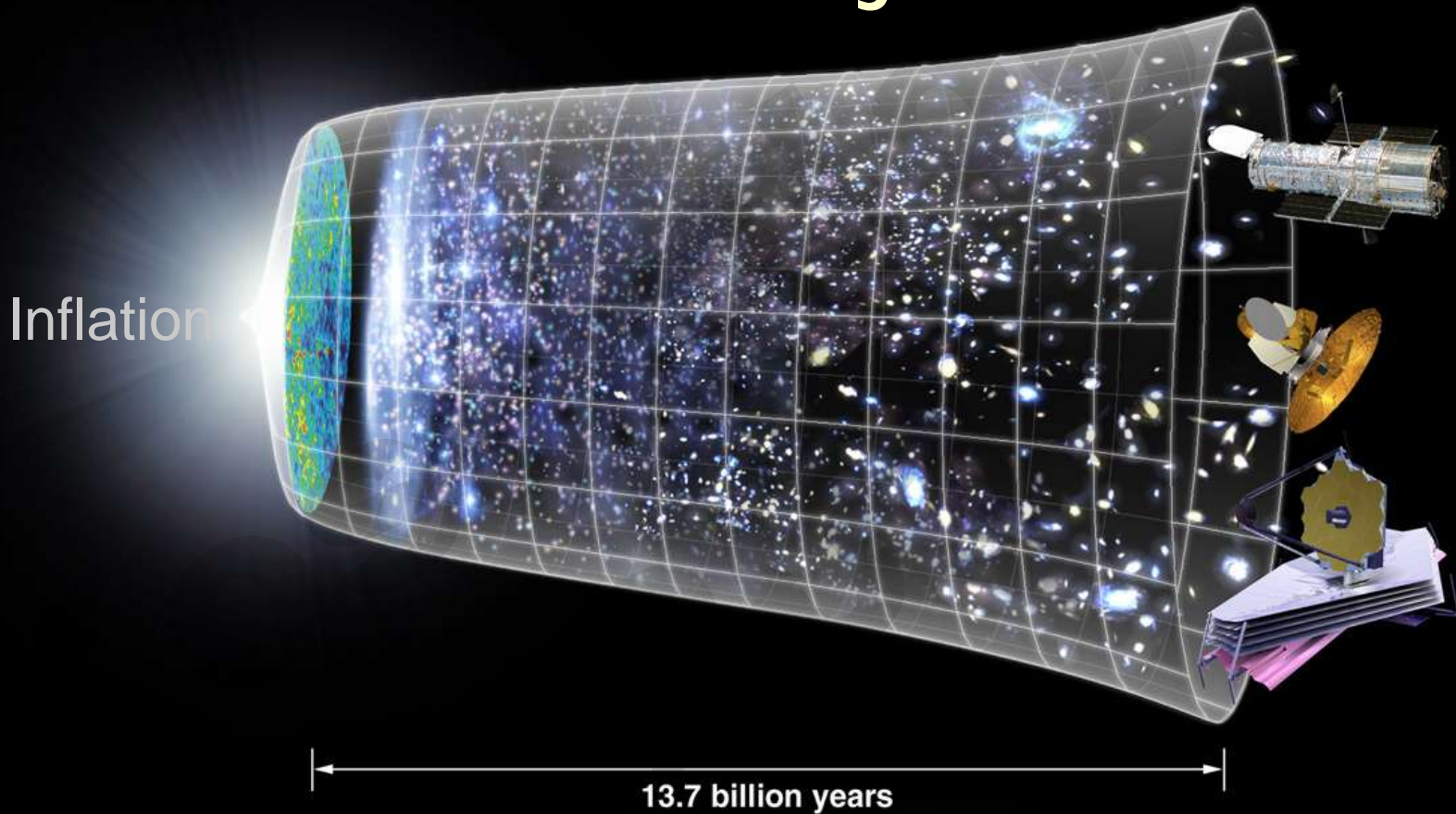
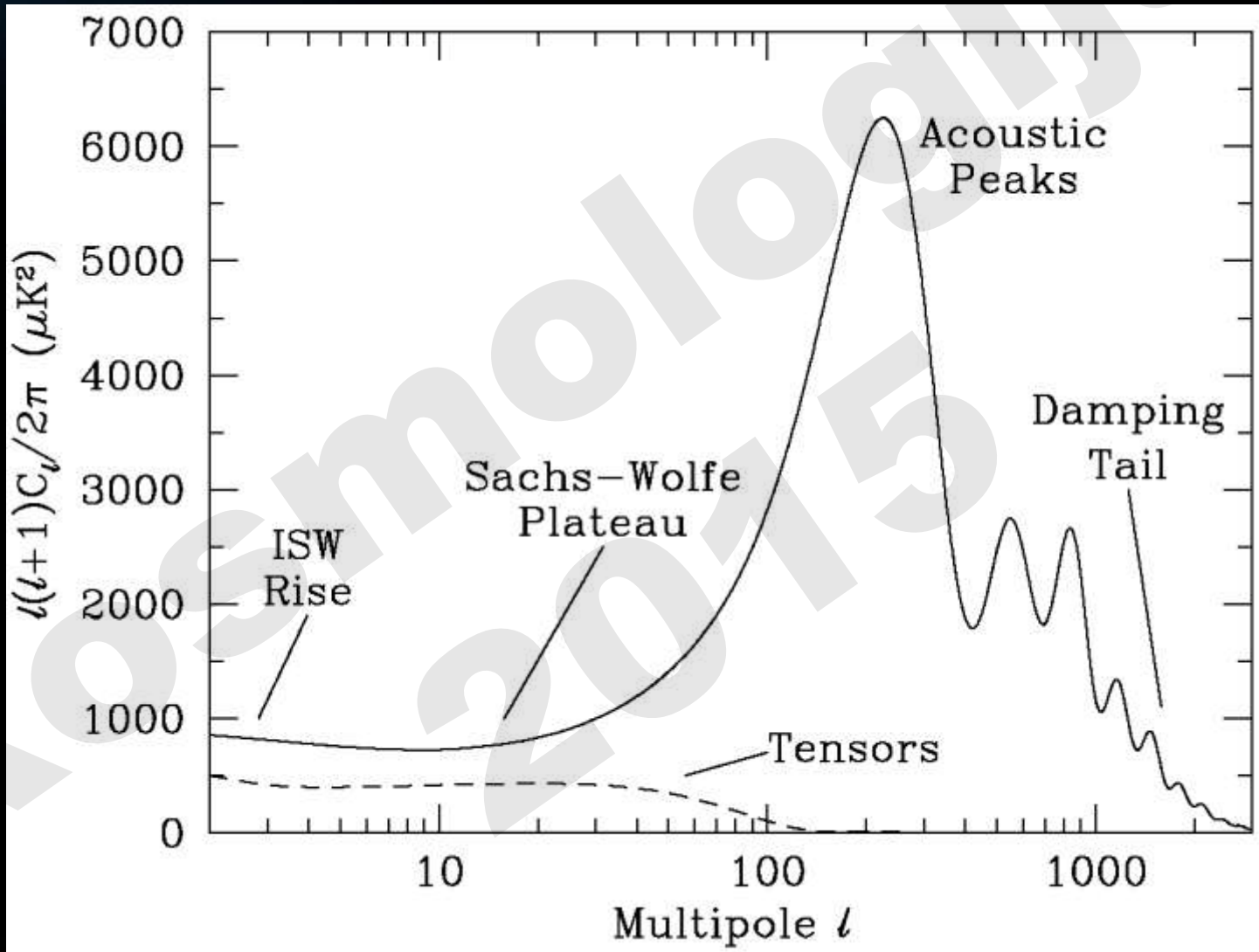


# CMB anizotropije – par završnih detalja



11. 09. 2015.

