

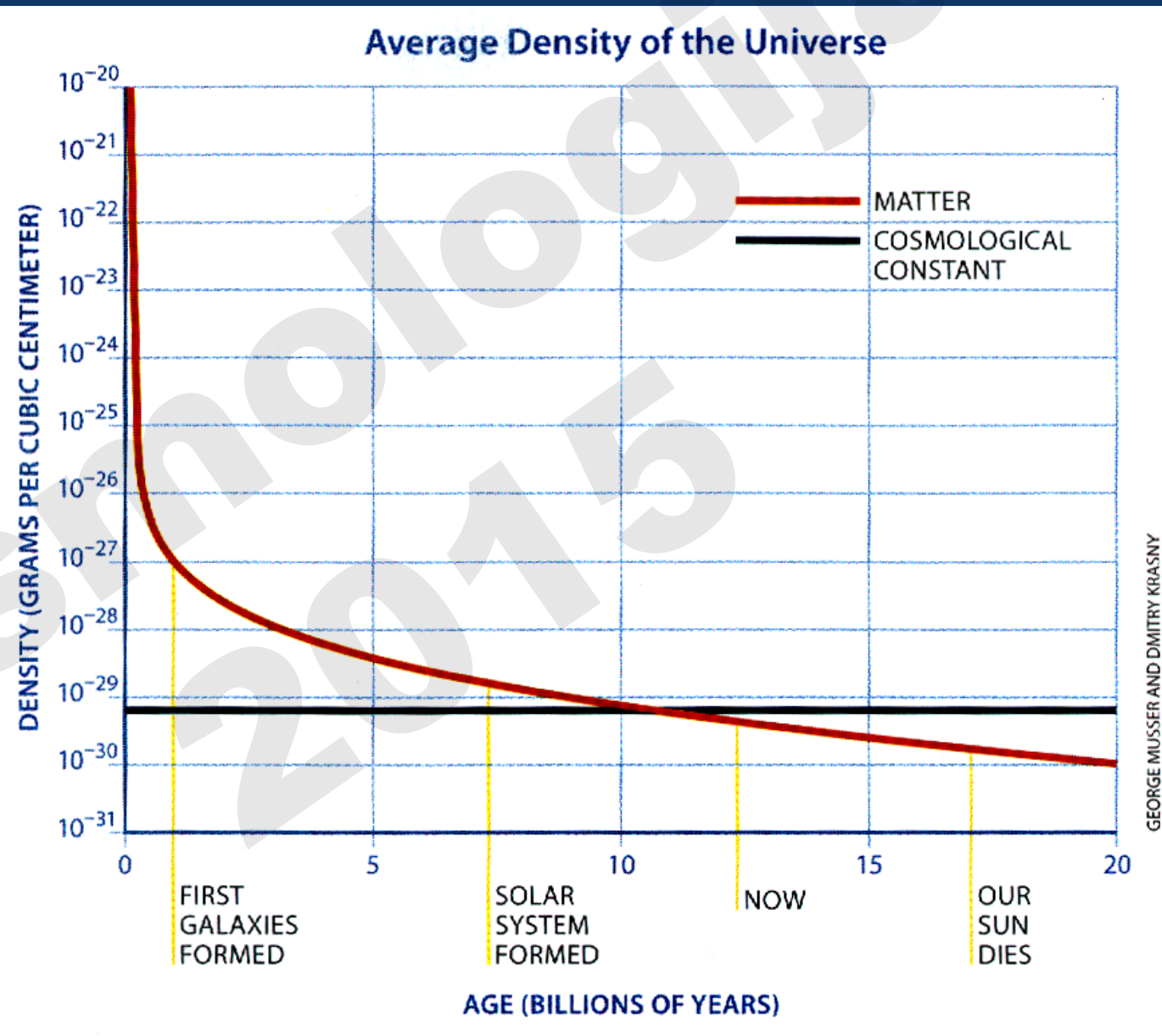
# Akustične oscilacije, integrirani Saks-Vulfeov efekat

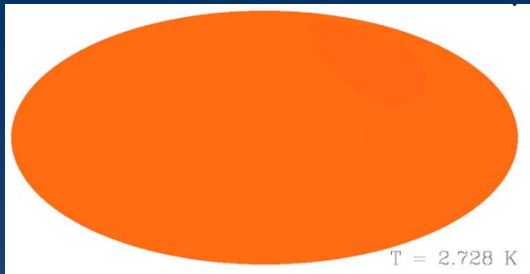
+

Šta se još dešavalo sa CMB  
fotonima na  $1090 > z \geq 0$

04. 09. 2015.

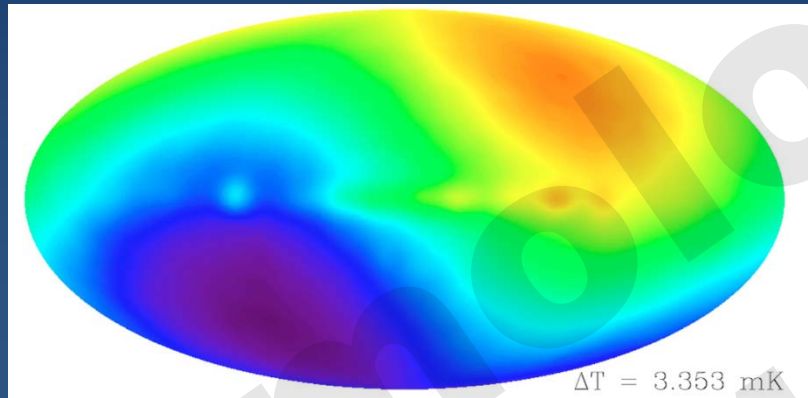
Ako je  $w = 1...$





(skoro) izotropno 2.728K crno telo

T = 2.728 K

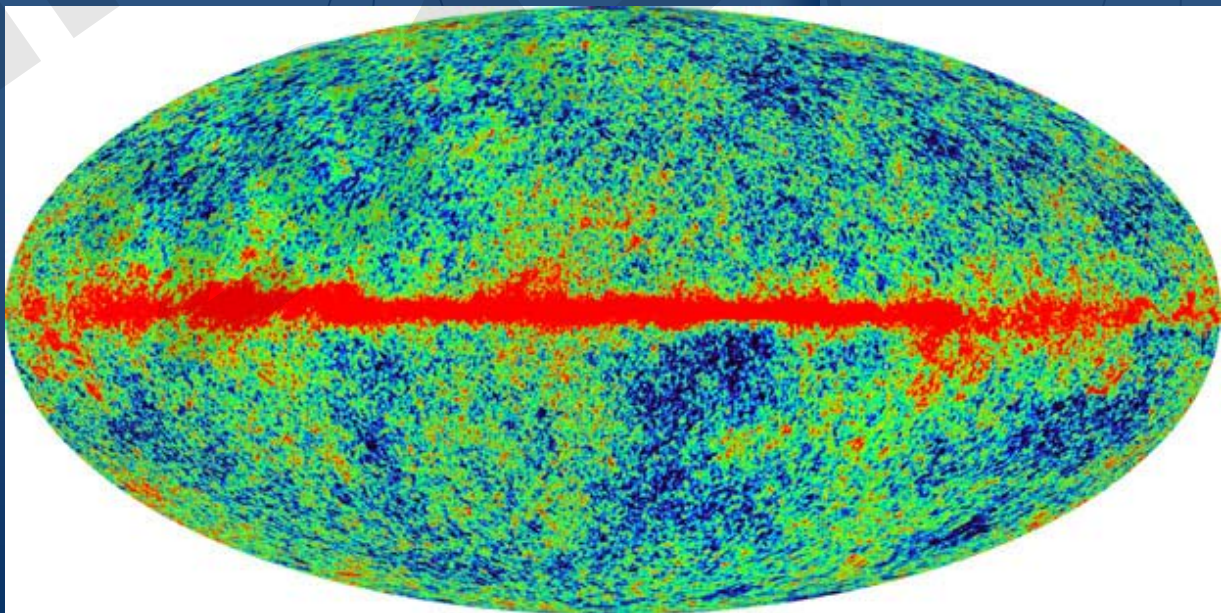


Dipolna anizotropija  
( $l = 1$ )

