

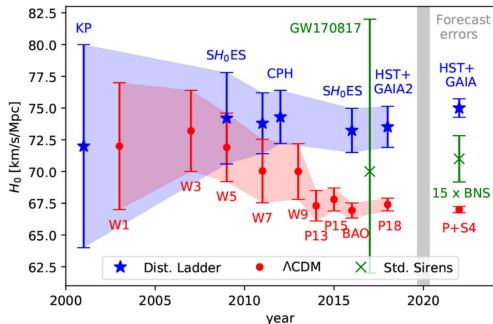
Hubble tension

pozdní Vesmír

- $H_0 \approx 73$ km/s/Mpc
- Cefeidy + SN Ia
- žebřík vzdáleností

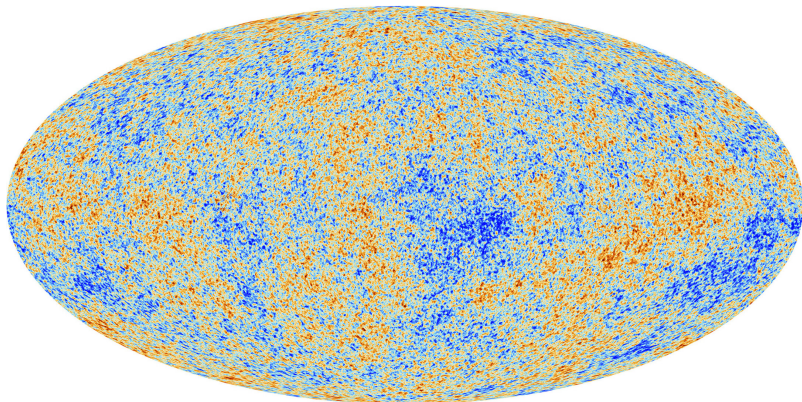
ranný Vesmír

- $H_0 \approx 68$ km/s/Mpc
- CMB + BAO
- Λ CDM kosmologie



Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

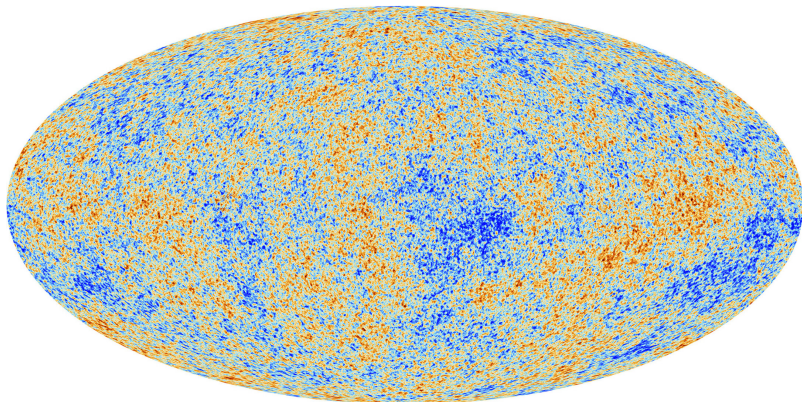
= otisk první (re)kombinace



Kosmické mikrovlné pozadí (CMB)

= otisk první (re)kombinace

Co vidíme?

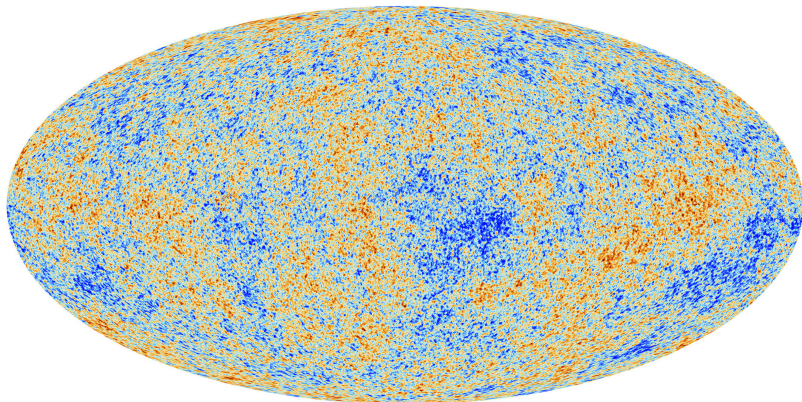


Kosmické mikrovlné pozadí (CMB)

= otisk první (re)kombinace

Co vidíme?

teplotní a hustotní fluktuace



Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

= otisk první (re)kombinace

Co vidíme?

teplotní a hustotní fluktuace

Jak to změřit?

Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

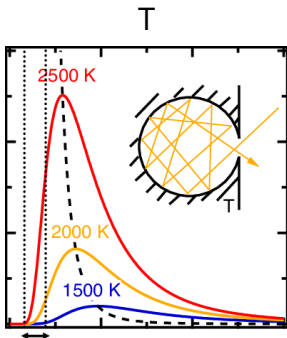
= otisk první (re)kombinace

Co vidíme?

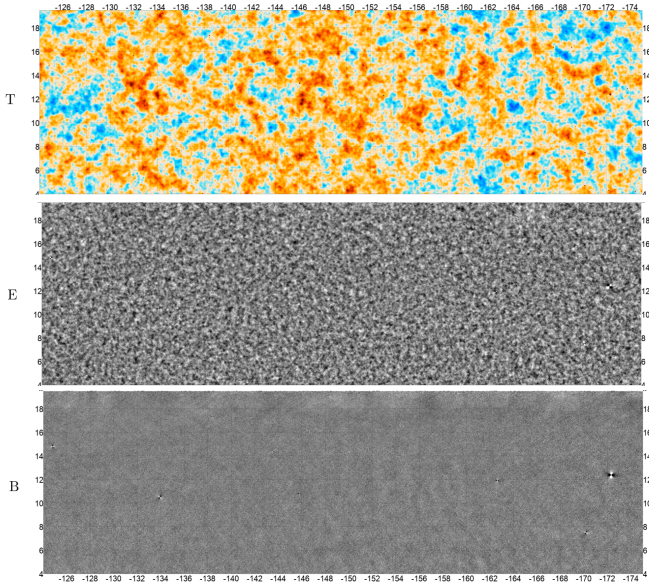
teplotní a hustotní fluktuaace

Jak to změřit?

teplota AČT + Polarizace



Kosmické mikrovlné pozadí (CMB)



Kosmické mikrovlné pozadí (CMB)

= otisk první (re)kombinace

Co vidíme?

teplotní a hustotní fluktuaace

Jak to změřit?

teplota AČT + Polarizace

Jak to porovnat s modelem?

Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

= otisk první (re)kombinace

Co vidíme?

teplotní a hustotní fluktuaace

Jak to změřit?

teplota AČT + Polarizace

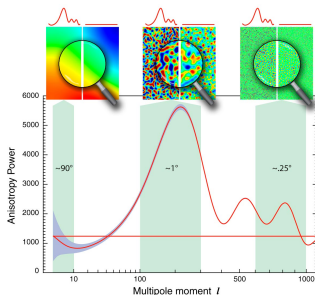
Jak to porovnat s modelem?

korelační funkce

$$\delta T(\vec{r}) = \frac{T(\vec{r}) - T_0}{T_0} \quad \tan \Theta = \frac{r}{D_A}$$

$$C(\Theta) = \langle \delta T(\Theta) \delta T(\Theta') \rangle$$

$$C(\Theta) = \sum_l \frac{2l+1}{4\pi} C_l P_l \cos(\Theta)$$



Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

= otisk první (re)kombinace

Co vidíme?

teplotní a hustotní fluktuaace

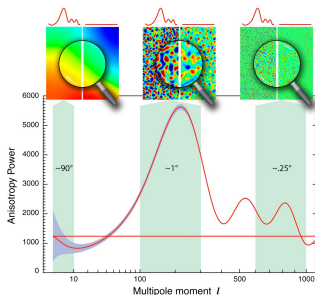
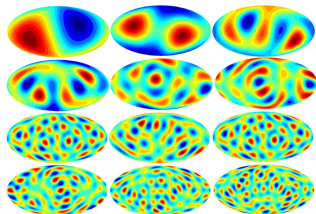
Jak to změřit?