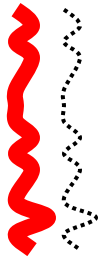


# Već sam oblik ugaonog spektra...

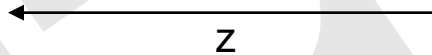
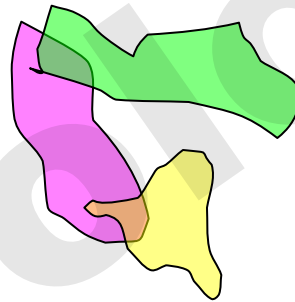
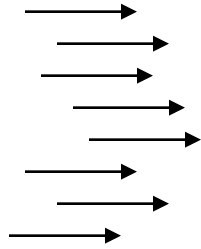
- ▶ ...nam govori važne stvari o svemiru!
- ▶ Npr. Layzer (1966) i mnogi kasnije (jedno vreme i Zeljdovič): model *hladnog* Velikog praska.
- ▶ (niska vrednost  $\eta \Rightarrow$  lakše formiranje strukture)
- ▶ Ali, pošto nema vruće plazme, nema ni zvučnih talasa u plazmi, nema ni akustičkih pikova...
- ▶ Modeli ove vrste su **falsifikovani** WMAP (i kasnijim) rezultatima!

# Saks-Vulfeov efekat redux

**CMB**



$\phi_i$



**OBS.**



$\phi_f$

$$\Delta\phi = \phi_f - \phi_i$$

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{3} \frac{\Delta\phi}{c^2} + 2 \int_{\text{vizura}} \frac{d\phi}{d\tau} d\tau$$

# EdS svemir, linearni režim

$$\phi = -\frac{GM}{R} \Rightarrow \Delta\phi \approx \frac{G\Delta M}{R}$$

$$\delta \equiv \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} = \frac{\Delta M}{M} \text{ and } \rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \Rightarrow \Delta\phi \approx \frac{G\delta M}{R}$$

U Ajnštajn - de Sitterovom svemiru, u režimu linearne teorije imamo

$$\delta = a\delta_0 \text{ or } \frac{\delta}{R} = \frac{\delta_0}{R_0} \Rightarrow \Delta\phi \approx GM \left( \frac{\delta}{R} \right) = GM \left( \frac{\delta_0}{R_0} \right) = \text{const.}$$

$\Delta\phi = \text{const.} \Rightarrow$  **NEMA ISV EFEKTA!**

$$\Delta\phi \neq \text{const.}$$

Na  $z \sim 1.2$  svemirom počinje da dominira tamna energija ( $\lambda$ )

$\Rightarrow \Delta\phi \neq \text{const.}$

$\Rightarrow$  Fotoni se dalje pomeraju ka crvenom u odnosu na „originalne“ CMB fotone

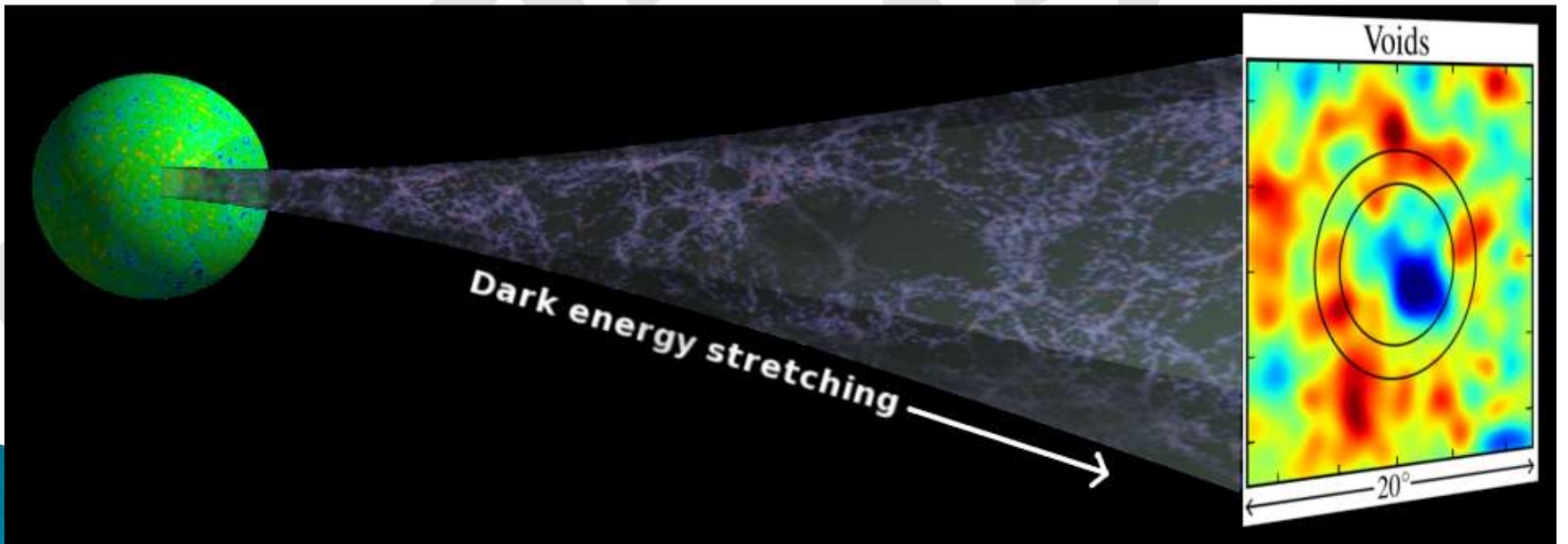
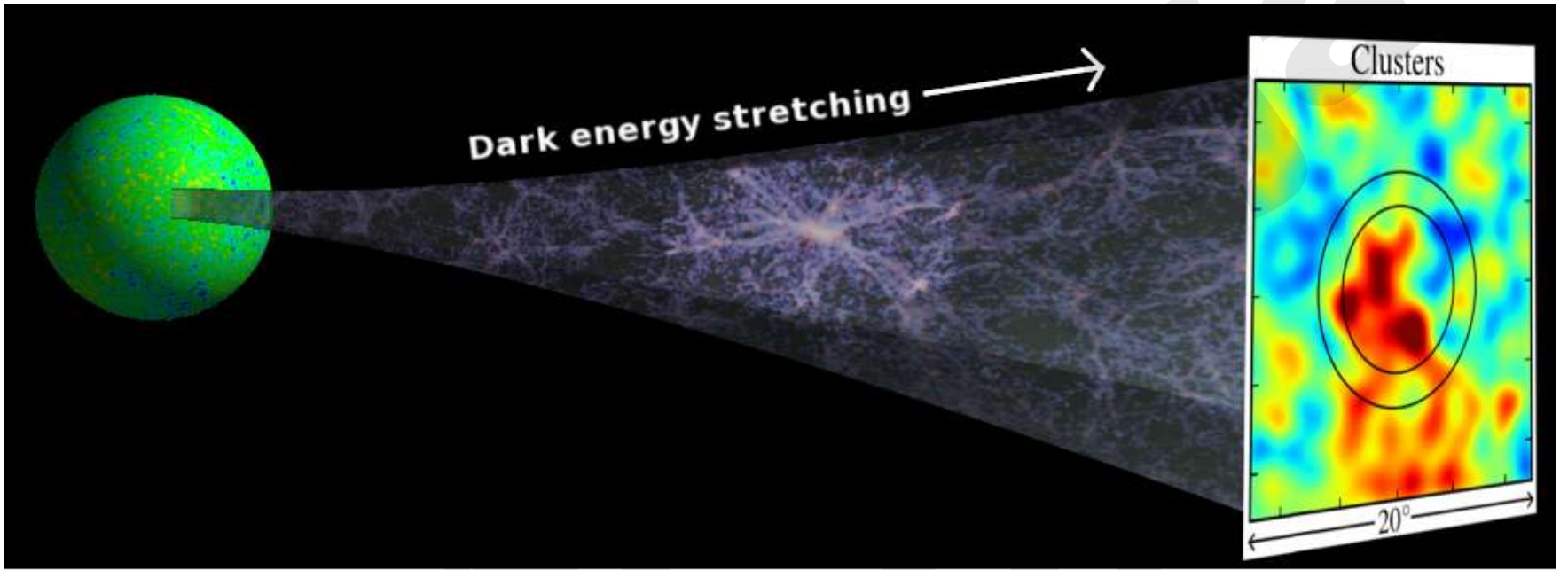
$\Rightarrow$  Nastaje CMB anizotropija na velikoj skali