$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$

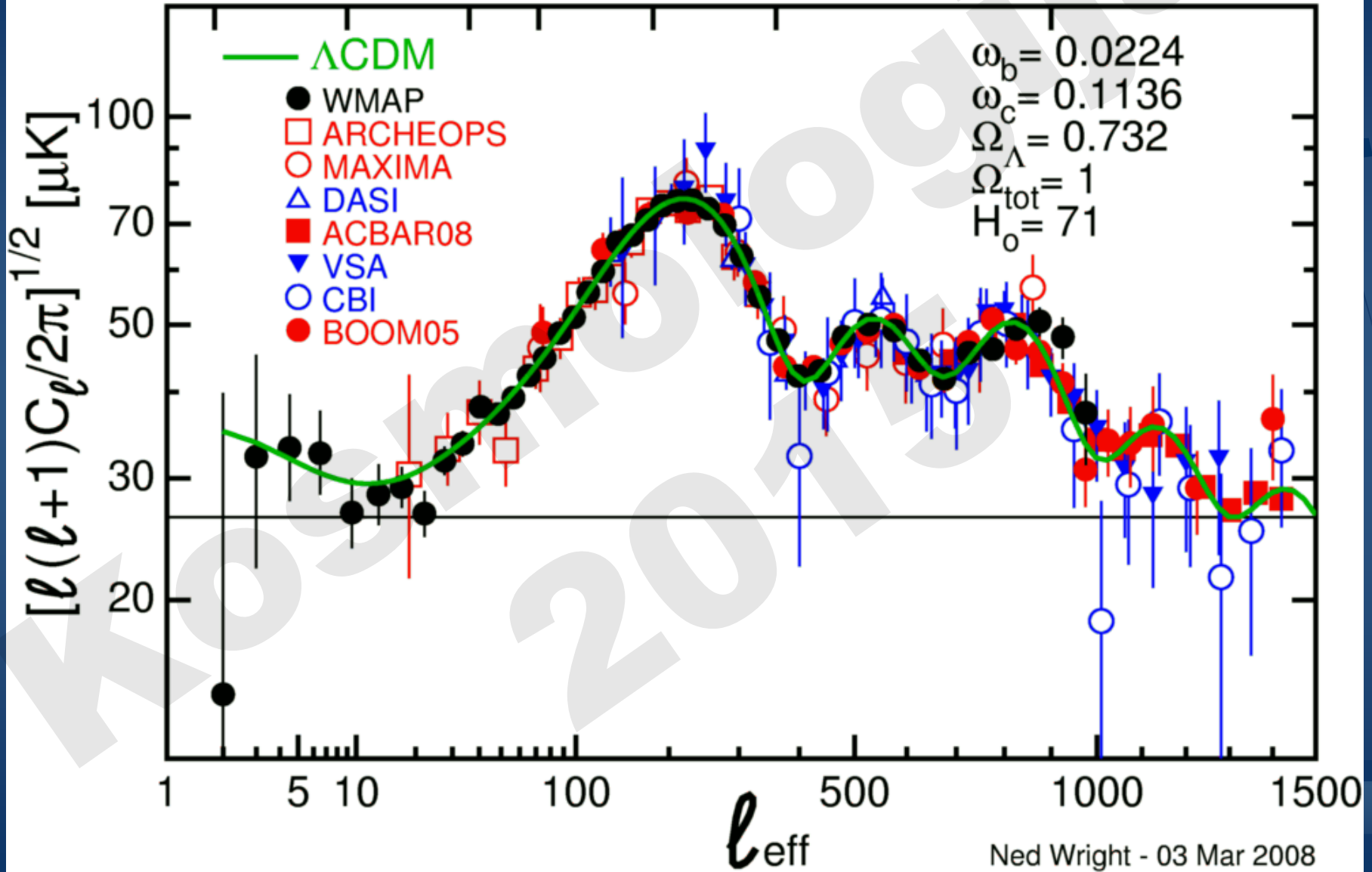
$O(10^{-5})$  perturbacije  
(+ Galaksija)

Posmatranja:  
mikrotalasno nebo  
danas (WMAP)  
sutra PLANCK?

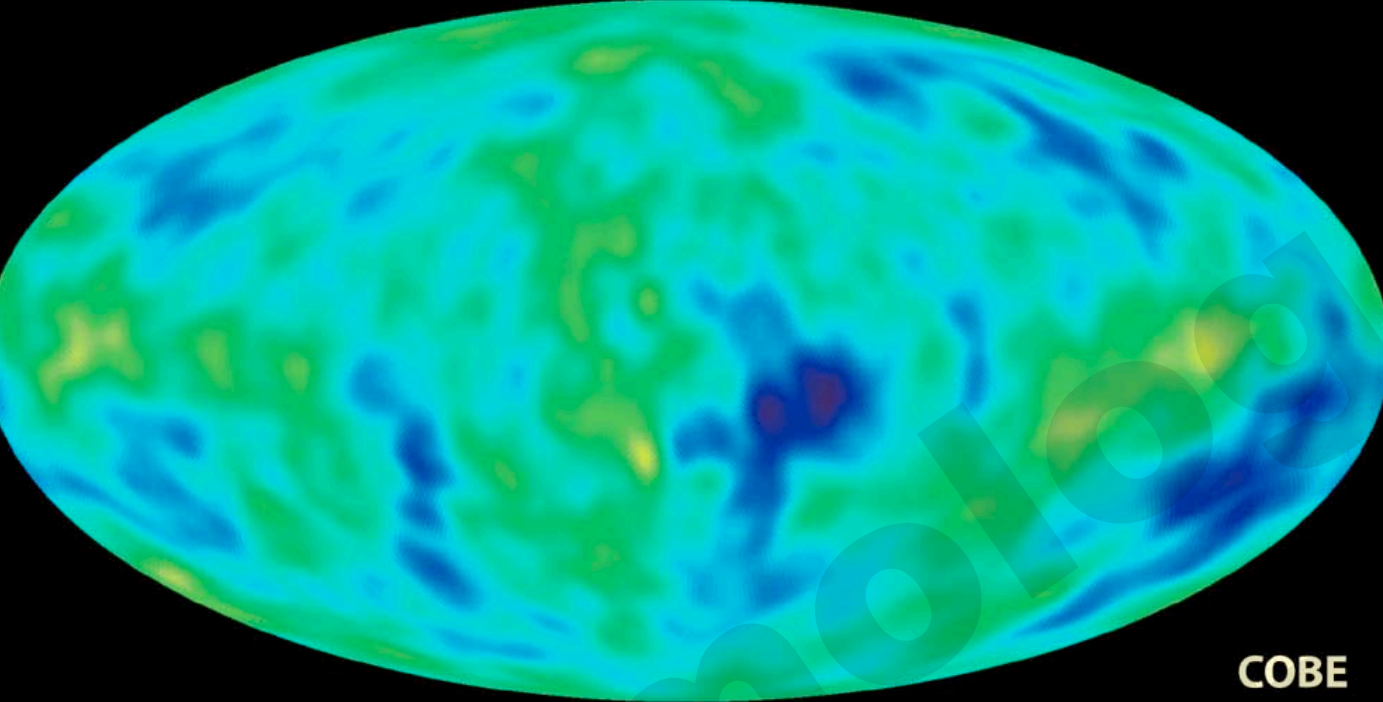


Angular Scale [Degrees]