teplota AČT + Polarizace

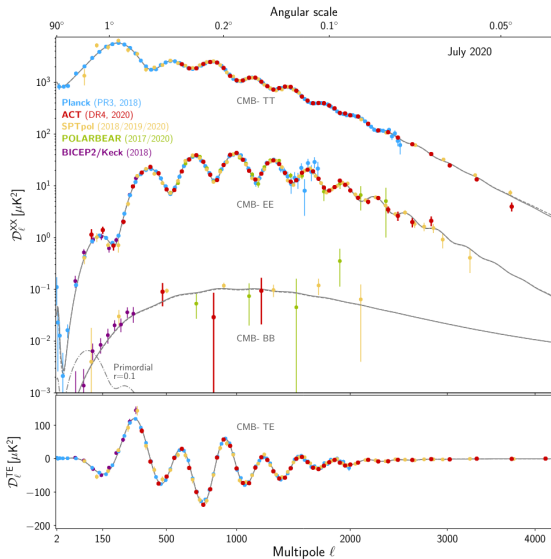
Jak to porovnat s modelem?

korelační funkce

$$C(\theta) = \sum_l \frac{2l+1}{4\pi} C_l P_l \cos(\theta)$$



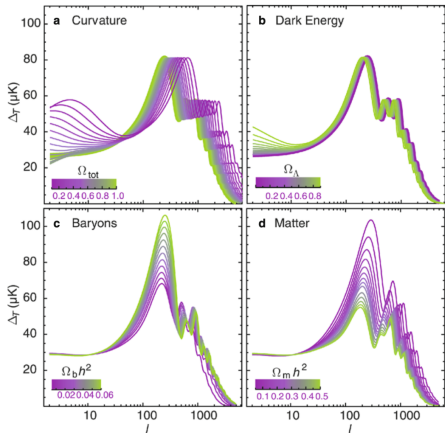
Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)



Vliv parametrů na vzhled CMB

- hustotní parametry

$$\Omega_m, \Omega_b, \Omega_\Lambda$$



Vliv parametrů na vzhled CMB

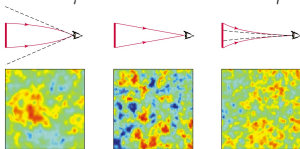
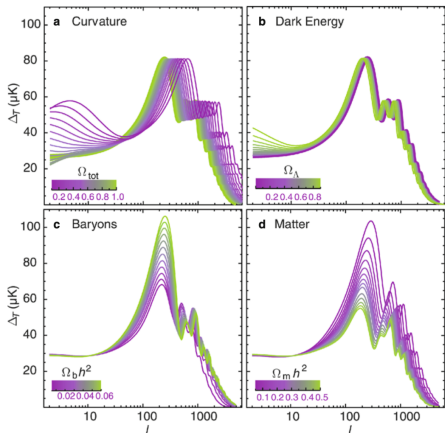
- hustotní parametry

$$\Omega_m, \Omega_b, \Omega_\Lambda$$

- geometrie Vesmíru

$$1 - \Omega_{\text{tot}}$$

$$\Theta \approx \frac{r}{D_A} \quad D_A = \frac{S_\kappa(r)}{1+z} \approx \frac{d_p(t_0)}{1+z}$$



Vliv parametrů na vzhled CMB

- hustotní parametry

$$\Omega_m, \Omega_b, \Omega_\Lambda$$

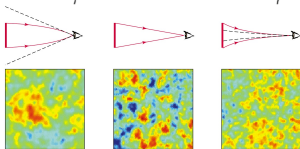
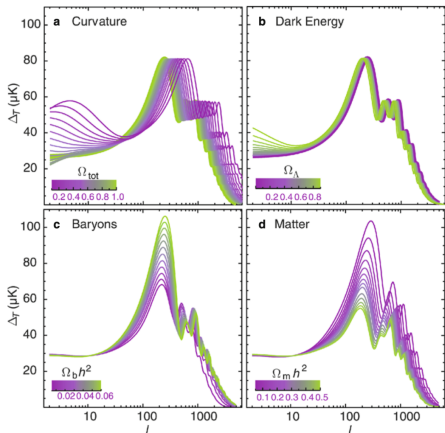
- geometrie Vesmíru

$$1 - \Omega_{\text{tot}}$$

$$\Theta \approx \frac{r}{D_A} \quad D_A = \frac{S_\kappa(r)}{1+z} \approx \frac{d_p(t_0)}{1+z}$$