**$\Rightarrow$ Integrirani SW $\Leftarrow$**

**ISW**

**Rani:** Prelazak sa  $\rho_\gamma$  na  $\rho_m$  nije trenutan.  
Tokom prelazne faze, faktor skaliranja se ne menja linearno  $\Rightarrow \Delta\phi$  varira

**Kasni (Rees-Sciama):** počinje pri tranziciji sa  $\rho_m$  na  $\rho_\lambda$



# Red veličine i skala

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta T}{T} &\approx \frac{\Delta \phi}{c^2} \\ \Delta \phi &= \frac{GM}{c^2} \left( \frac{\delta}{R} \right) \end{aligned} \right\} \frac{\Delta T}{T} = G \rho_m \frac{4}{3} \pi \left( \frac{R}{c} \right)^2 \delta$$

U terminima kosmološke gustine  $\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c}$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Omega_m}{2} \left( \frac{H_0 R}{c} \right)^2 \delta \propto \frac{\Omega_m}{2} \left( \frac{R}{3000 \text{ Mpc}} \right)^2 \delta$$

Ako je  $R = 8 \text{ Mpc}$  i  $\langle \delta \rangle \approx 1$

$$\Rightarrow \left\langle \frac{\Delta T}{T} \right\rangle \approx 10^{-5} \sigma_8 \text{ na skalama } \Delta \theta > \Delta \theta_H$$



# Kako detektovati ISW

- ▶ Uz zadatu ugaonu rezoluciju sa WMAP i PLANCK moguće je cross-korelisati lokalne ( $z < 1.2$ ) strukture sa posmatranim CMB anizotropijama.
- ▶ Amplituda unakrsne korelacije zavisi od veličine ubrzanja koje zavisi od gustine tamne energije  $\Omega_\lambda$ .
- ▶ I obratno: iz nečeg što nam „izgleda“ kao posledica ISW i uz pretpostavku o korelaciji, možemo otkriti „nove“ strukture – primer „Hladna mrlja“!

# Kros-korelacija CMB-struktura na velikoj skali

Definišimo,

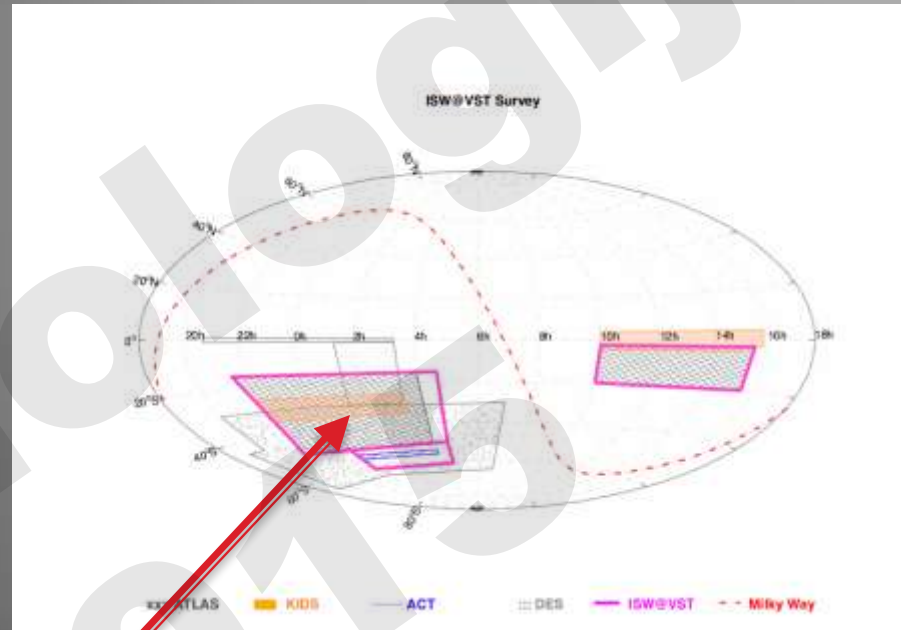
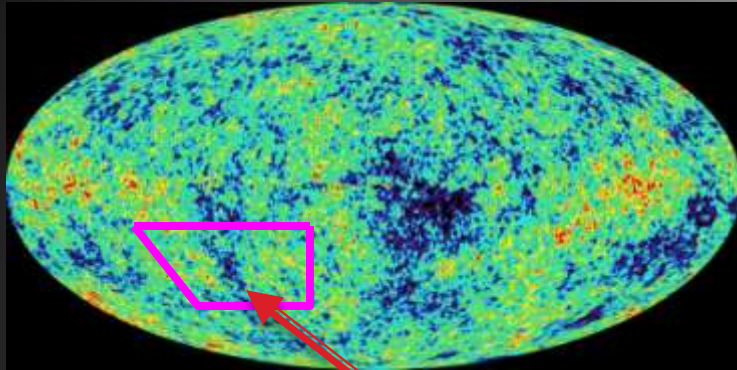
$$\delta_g(\hat{n}) \equiv \frac{N_g - \bar{N}_g}{\bar{N}_g}; \text{ za galaksije}$$

$$\Delta T(\hat{n}) \equiv \frac{T - T_0}{T_0}; \text{ za CMB temperaturu}$$

Očekivana vrednost fluktuacije gustine je unakrsna (kros-) korelaciona funkcija:

$$\omega_{Tg}(\theta) = \langle \Delta T(\hat{n}_1) \delta_G(\hat{n}_2) \rangle, \text{ gde je } \theta = |\hat{n}_2 - \hat{n}_1|$$