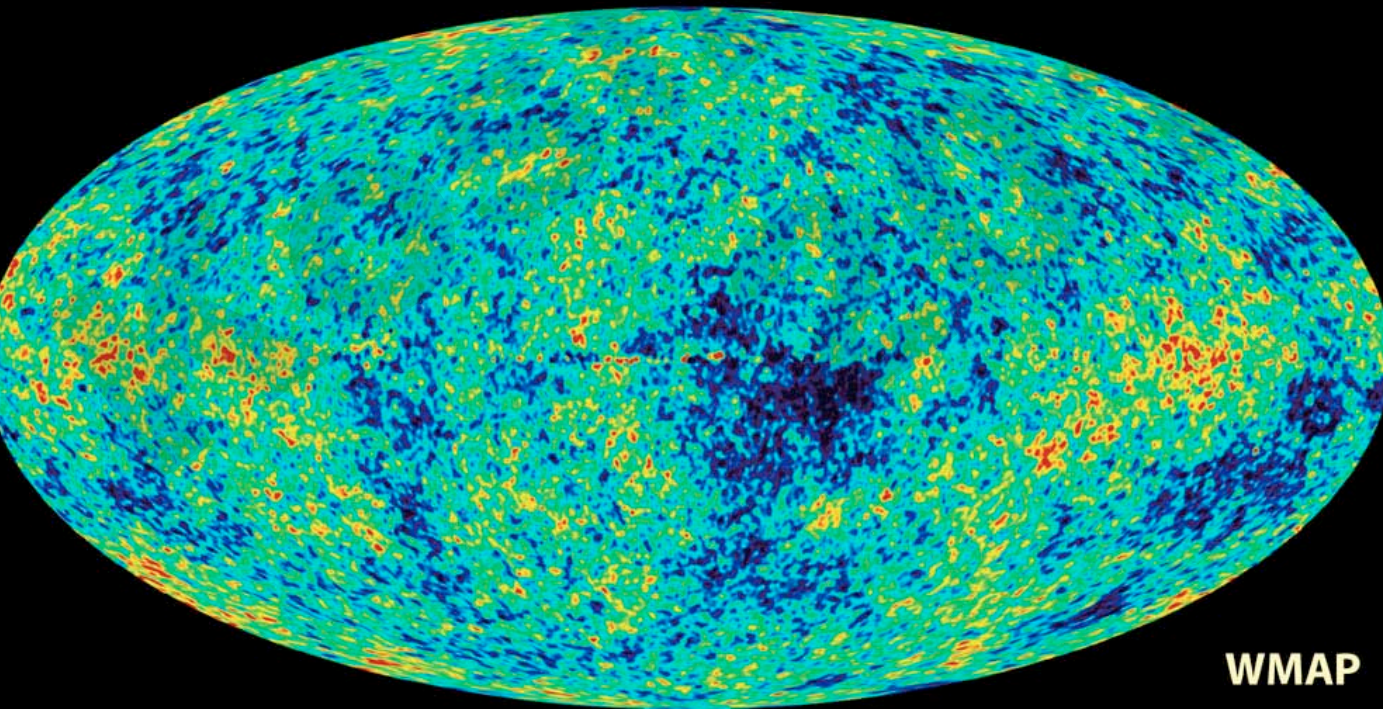
100 20 5 2 1 0.5 0.2



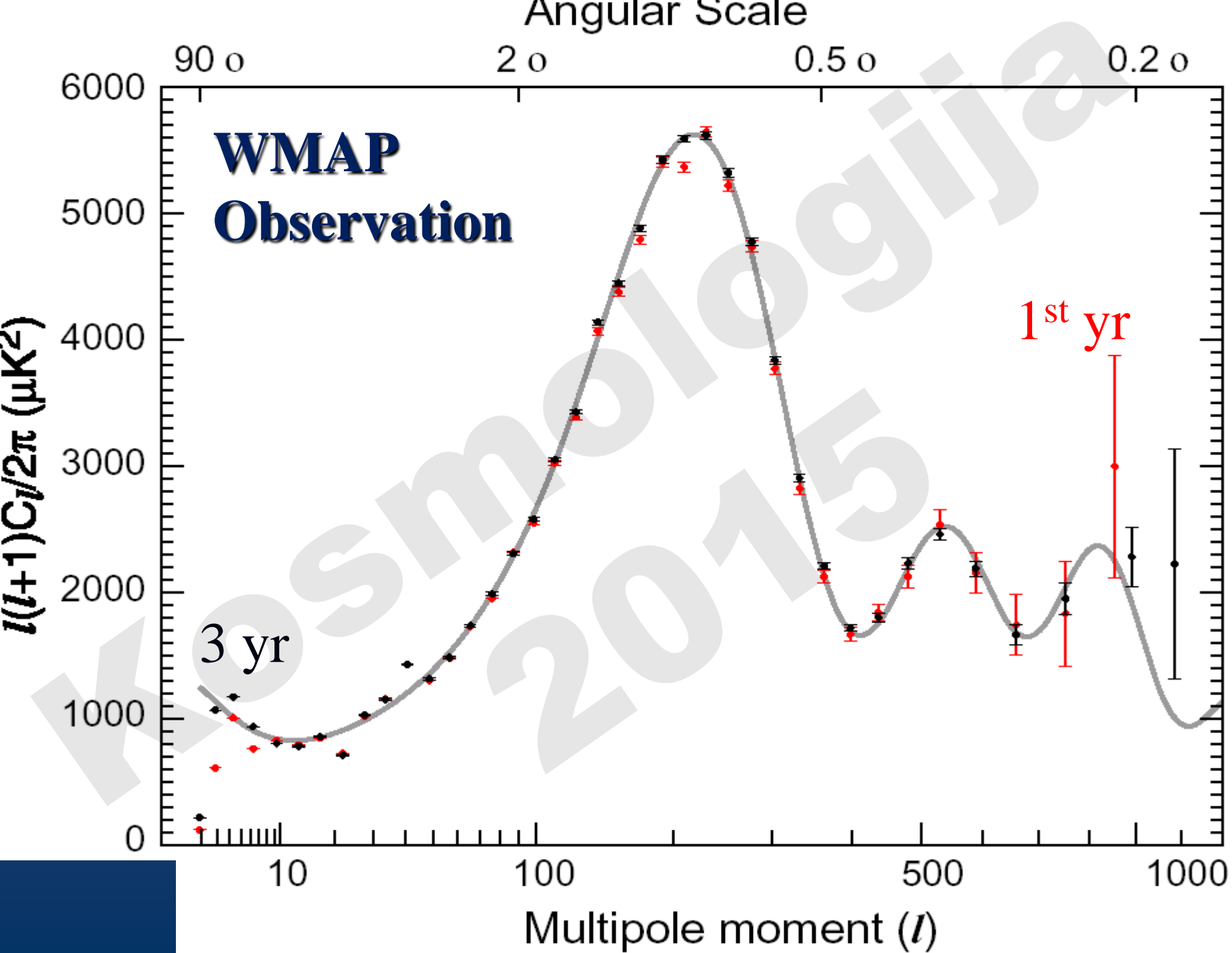
# COBE & WMAP



COBE



WMAP



# Veličina horizonta u doba rekombinacije

$$\begin{aligned}d_{\text{H}}^c(t_{\text{rec}}) &\equiv \int_0^{t_{\text{rec}}} \frac{cdt}{a} = \int_0^{a_{\text{rec}}} \frac{cda}{Ha^2} = \frac{c}{H_0} \int_0^{a_{\text{rec}}} \frac{1}{\sqrt{\Omega_{\text{m}}/a^3} a^2} \\&= \frac{2c}{H_0 \sqrt{\Omega_{\text{m}}}} a_{\text{rec}}^{1/2} = \frac{2c}{H_0 \sqrt{\Omega_{\text{m}}}} (1 + z_{\text{rec}})^{-1/2} \\&= 180 (\Omega_{\text{m}} h^2)^{-1/2} \left( \frac{1100}{1 + z_{\text{rec}}} \right)^{1/2} \text{ Mpc} \quad (\end{aligned}$$

- Materija već dominira na površi poslednjeg rasejanja!
- $a$  – faktor skaliranja,  $H$  - Hablov parametar

# A danas?

- Ako zanemarimo tamnu energiju...
- $z=0$ , umesto  $z=1100$

$$\begin{aligned}d_H(t_0) &= 180(\Omega_M h^2)^{-1/2} (1100)^{1/2} \text{Mpc} \\ &= 6000(\Omega_M h^2)^{-1/2} \text{Mpc}\end{aligned}$$

- Za "nove standardne" vrednosti, ovo je **16.1 Gpc** (MNOGO više od euklidske vrednosti  $\tau_0 c!$ )



# Ugaona veličina horizonta na $z \approx 1100$

- Ugaona veličina čestičnog horizonta iz doba rekombinacije

$$\theta = d_H^c(t_{rec}) / d_H(t_0) = 0.030 \text{ rad} = 1.7^\circ$$



1.7 stepeni

$d_H(z=0)$

$d_H^c(z=1100)$

# Ugaoni spektral perturbacija

$$\Delta T/T(\mathbf{x}) \equiv \Theta(\mathbf{x}) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}(\mathbf{x}) Y_{\ell m}(\theta, \phi)$$

$$\langle a_{\ell m} \rangle = 0$$

$$\langle a_{\ell m} a_{\ell' m'}^* \rangle = \delta_{\ell \ell'} \delta_{m m'} C_{\ell}$$

$$\begin{aligned} \langle |\Theta|^2 \rangle &= \sum_{\ell} \sum_{\ell'} \sum_{m} \sum_{m'} \langle a_{\ell m} a_{\ell' m'}^* \rangle \\ &\quad \times \int d\theta \int d\phi Y_{\ell m}(\theta, \phi) Y_{\ell', m'}^*(\theta, \phi) \\ &= \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{2\ell + 1}{4\pi} C_{\ell} \end{aligned}$$

$$\langle |\Theta|^2 \rangle = \sum_l \frac{(2l+1)}{4\pi} C_l \approx \int \frac{(2l+1)}{4\pi} C_l dl = \int \frac{dl}{l} \frac{(2l+1)l}{4\pi} C_l$$

- $\Rightarrow$  logaritamski interval amplitude perturbacija po  $l$  je  $l(2l+1)C_l/4\pi$ , a često se koristi i

$$l(l+1)C_l/2\pi$$

- $l$  odgovara ugaonoj veličini  $\theta$

$$l = \pi/\theta = 180 \times [(1 \text{ stepen})/\theta]$$

- COBE ugaona rezolucija =  $7^\circ$ ,  $l < 16$
- Veličina horizonta ( $1.7^\circ$ ) odgovara  $l = 110$