- Hubbleova konstanta

$$D_A \propto H_0^{-1}$$



Early dark energy

- skalární pole ϕ

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V(\phi)' = 0$$

f konstanta útlumu

$$V(\phi) \propto [1 - \cos(\phi/f)]^n$$

$$n = 3$$

Early dark energy

- skalární pole ϕ

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V(\phi)' = 0$$

$$V(\phi) \propto [1 - \cos(\phi/f)]^n$$

f ... konstanta útlumu

$$n = 3$$

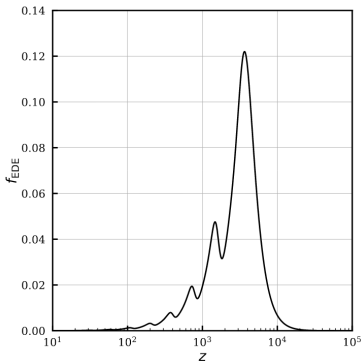
- zamrzlé do $z_c \approx 3500$

$$w_\phi = \frac{n-1}{n+1}$$

zpočátku později

$$w_\phi \approx -1 \quad w_\phi > 0$$

$$\rho_{\text{EDE}} \propto a^{-4.5}$$



Early dark energy

- skalární pole ϕ

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V(\phi)' = 0 \quad f \dots \text{konstanta útlumu}$$

$$V(\phi) \propto [1 - \cos(\phi/f)]^n \quad n = 3$$

- zamrzlé do $z_c \approx 3500$

Vesmír se rozpínal rychleji než pro Λ CDM kosmologii

→ změnšuje se horizont zvuku r_s^* na z_c

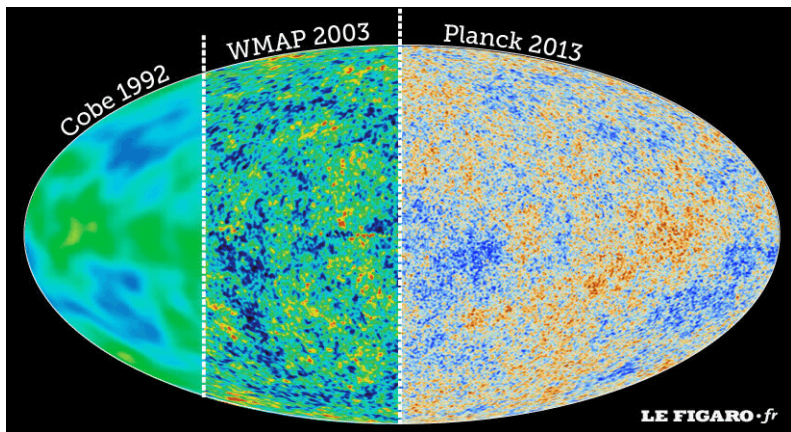
→ snižuje se D_A pro zachování Θ_s^*

→ zvyšuje se H_0

$$\Theta_s^* = \frac{r_s^*}{D_A} \quad r_s = \int_{z^*}^{\infty} \frac{dz}{H(z)} c_s(z) \quad D_A \propto H_0^{-1}$$