# Čitanjem mape piksela...



$$\omega_{Tg}(\theta) = \frac{\sum_{i,j} \Delta T(\hat{n}_i) \delta_g(\hat{n}_j) W_i W_j}{\sum_{i,j} W_i W_j}$$

gde je  $W$  "funkcija prozora" i sumiranje se odnosi na sve parove  $(i, j)$  koje razdvajaju uglovi  $(\theta, \theta + \Delta\theta)$

ISW dominira X-korelacionim signalom na ugaonim skalama  $\theta \geq 1^\circ$   
(na manjim skalama dominira SZ efekat)

Za dva polja  $A$  i  $B$

Legendre-ov polinom reda /

$$\omega_{AB}(\theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(2l+1)}{4\pi} C_{AB}(l) P_l(\cos \theta),$$

$$C_{AB}(l) = \int_0^{\infty} \frac{dr}{r^2} P(k) W^A(k, r) W^B(k, r),$$

Funkcija prozora za polje CMB anizotropija:

$$W^{ISW}(r, k) = -3T_0 \frac{\Omega_m}{k^2} \frac{H_0^2}{c^3} \frac{\partial F(z)}{\partial \tau}$$

$T_0$  is the mean temperature of the CMB

$\Omega_m$  is the matter density

$H_0$  is Hubble's constant

$dt = d\tau/(1+z)$  conformal time

$F(z)$  is the growth factor of the gravitational potential.

Funkcija prozora za polje galaksija:

$$W^g = b_g \frac{H(z)}{c} D(z) n(z)$$

$b_g$  is the bias

$H(z)$  is the Hubble parameter

$D(z)$  is the growth factor

$n(z)$  is the galaxy density distribution

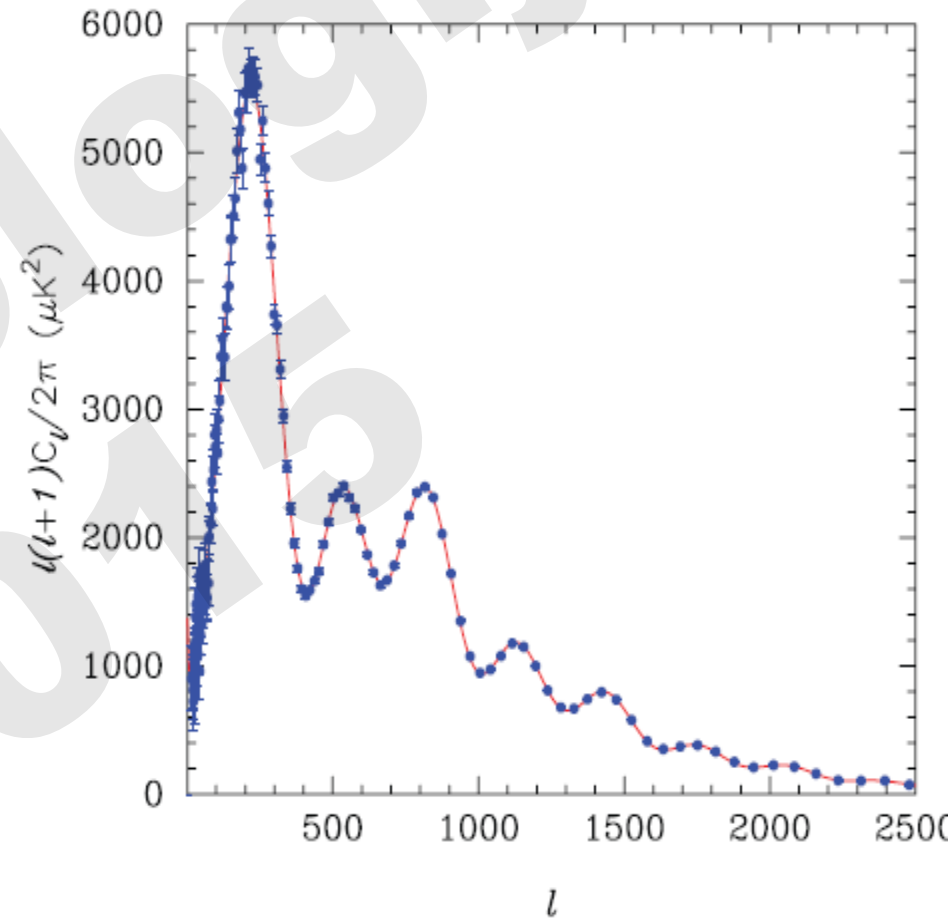
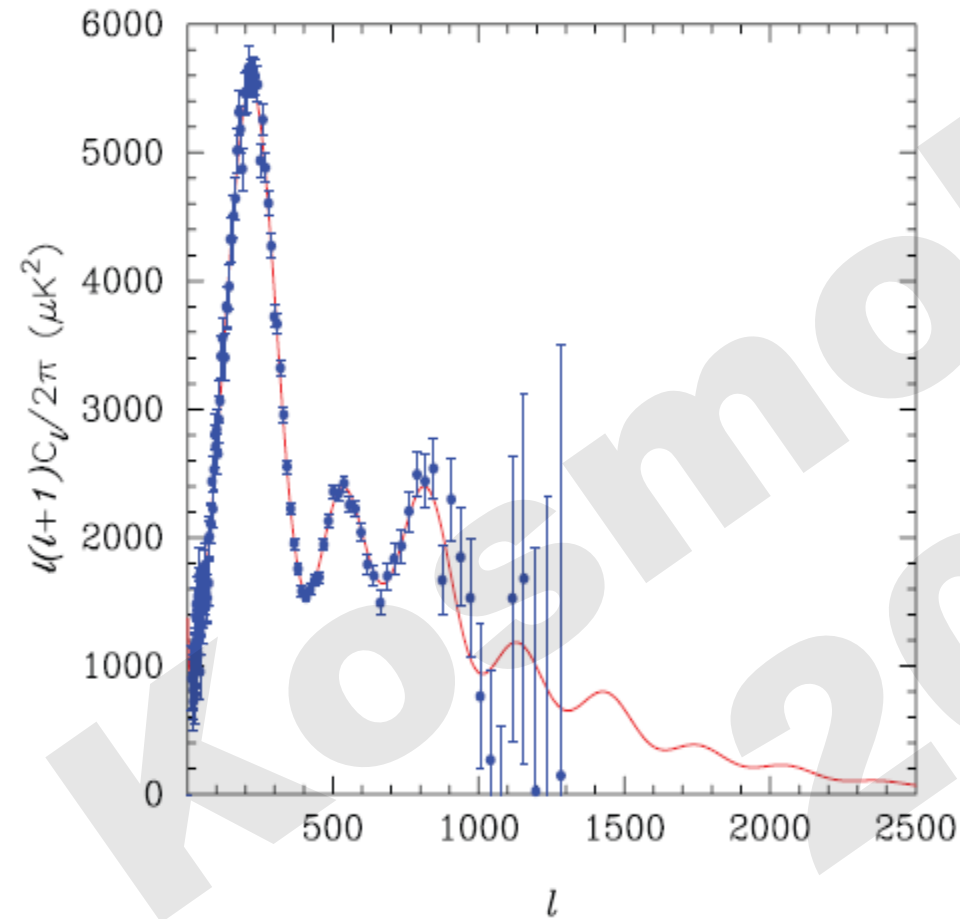
Greška na svakom multipolu:

$$\sigma_{\omega_{gT}}^2 = \sum_l \frac{(2l+1)}{f_{sky}(4\pi)^2} P_l^2(\cos\theta) \left\{ C_{gT}^2(l) + C_{TT}(l) \left[ C_{gg}(l) + \frac{1}{N} \right] \right\}.$$

# Poboljšanje koje je doneo PLANCK

WMAP

PLANCK



# Na šta su još osetljive CMB anizotropije?

- ▶ Broj vrsta neutrina (tj. generacija leptona)
- ▶ Vremenske varijacije fundamentalnih konstanti kao što su  $G$ ,  $c$ ,  $\alpha$  (konstanta fine strukture)

# Broj lakih neutrina

Ako su mase neutrina  $< 0.1\text{eV}$ ,

neutrini su „efektivno“ bez mase sve do rekombinacije

Šta se dešava ako povećamo broj bezmasivnih vrsta čestica?