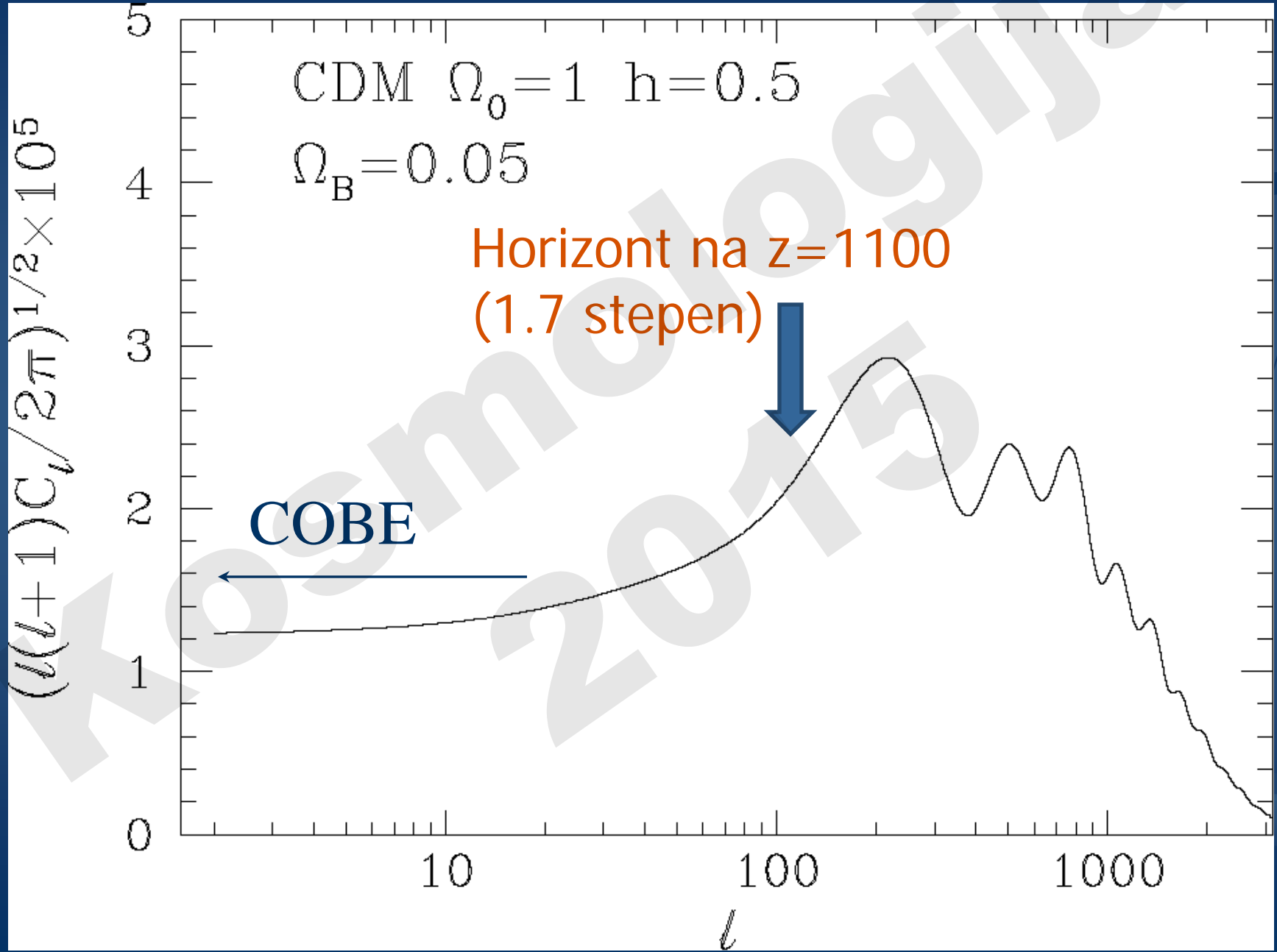
# Ugaona skala

180

10

1

0.1



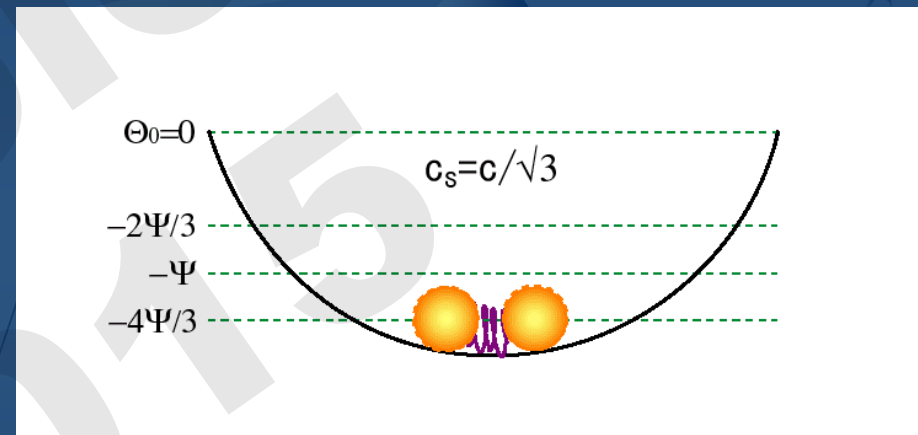
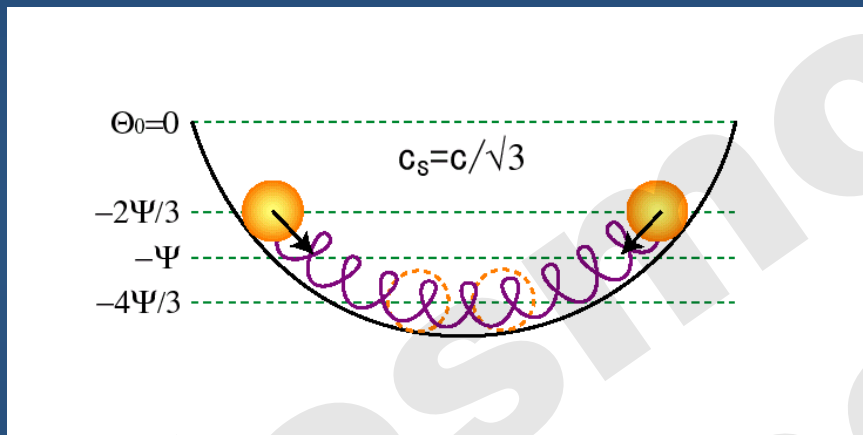
# Otkud akustične oscilacije?

- Pre rekombinacije, barioni su bili u obliku kompresibilne plazme
- **Intrinsične anizotropije** se manifestuju kao zvučni talasi u plazmi!
- Drugi (i potonji dalji) pik spektra ugaonih perturbacija - **akustični** (Saharovljev) pik

■ **Akustične oscilacije:** intermedijarne skale

⇒ skale manje od zvučnog horizonta

■ **Analogija:** lopte na opruzi u potencijalnoj jami  
(masa lopti  $\propto \Omega_B h^2$ )



□ Velike talasne dužine > zvučnog horizonta ostaju pri početnim uslovima do poslednjeg rasejanja ⇒ čisti Sachs-Wolfe

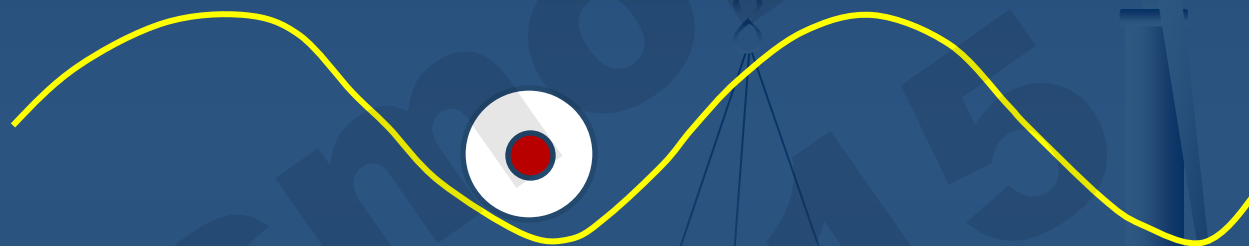
□ Kompresija (depresija) na poslednjem rasejanju ⇒ prvi, drugi i dalji vrhovi

Zvučni horizont



difuzija

Duge talasne dužine



Srednje talasne dužine

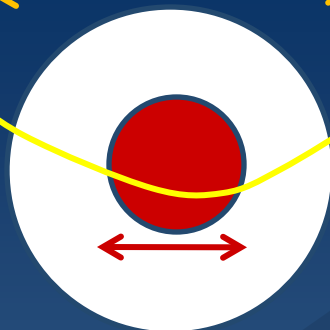


Kratke talasne dužine

**Vrlo rana epoha**

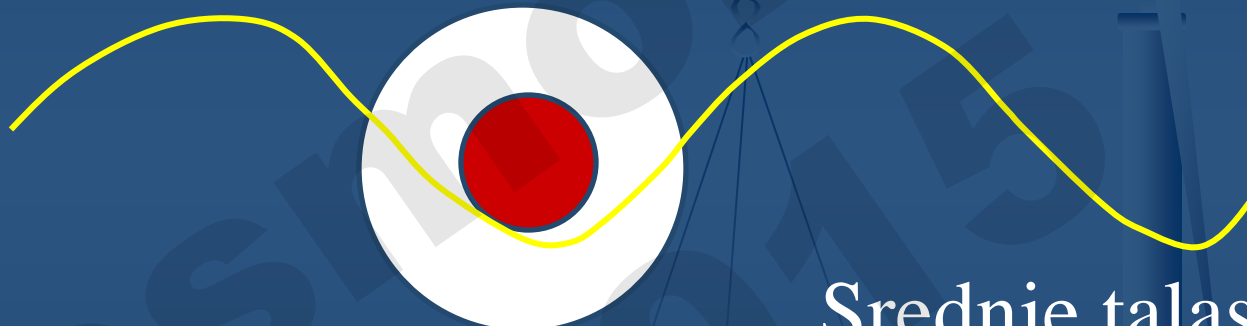
Svi modovi su van horizonta!