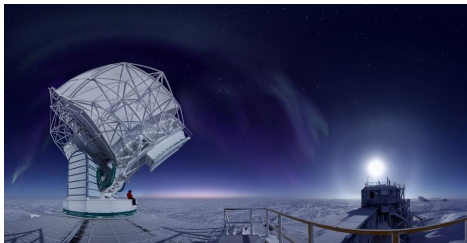
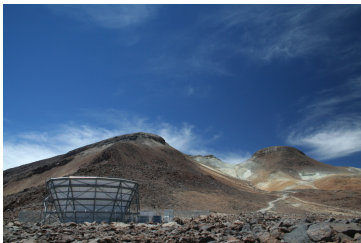
Pozorování

- COBE, WMAP
- Planck - teplota & polarizace

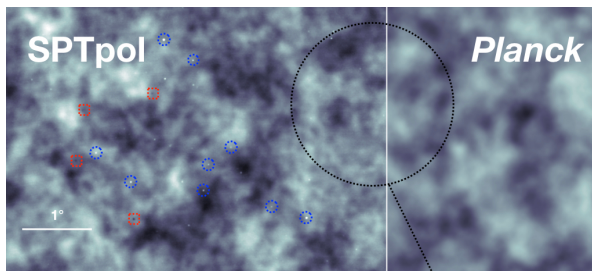
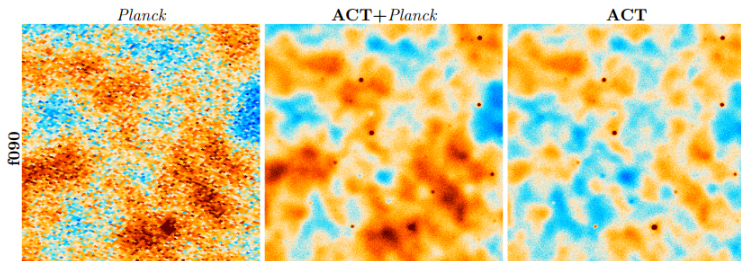


Pozorování

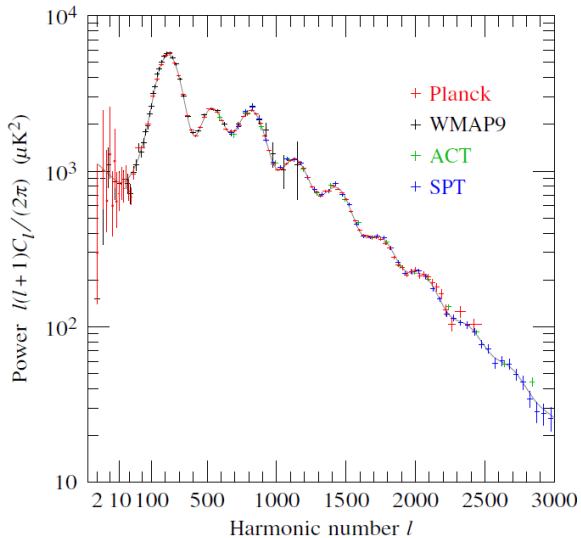
- COBE, WMAP
- Planck - teplota & polarizace
- ACT DR4 (= *Atacama Cosmology Telescope*)
- SPT 3G (= *South Pole Telescope*)
 - multipolové momenty $500 < l < 3000$



Pozorování



Pozorování

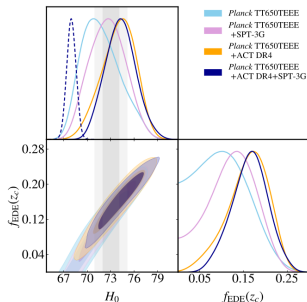


Výsledky (EDE)

- Planck TTTEEE
 - $f_{\text{EDE}}(z_c) < 0.08$
 - $H_0 \simeq 68 \text{ km/s/Mpc}$
 - significantní s priory na H_0

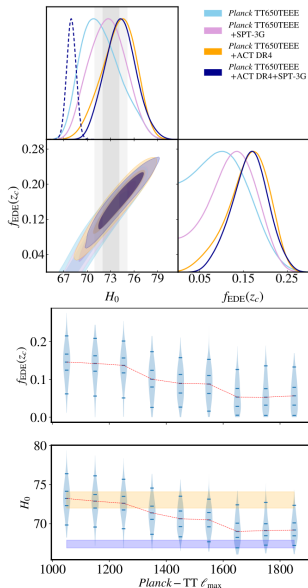
Výsledky (EDE)