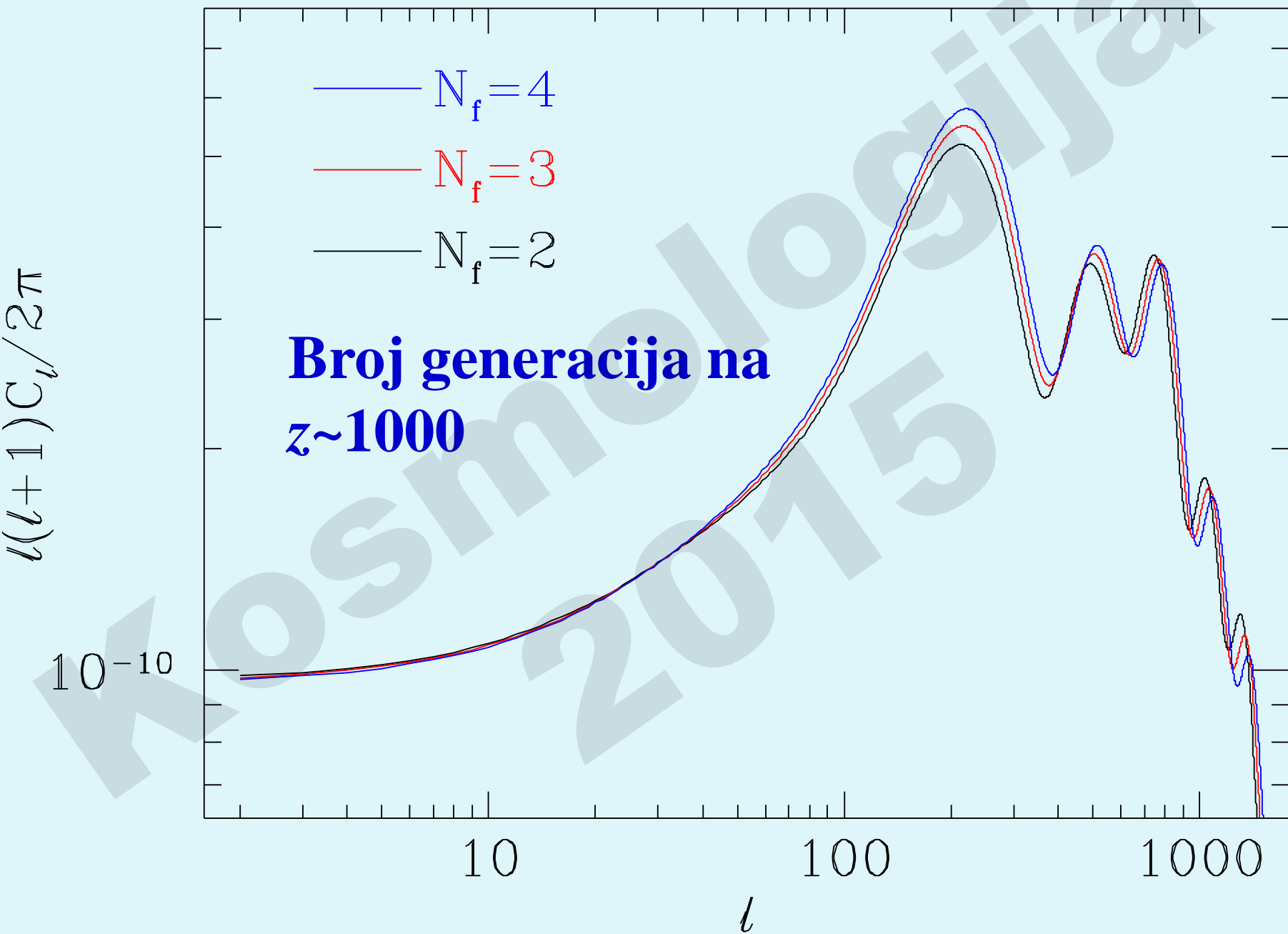
Epoha jednakosti materije i zračenja se pomera ka kasnije



**Više ranog integrisanog SW**

- Amplitude pikova rastu
- Položaji pikova se pomeraju na manje skale, tj. na veće  $l$





# Vremenske varijacije fundamentalnih konstanti

- Stara ideja: Dirac (1937) sugerira da  $\dot{G}/G \sim 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$

## Varirajuće $\alpha$ i CMB anizotropije

Battye et al. PRD 63 (2001) 043505

QSO apsorpcione linije:

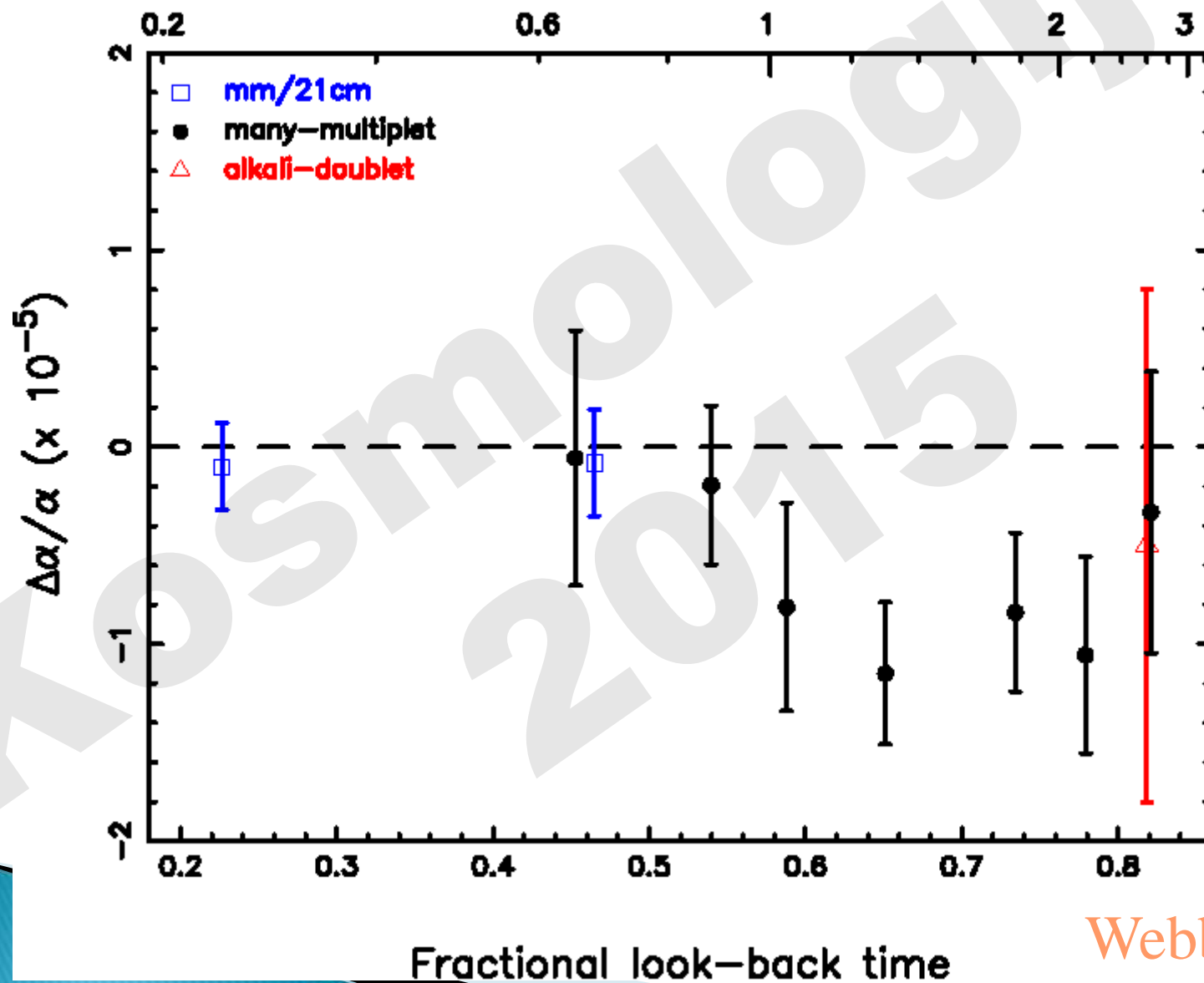
$$\delta\alpha \equiv [\alpha(t_{10 \text{ Gyr}}) - \alpha(t_0)] / \alpha(t_0) = -0.72 \pm 0.18 \times 10^{-5}$$

# Relativne ekv. širine linija

$$\delta\alpha = -0.72 \pm 0.18 \times 10^{-5}$$

Redshift

$$0.5 < z < 3.5$$



Webb et al.

Ako se  $\alpha$  promeni

- 1) Tomsonov presek  $\sigma_T \propto \alpha^2$  se menja
- 2) Temperaturna zavisnost  $x_e$  i zavisnost rekombinacione ravnoteže se menja

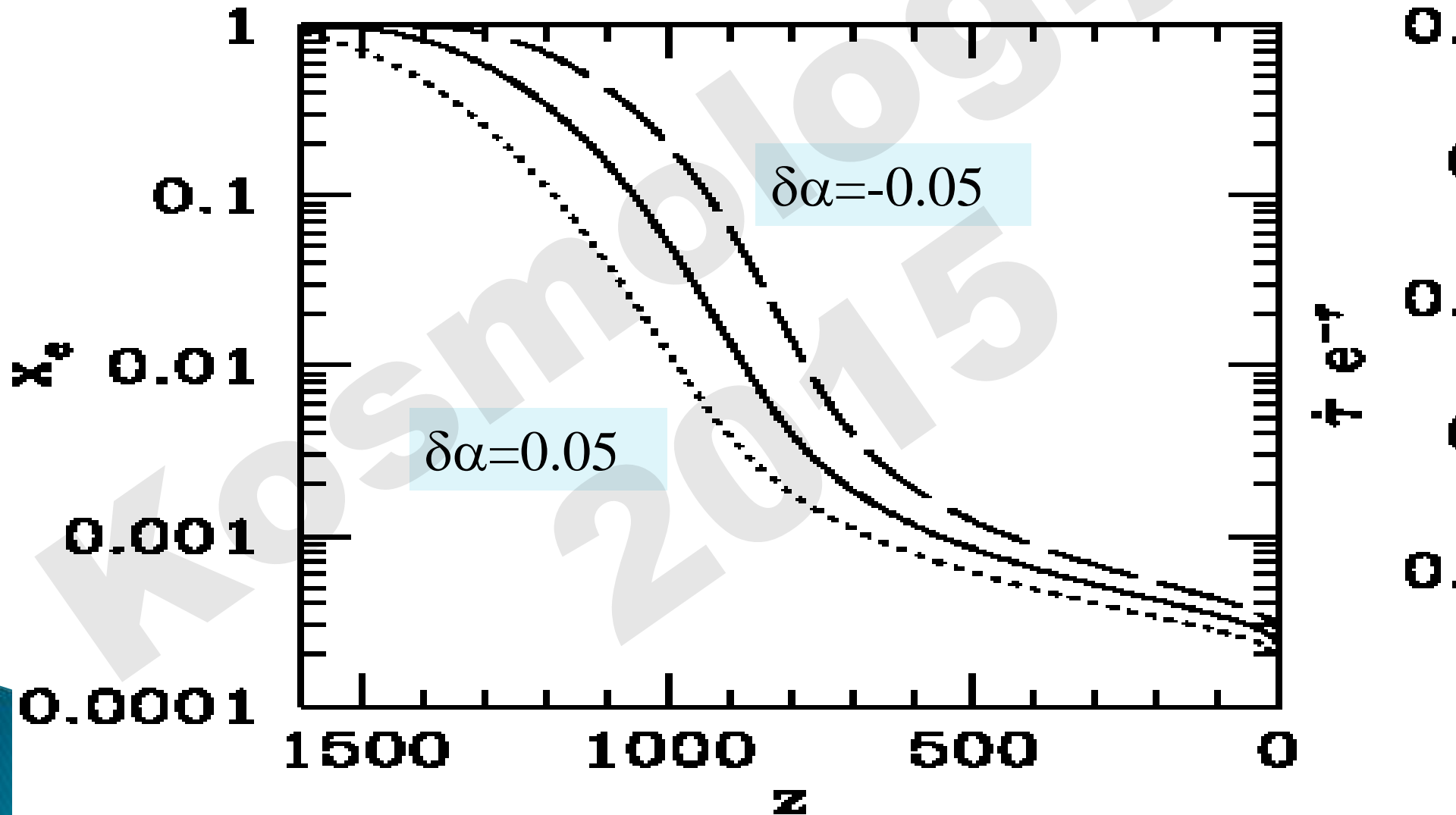
Npr.  $13.6 \text{ eV} = \alpha^2 m_e c^2 / 2$  se menja!