zvučni horizont

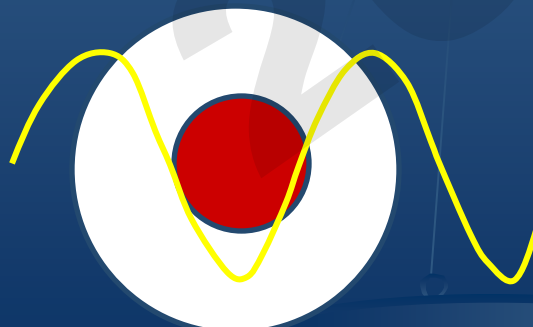


difuzija

Duge talasne dužine



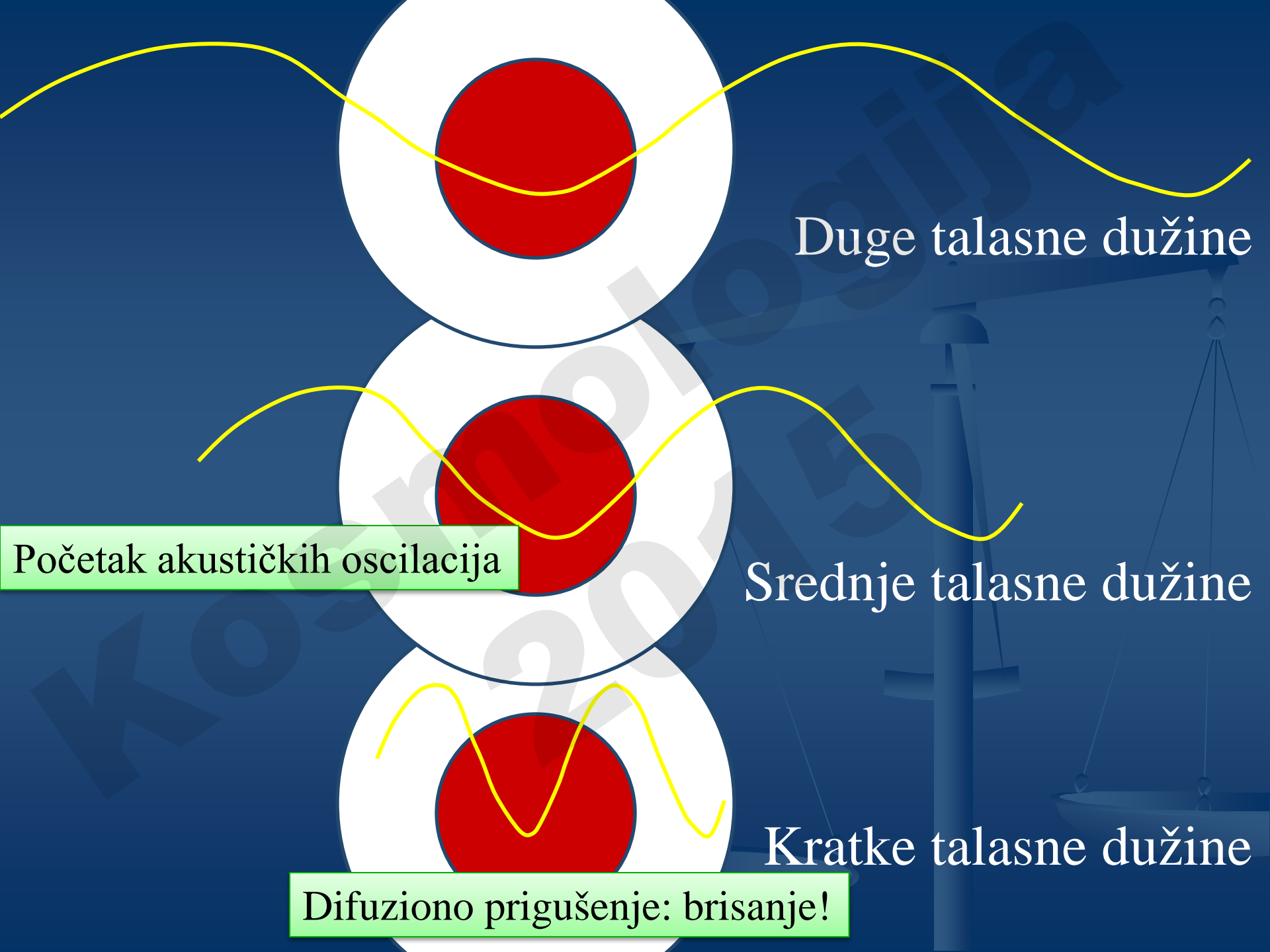
Srednje talasne dužine



Kratke talasne dužine

Početak akustičkih oscilacija





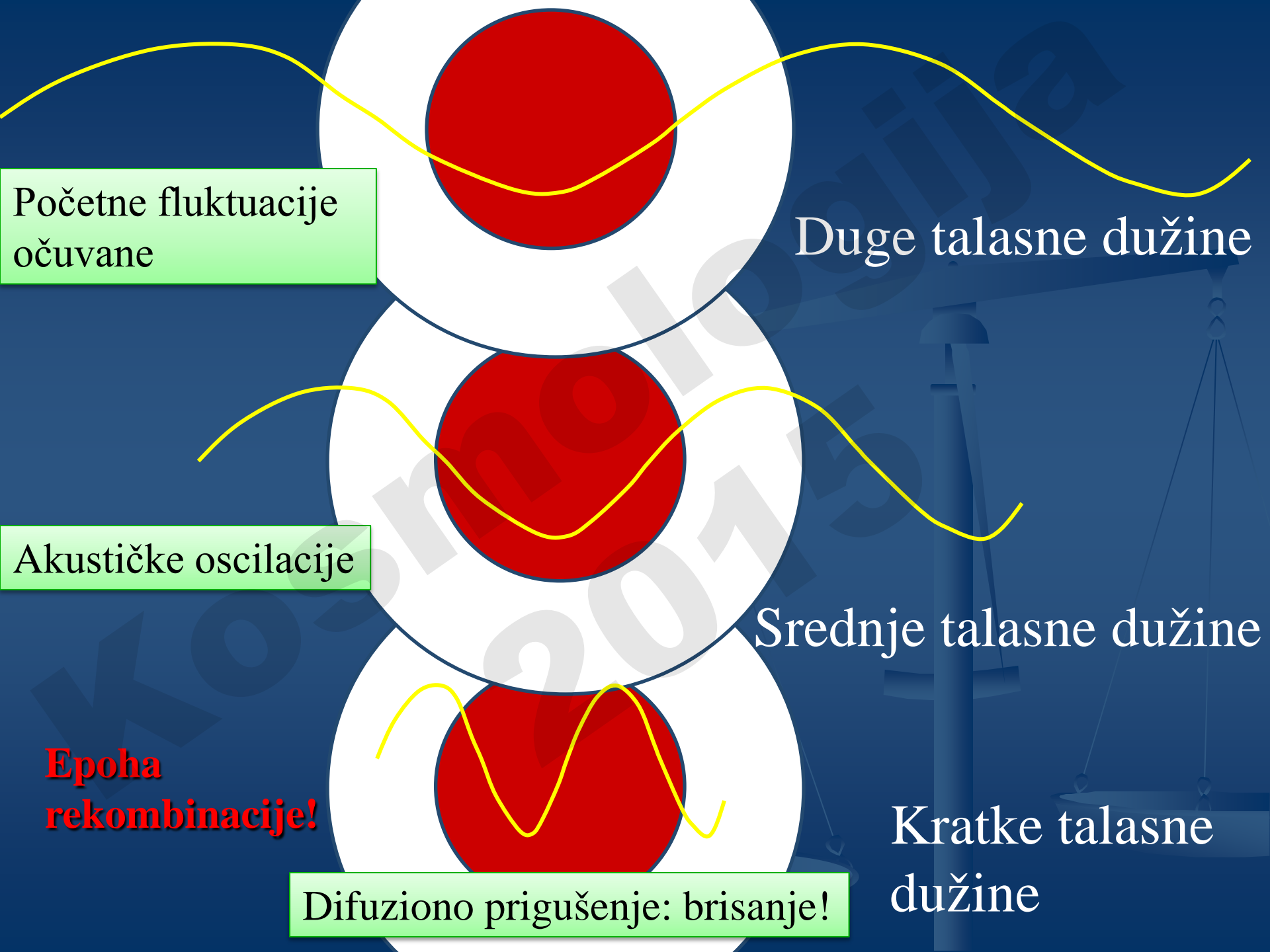
Duge talasne dužine

Početak akustičkih oscilacija

Srednje talasne dužine

Kratke talasne dužine

Difuziono prigušenje: brisanje!



Početne fluktuacije  
očuvane

Duge talasne dužine

Akustičke oscilacije

Srednje talasne dužine

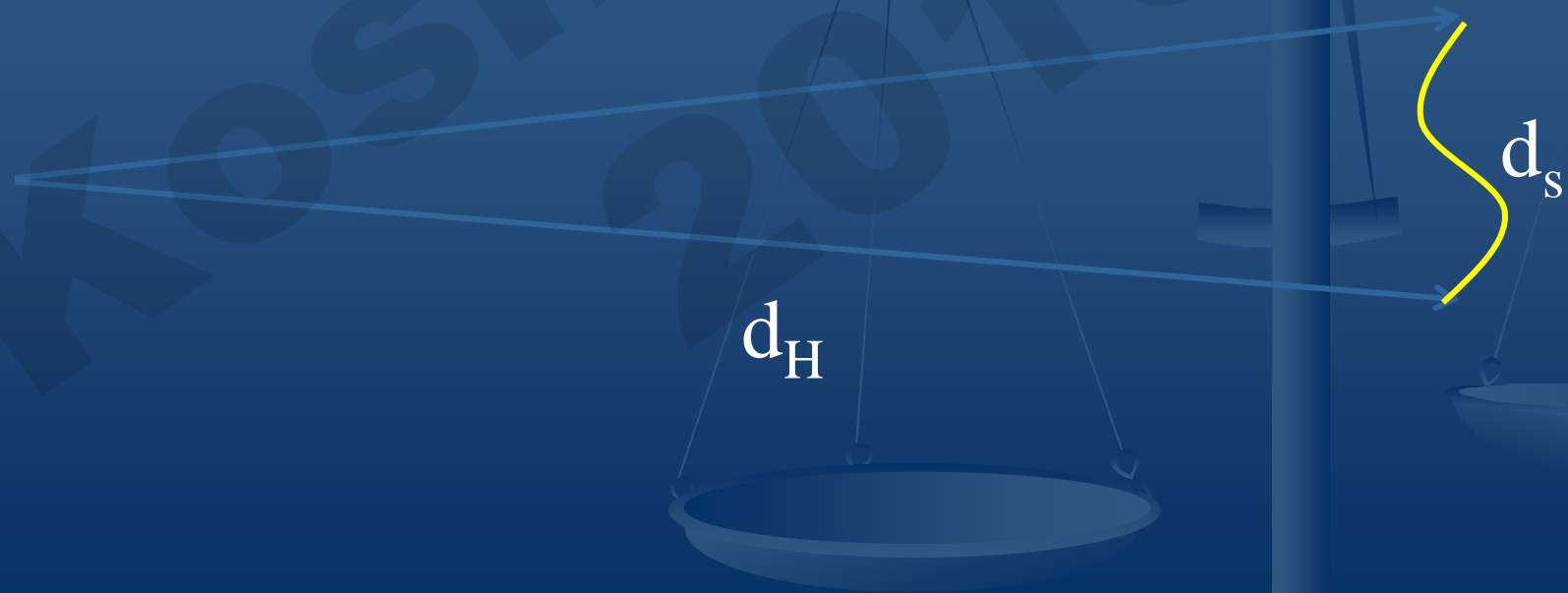
**Epoha  
rekombinacije!**

Difuziono prigušenje: brisanje!