- Planck TTTEEE
 - $f_{\text{EDE}}(z_c) < 0.08$
 - $H_0 \simeq 68$ km/s/Mpc
 - significantní s priory na H_0
- Planck ($l < 650$) + SPT + ACT
 - $f_{\text{EDE}}(z_c) = 0.163^{+0.047}_{-0.040}$
 - $H_0 \simeq 73 - 74$ km/s/Mpc
 - preference 3.3σ



Výsledky (EDE)

- Planck TTTEEE
 - $f_{\text{EDE}}(z_c) < 0.08$
 - $H_0 \simeq 68$ km/s/Mpc
 - significantní s priory na H_0
- Planck ($l < 650$) + SPT + ACT
 - $f_{\text{EDE}}(z_c) = 0.163^{+0.047}_{-0.040}$
 - $H_0 \simeq 73 - 74$ km/s/Mpc
 - preference 3.3σ
- Planck + SPT + ACT
 - $f_{\text{EDE}}(z_c) < 0.12$
 - $H_0 \simeq 69 - 70$ km/s/Mpc



Závěr

- Planck (Λ CDM) $\rightarrow H_0 \approx 68$ km/s/Mpc
- Planck (EDE) \rightarrow nesignifikantní f_{EDE}
- Planck ($l < 650$) + ACT + SPT \rightarrow preference EDE nad Λ CDM

Závěr

- Planck (Λ CDM) $\rightarrow H_0 \approx 68$ km/s/Mpc
- Planck (EDE) \rightarrow nesignifikantní f_{EDE}
- Planck ($l < 650$) + ACT + SPT \rightarrow preference EDE nad Λ CDM

Je Λ CDM úplný model Vesmíru?

Závěr

- Planck (Λ CDM) $\rightarrow H_0 \approx 68$ km/s/Mpc
- Planck (EDE) \rightarrow nesignifikantní f_{EDE}
- Planck ($l < 650$) + ACT + SPT \rightarrow preference EDE nad Λ CDM

Je Λ CDM úplný model Vesmíru?

nejspíš NE

Závěr

- Planck (Λ CDM) $\rightarrow H_0 \approx 68$ km/s/Mpc
- Planck (EDE) \rightarrow nesignifikantní f_{EDE}
- Planck ($l < 650$) + ACT + SPT \rightarrow preference EDE nad Λ CDM

Je Λ CDM úplný model Vesmíru?

nejspíš NE

Můžeme EDE nahradit Λ CDM?

Závěr

- Planck (Λ CDM) $\rightarrow H_0 \approx 68$ km/s/Mpc
- Planck (EDE) \rightarrow nesignifikantní f_{EDE}
- Planck ($l < 650$) + ACT + SPT \rightarrow preference EDE nad Λ CDM

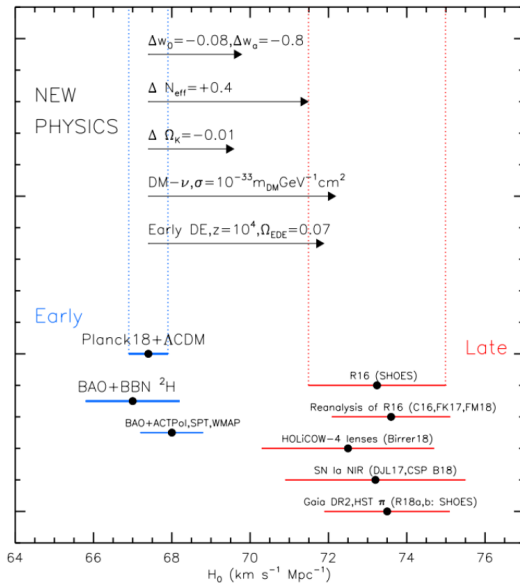
Je Λ CDM úplný model Vesmíru?

nejspíš NE

Můžeme EDE nahradit Λ CDM?

nejspíš NE

Závěr



Závěr