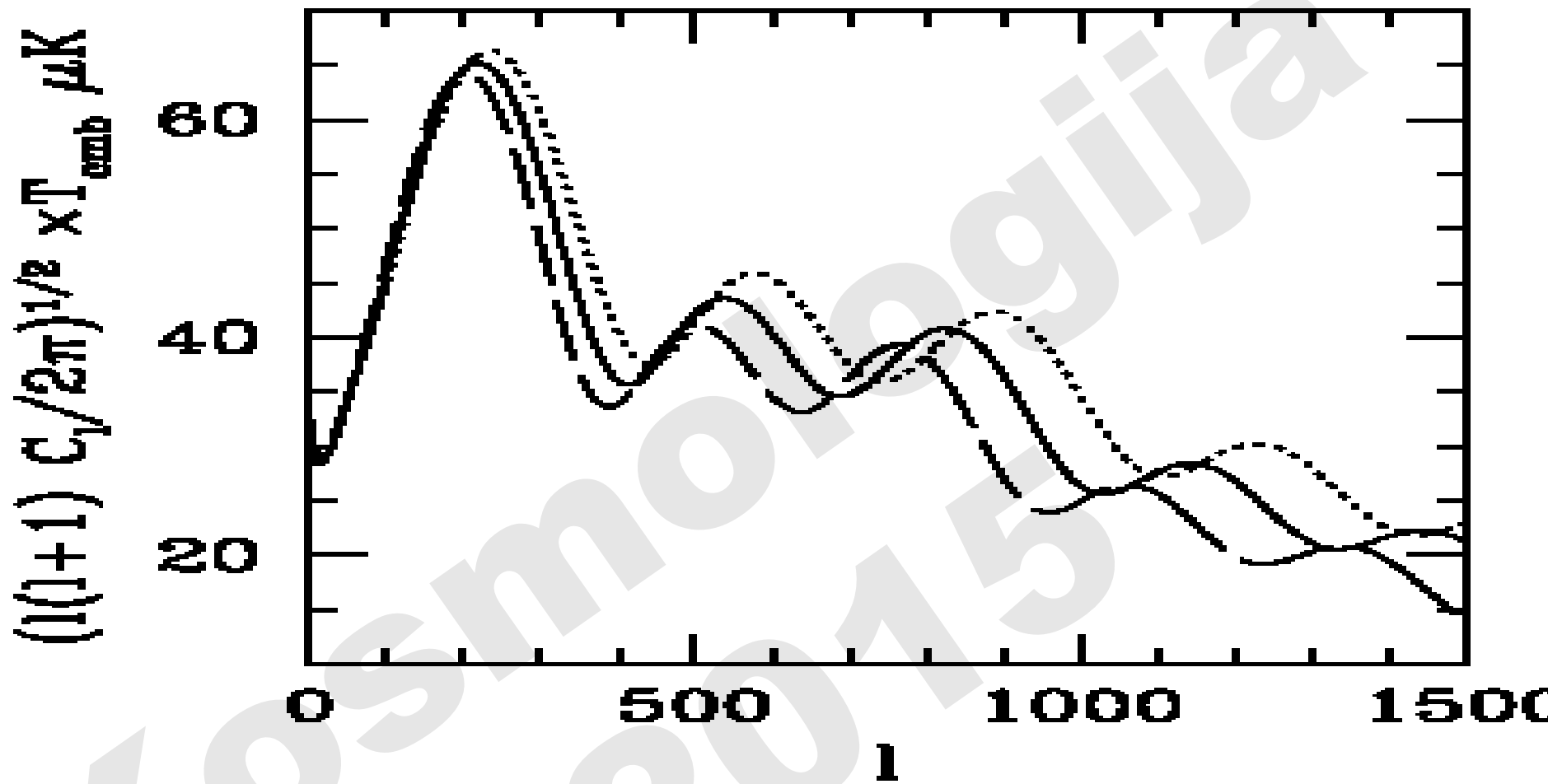
**Ako je  $\alpha$  bilo manje, rekombinacija se desila kasnije!**

**If  $\delta\alpha = \pm 5\%$ ,  $\Delta z \sim 100$**

Ravan svemir,  $\Omega_M=0.3$ ,  $h=0.65$ ,  $\Omega_B h^2=0.019$

## Jonizovana frakcija





Fluktuacije temperature

Pikovi se pomeraju ka manjem  $l$  za manje  $\alpha$  pošto je svemir bio veći u doba rekombinacije!

# Gravitaciona konstanta?

- ▶  $G$  može biti vezano sa skalarnim poljem (npr. u superstrunskim teorijama)
- ▶ Alternativna gravitacija? Npr. Brans–Dicke / skalarno–tenzorska teorija
  - $G \propto 1/\phi$  (skalarno polje)
- ▶ Stroga ograničenja iz Sunčevog sistema (i binarnog pulsara): mora biti veoma blizu OTR
- ▶ **Ali to ne mora važiti u ranom svemiru!**
- ▶ WMAP baza podataka nudi ograničenje:  
 $|\Delta G/G| < 0.05$  ( $2\sigma$ )