Kratke talasne  
dužine

# Lokacije vrhova: projekcije zvučnog horizonta

- Zvučni horizont:  $d_s^c (z=1100) = (c_s/c) d_H^c$   
( $z=1100$ )
- Čestični horizont  $d_H$



# Brzina zvuka u rekombinaciji

$$\begin{aligned}c_s^2 &= \frac{dp}{da} / \frac{d\rho}{da} \\ &= (-4c^2 \rho_\gamma / 3) / (-4\rho_\gamma - 3\rho_b) \\ &= \frac{c^2}{3} \frac{1}{1 + 3\rho_b / 4\rho_\gamma}\end{aligned}$$

- gustina bariona:

$$\rho_b = (1+z)^3 \Omega_B \rho_c = 1.88 h^2 \times 10^{-29} (1+z)^3 \Omega_B \text{ g/cm}^3$$

- gustina fotona:

$$\rho_\gamma = 4.63 \times 10^{-34} (1+z)^4 \text{ g/cm}^3$$

$$d_s^c \equiv \int dt \frac{c_s}{a} \simeq (c_s/c) d_H$$

$$\begin{aligned} d_s^c(t_{\text{rec}}) &= \frac{1}{\sqrt{3(1 + 3\rho_b/4\rho_\gamma)}} \frac{2c}{H_0 \sqrt{\Omega_m}} (1 + z_{\text{rec}})^{-1/2} \\ &= 84 (\Omega_m h^2)^{-1/2} \text{ Mpc} \end{aligned}$$

- Ovo je za  $\Omega_B h^2 = 0.02$

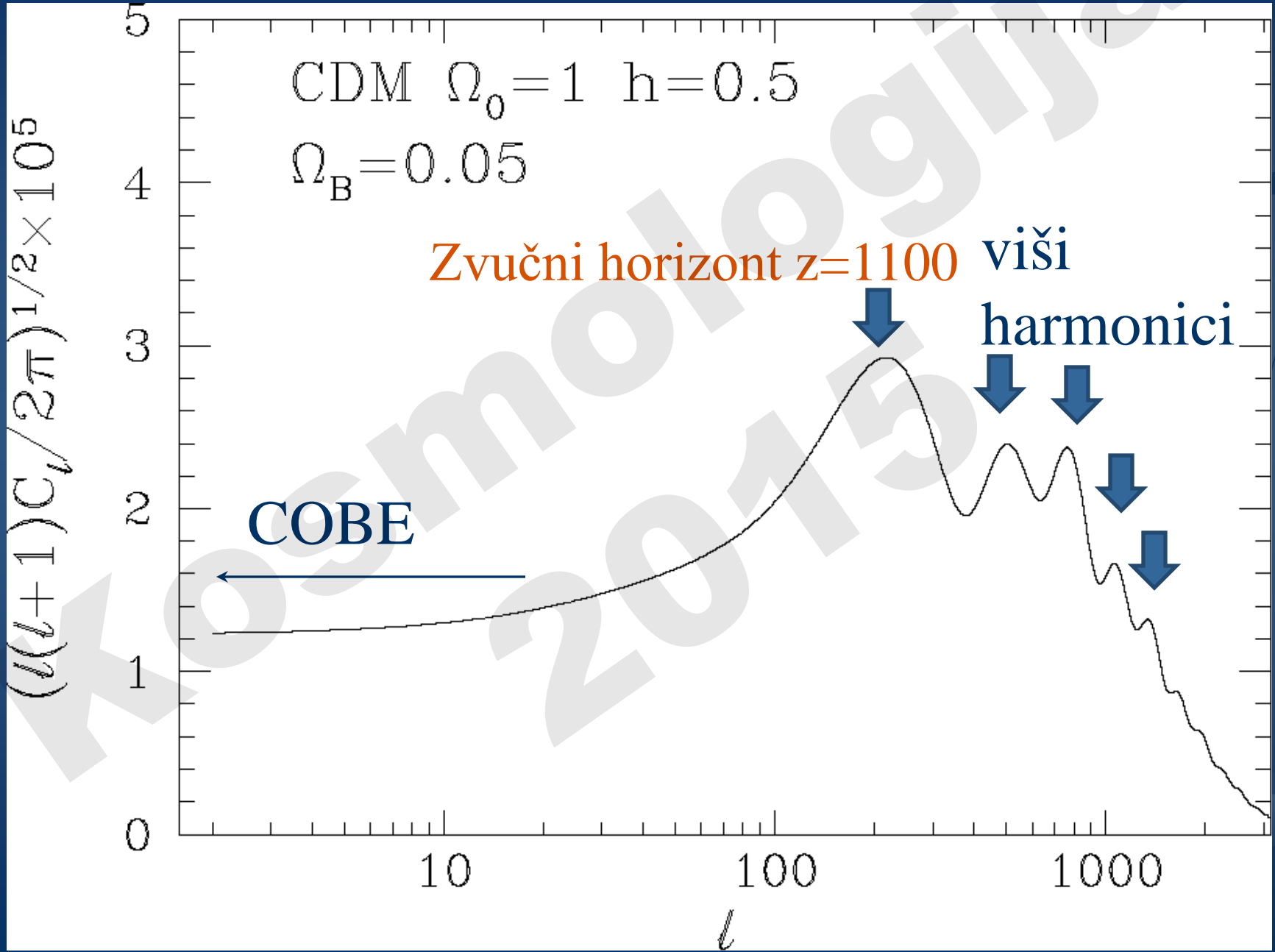
# Ugaona skala

180

10

1

0.1



# Difuziono (Silkovo) prigušenje (*diffusion damping*)

Broj rasejanja fotona po jedinici vremena:  $cn_e\sigma_T$

Srednji slobodni put:  $\lambda_f = 1/n_e\sigma_T$

$N$  je broj rasejanja tokom dotadašnjeg kosmičkog vremena. Za dominaciju materije ovo vreme je  $2/3H$

$$N\lambda_f = c(2/3H)$$

Difuzija slučajnim hodom:  $\lambda_d = \sqrt{N}\lambda_f = \sqrt{2c\lambda_f/3H}$

Usputna difuziona skala: fizička  $\times (1+z)$

$$\lambda_d^c = (1+z)\lambda_d = 1.62 \times 10^4 (\Omega_m h^2)^{-1/4} (\Omega_b h^2)^{-1/2} (1+z)^{-5/4} \text{Mpc}$$

Na površi poslednjeg rasejanja

$$\lambda_d^c(t_{\text{rec}}) = 2.55 (\Omega_m h^2)^{-1/4} (\Omega_b h^2)^{-1/2} \text{Mpc}$$

Odgovarajuće ugaone skale i  $l$  su

$$\theta_d = \lambda_d^c(t_{\text{rec}})/d_H(t_0) = 1.9 \times 10^{-4} \text{rad} = 6.4 \text{arcmin}$$

$$l_d = 180(1 \text{degree}/\theta) = 1700$$

$$\Omega_B h^2 = 0.02, \Omega_M h^2 = 0.15$$



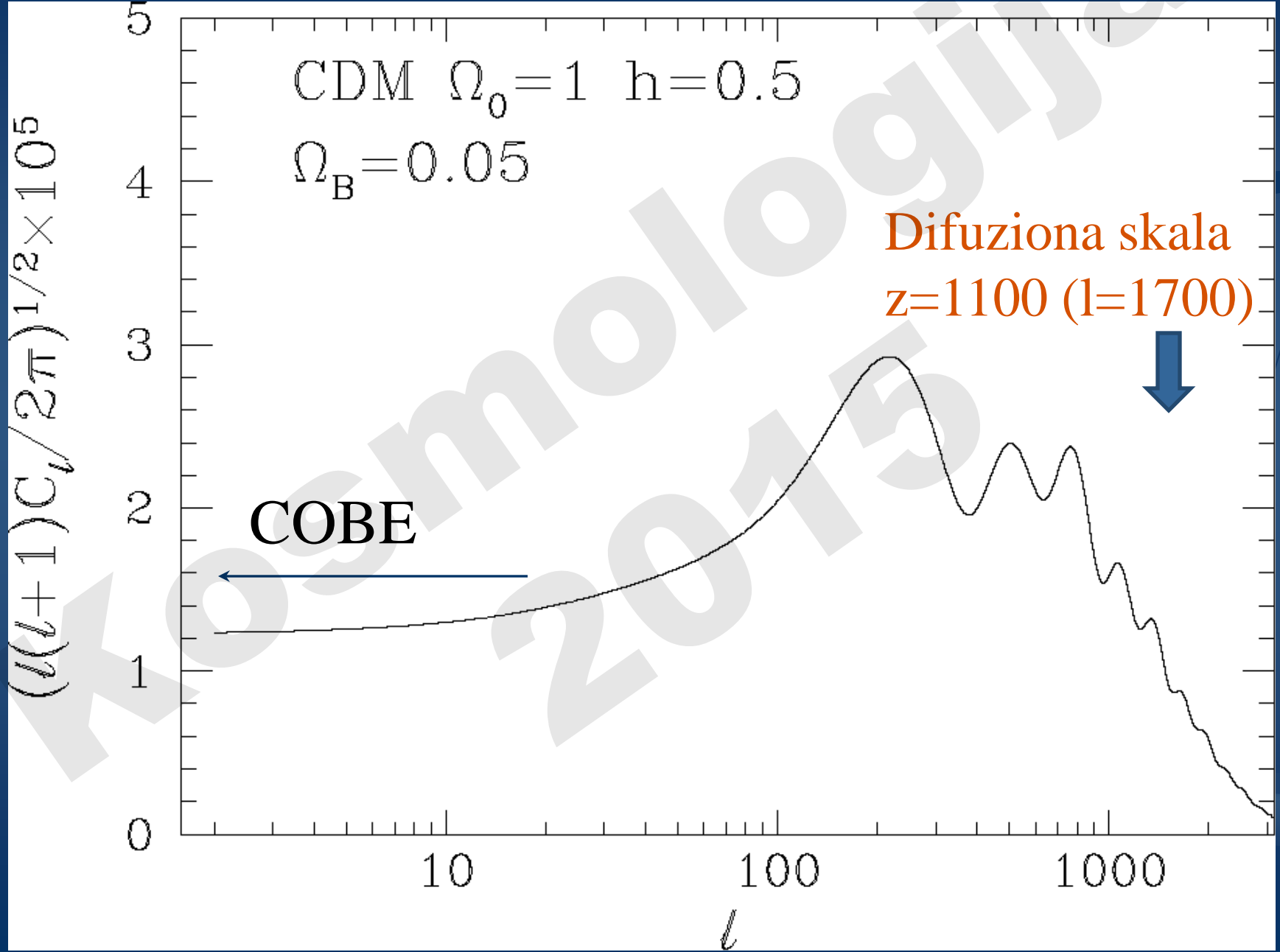
Ugaona skala

180

10

1

0.1



$(l(l+1)C_l/2\pi)^{1/2} \times 10^5$

CDM  $\Omega_0 = 1$   $h = 0.5$

$\Omega_B = 0.05$

Akustičke oscilacije

Pozni ISW za tamnu energiju

COBE

Gravitacioni crveni  
pomak (Sachs-Wolfe)

