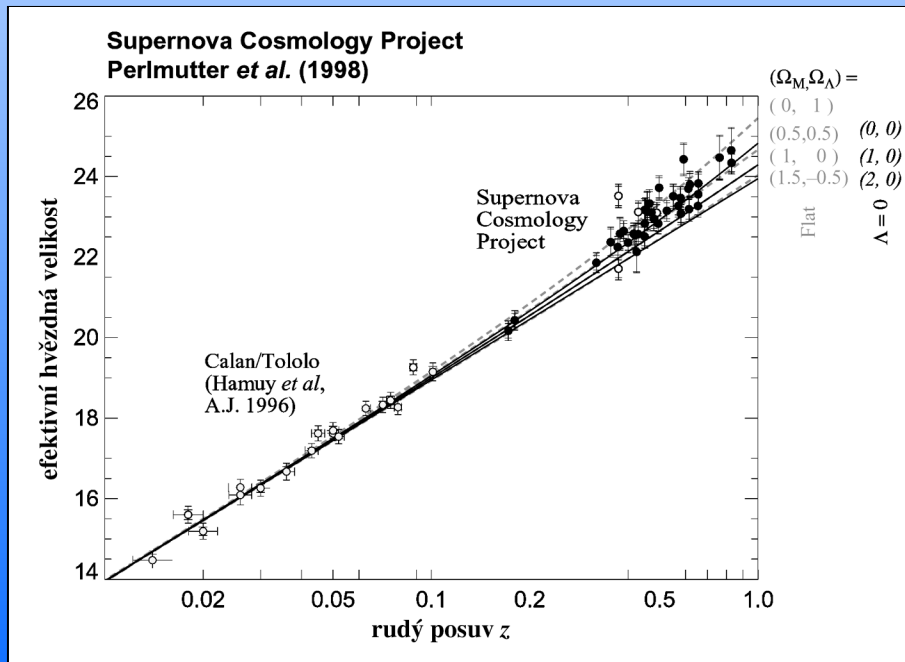
# Inflace

- jak začít, ale především jak skončit
- chaotická inflace
- věčná inflace
- mnohovesmíry (multiverza)



# Temná energie

- díky pozorováním z posledních let byla oživena idea kosmologické konstanty, „největšího omylu Einsteinova života“ - důkazy o nenulové  $\Lambda$  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**

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

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

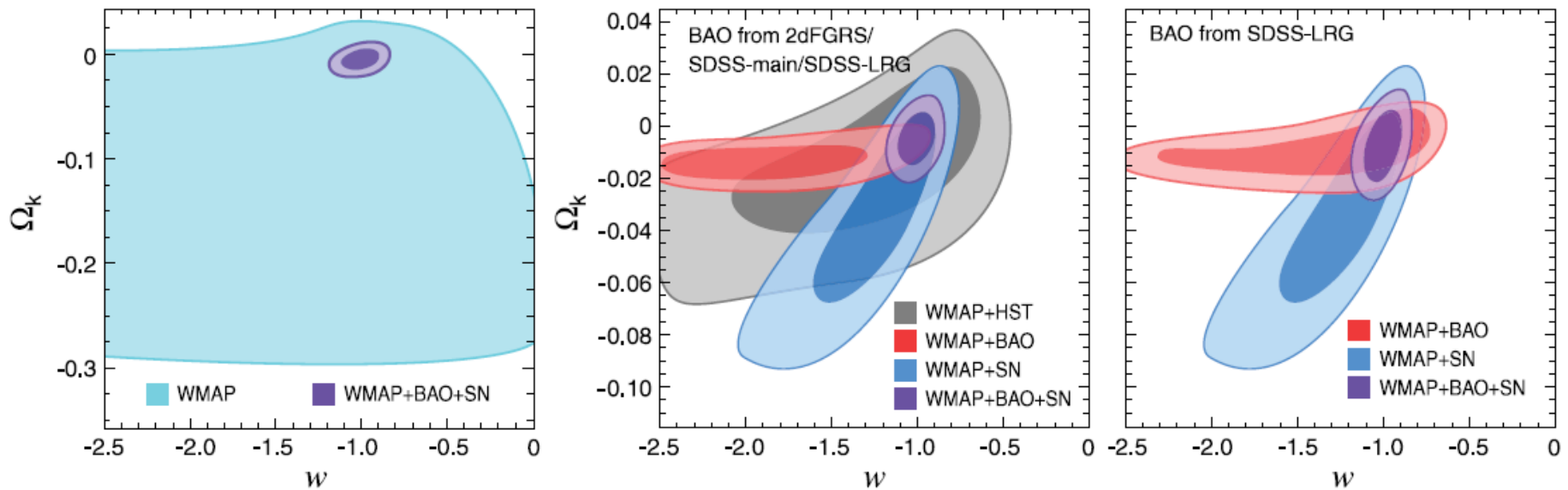
$$|\rho_{\Lambda}^{(\text{obs})}| \leq (10^{-12} \text{ GeV})^4 \sim 2 \times 10^{-10} \text{ erg/cm}^3$$

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



# Temná energie a pátá síla

- výsledky družice WMAP po 5 letech pozorování:



- parametr  $w$ :

$$p = w\rho$$

- kvintesence, pátá síla

# Cyklický (ekpyrotický) vesmír

(brane cosmology - bránová kosmologie)

- aplikace strunových teorií v kosmologii
- 11 dimenzí celkem, 6 svinutých, kompaktifikovaných, žijeme v 5-rozměrném „bulku“ (rozvinutém objemu), náš čtyřrozměrný časoprostor je nazýván „brane“ (membrána) a pohybuje se podél páté dimenze
- namísto velkého třesku vznikl vesmír srážkou dvou membrán: „ekpyrotický vesmír“, v poslední době nazýván „cyklický vesmír“
- motivace - extra dimenze řeší „problém hierarchie“ -  $E_{PL} \gg E_{EW}$ , po srážce dvou membrán dochází přirozeně k období nadsvětelné expanze - k „inflaci“