**Ako je  $G$  bilo veće u ranom svemiru,  
veličina horizonta je bila manja:**

$$c/H = c\sqrt{(3/8\pi G\rho)}$$

**Pikovi se pomeraju  
na veće  $l$**



$\phi_{G_0/G}$

$\alpha=0.05, \beta=0.00$  - - -

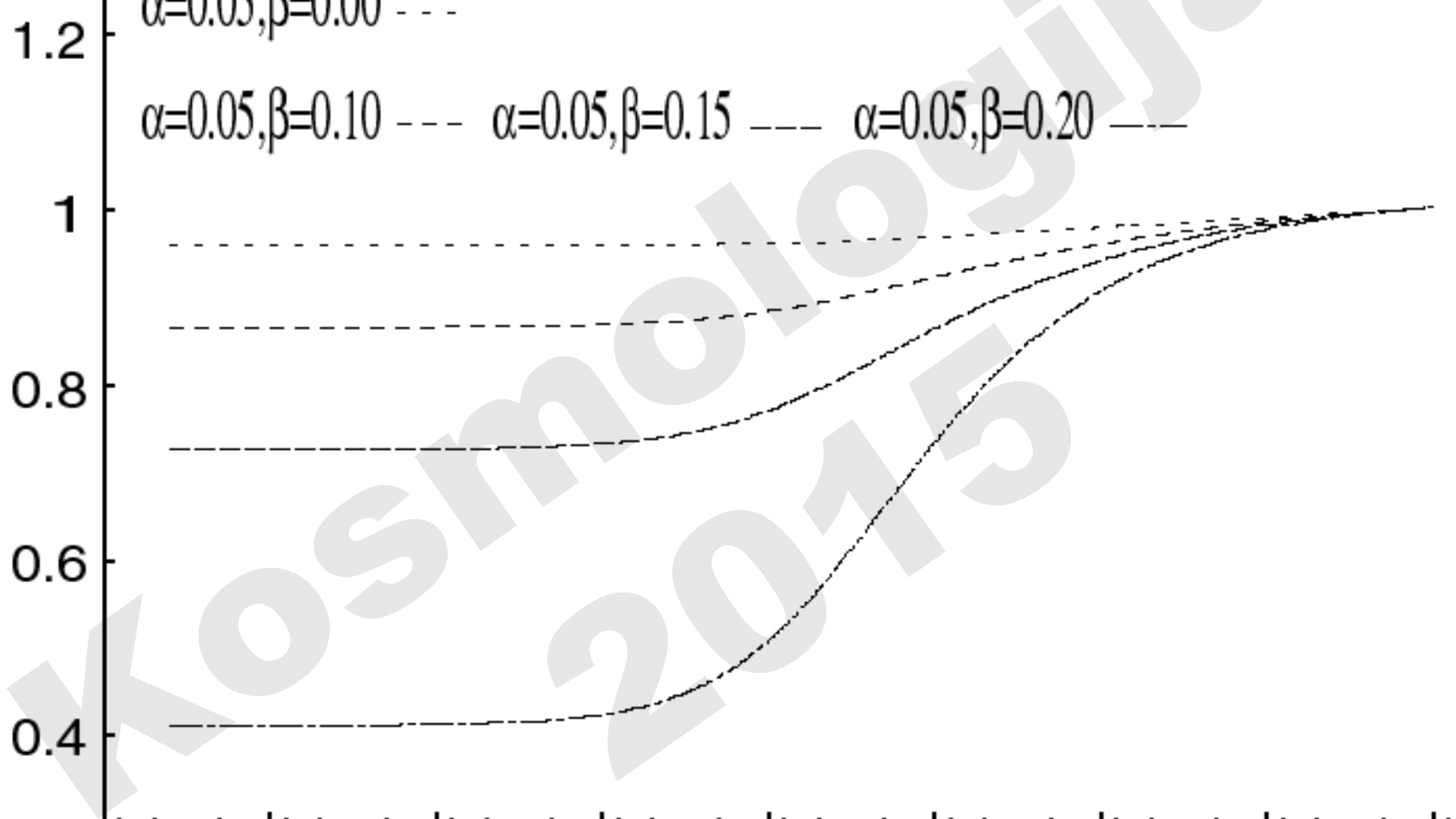
$\alpha=0.05, \beta=0.10$  - - -

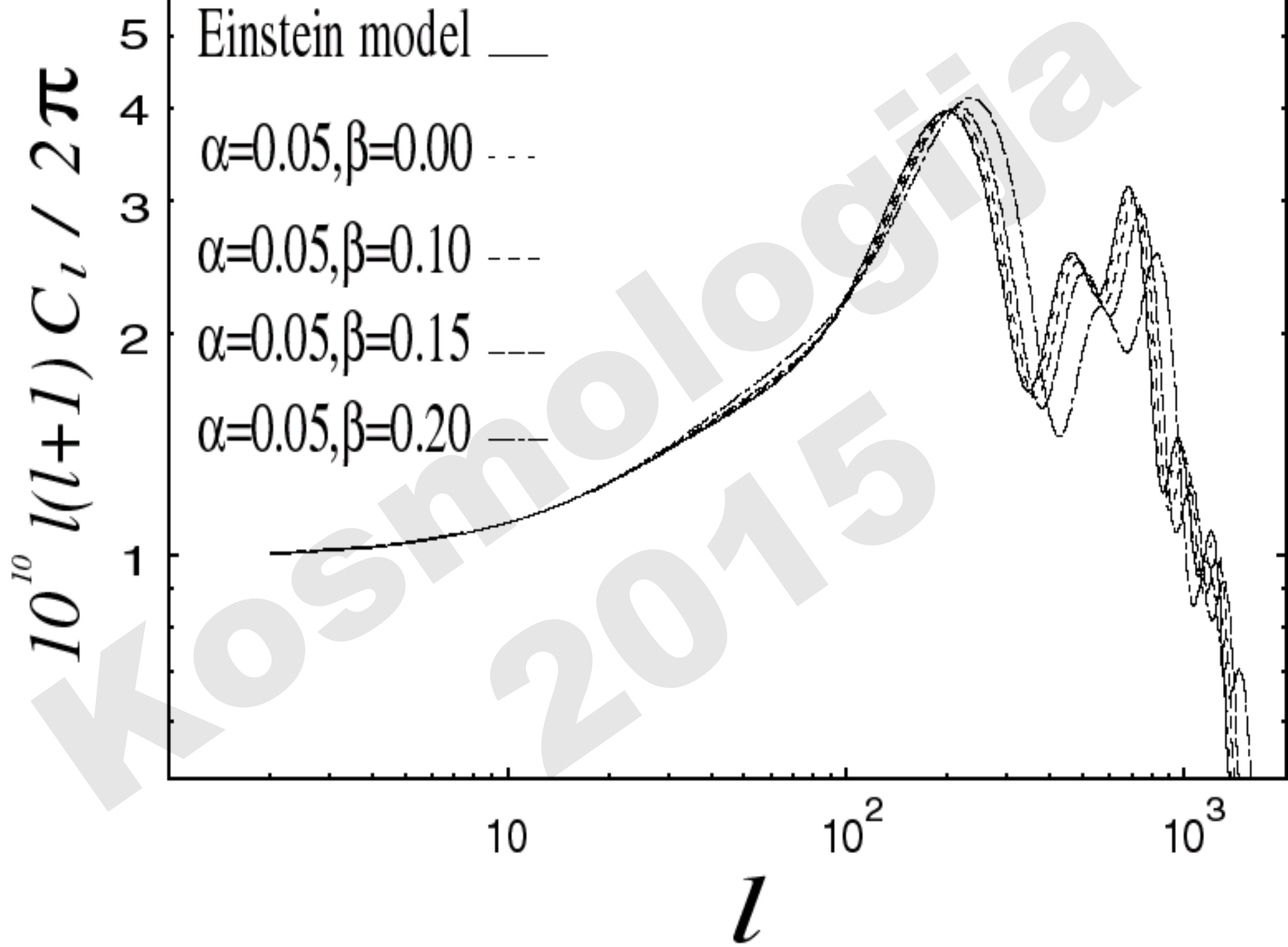
$\alpha=0.05, \beta=0.15$  - - -

$\alpha=0.05, \beta=0.20$  - - -

$10^8$   $10^7$   $10^6$   $10^5$   $10^4$   $10^3$   $10^2$  10 1

$1+z$





# Ograničenje na $m_\nu$ i $N_{\text{eff}}$

## WMAP 3yr Data; Spergel et al. 2007

Data Set	$\sum m_\nu$ (95% limit for $N_\nu = 3.04$ )	$N_\nu$
WMAP	1.8 eV (95% CL)	—
WMAP + SDSS	1.3 eV (95% CL)	$7.1^{+4.1}_{-3.5}$
WMAP + 2dFGRS	0.88 eV (95% CL)	$2.7 \pm 1.4$
CMB + LSS +SN	0.66 eV (95% CL)	$3.3 \pm 1.7$

## WMAP 5yr Data; Komatsu et al. 2009

- $\Sigma m_\nu < 1.5 \text{ eV (95\% CL)}$  samo WMAP
- $< 0.66 \text{ eV (95\% CL)}$  WMAP+SDSS(BAO)+SN
- $N_\nu = 4.4 \pm 1.5 \text{ (68\% CL)}$  WMAP+BAO+SN+HST

# Ograničenje na konstantu fine strukture

- ▶ VELIKA DEBATA da li smo do sada videli varijaciju  $\alpha$  u QSO absorpcionim spektrima!
- ▶ Vremenska promena  $\alpha$  utiče na rekombinacione procese i rasejanja CMB fotona na elektronima
- ▶ WMAP 3yr baza podataka:
  - $-0.039 < \Delta\alpha/\alpha < 0.010$  (Stefanescu 2007)
- ▶ Očekuje se dosta od analize PLANCK-ovih rezultata!

# Šta nam još ostaje?

- Plankova epoha (strunska kosmologija)
- GUT-epoha
- Inflacija
- Bariogeneza
- Nukleosinteza
- [Rekombinacija]
- Linearni rast perturbacija
- Nelinearni rast perturbacija (a.k.a. formiranje galaksija)