rani ISW

Difuziono  
prigušenje

Velike

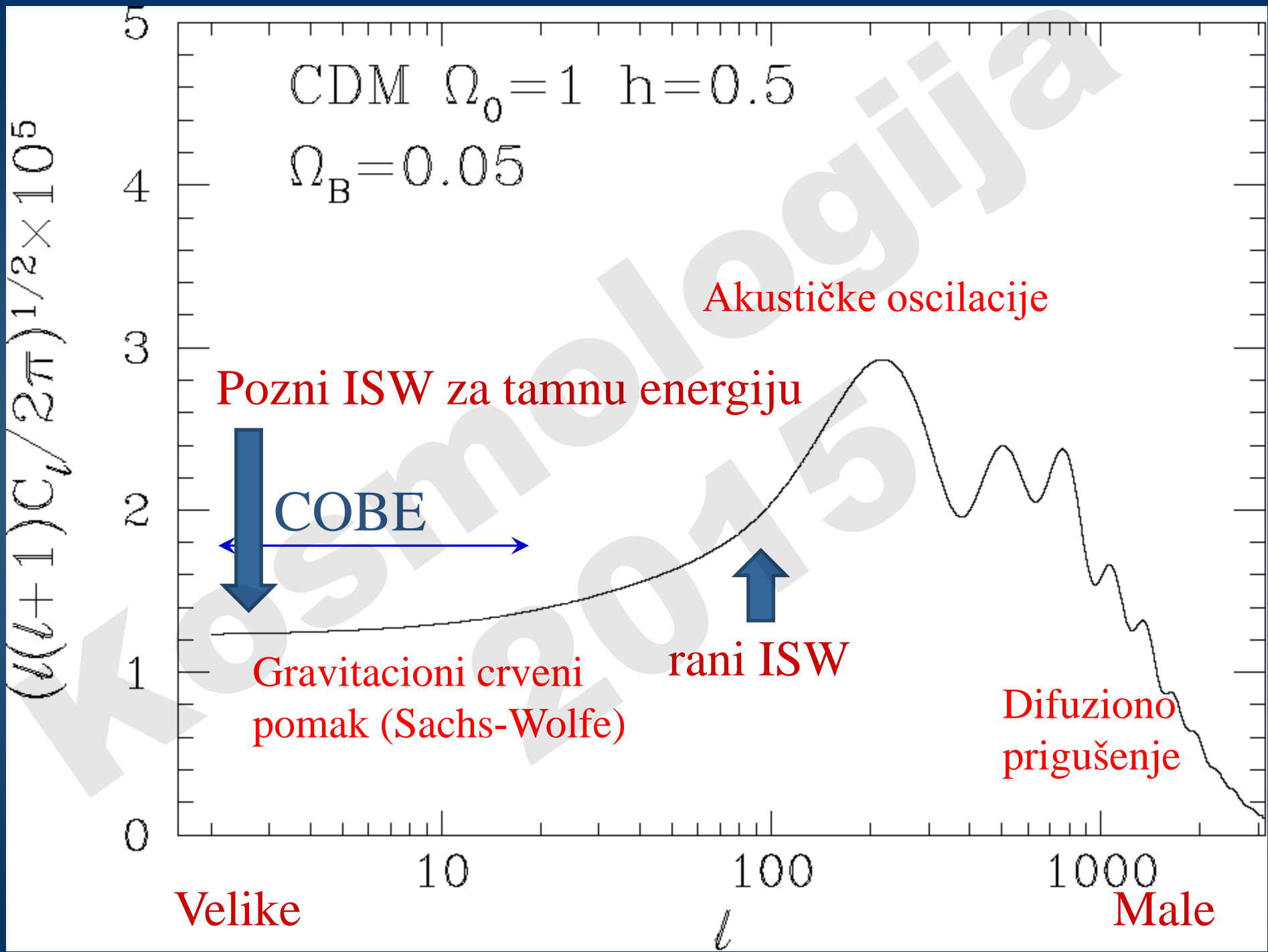
10

100

1000

Male

$l$





**Vreme**



**za**



**pauzu!**

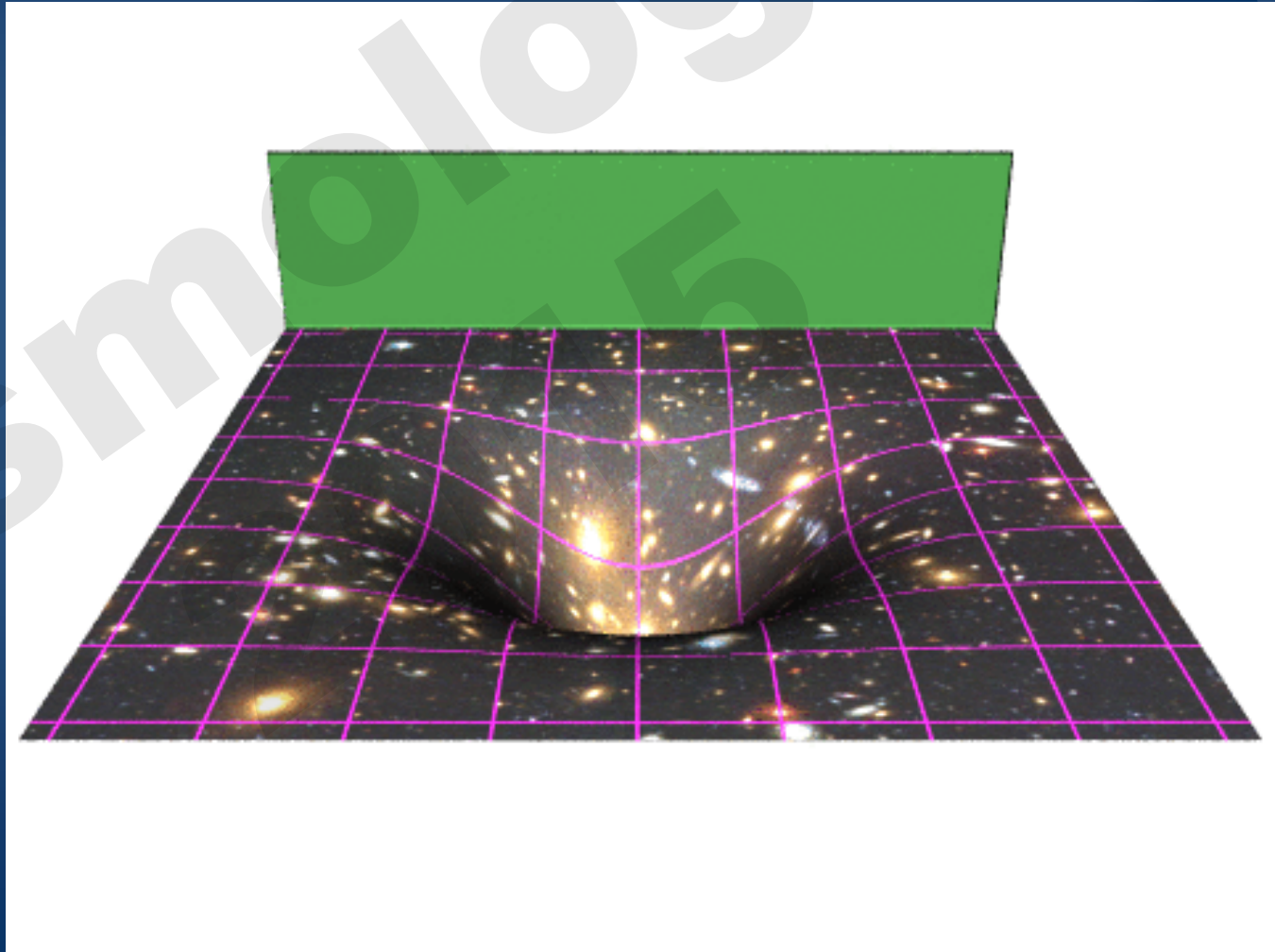
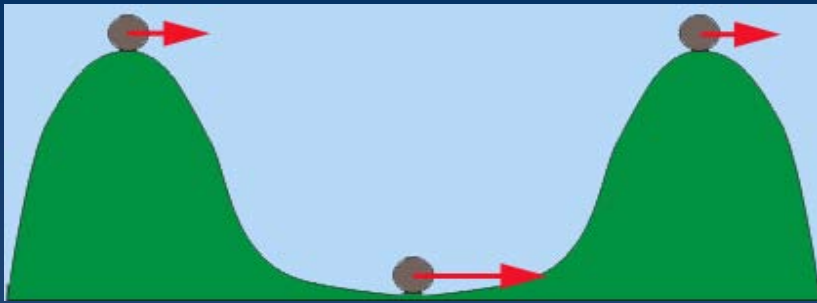


# Integrirani SW efekat

- Prolazak fotona kroz vremenski-zavisni potencijal
- Za Ajnštajn-de Sitterov model potencijal je konstantan - **nema integriranog SW efekta!**
- ISW ispituje zakrivljenost/tamnu energiju u kasnim epohama
- Tamna energija razbijanjem struktura u kasnim vremenima utiče na  $C_l$  za malo  $l$
- Ponekad se naziva **Rees-Sciama efekat**
- Ali i kad je materija počela da dominira, potencijali su se smanjili, što daje doprinos na  $l \sim 100-200$

kasni ISW

rani ISW



# Šta stvara vremenski zavisian potencijal?

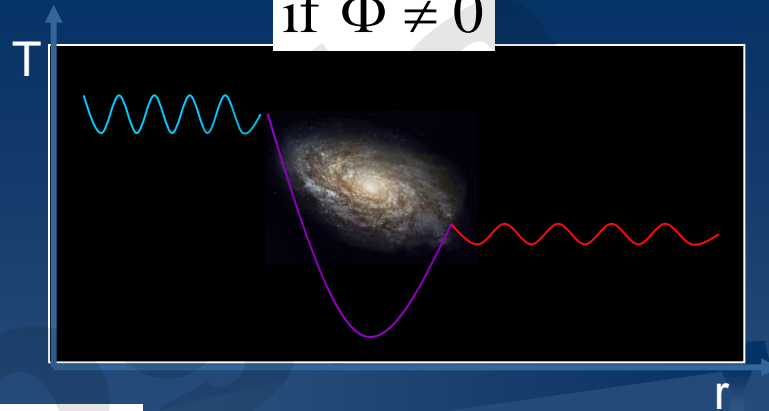
- Tamna energija! ISW može biti odličan test tamne energije.
  - fluktuacije temperature se generišu rastom (raspadom) strukture na velikoj skali ( $z \sim 1$ )



Foton stiće plavi pomak zbog raspada  
 $E = |\Psi_1 - \Psi_2|$

Gravitacioni potencijal strukture se raspada zbog tamne energije

if  $\dot{\Phi} \neq 0$



■ Obični SW:

$$\Theta_{USW} \propto \Delta\Phi$$

■ Integrisani SW:

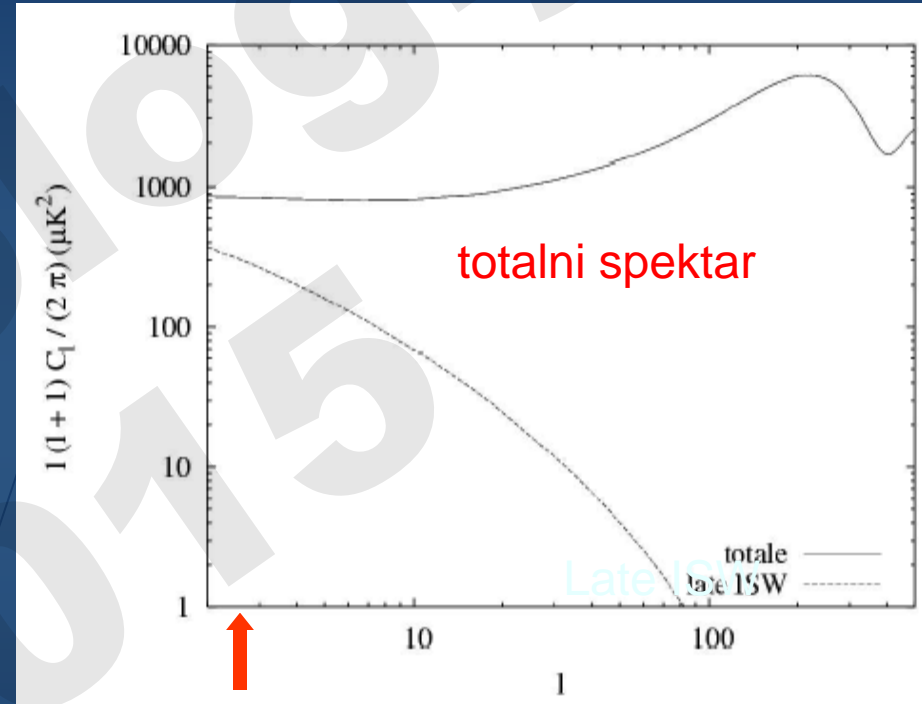
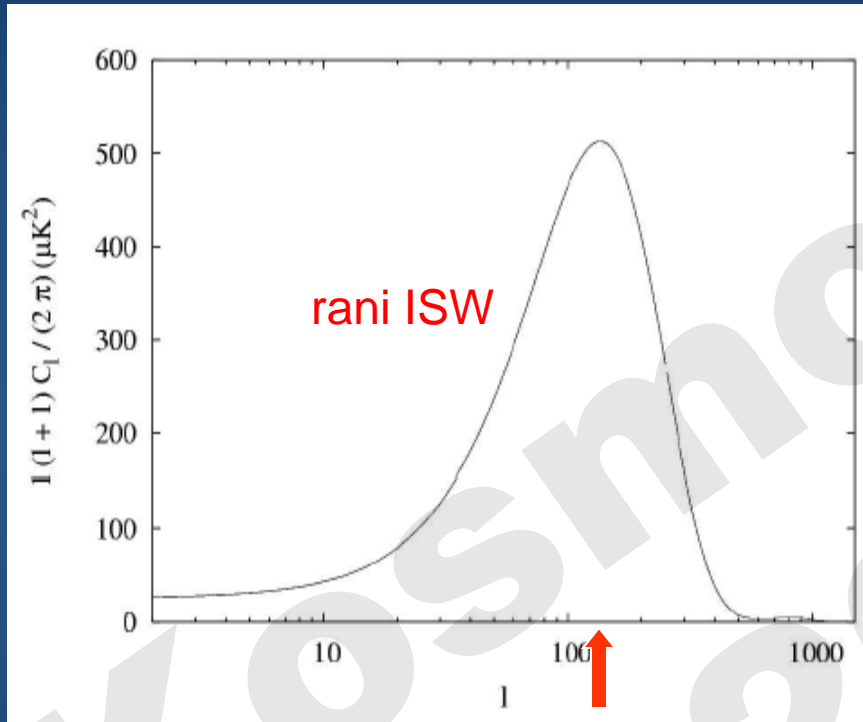
$$\Theta_{ISW} = 2 \int_{\gamma} \dot{\Phi}[r(t), t] dt$$

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G a^2 \rho \delta \rightarrow \Phi \propto \frac{\delta}{a}$$

■ Nema efekata u epohi dominacije materije

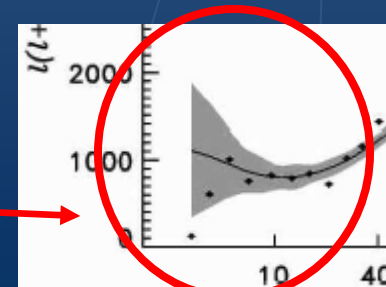
$$\left( \delta_m \propto a \Rightarrow \dot{\Phi} = 0 \right)$$

# Rani i kasni ISW



- Sveukupno je ISW oko 10% totalne anizotropije
- Problem "kosmičke varijanse":

$$\frac{\Delta C_l}{C_l} = \sqrt{\frac{2}{2l+1}}$$



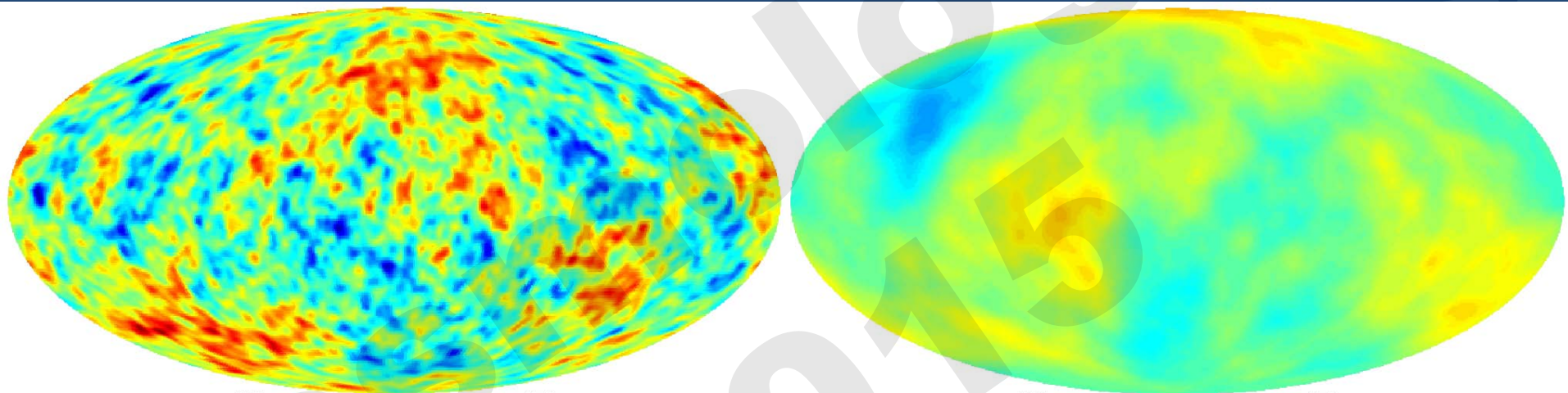


# “The Axis of Evil” (!)



- Gde su nestali  $l=2,3$  ?
- I šta (dođavola) rade u ravni ekliptike?
- Kada je koincidencija **samo** koincidencija?

# Dve nezavisne CMB mape

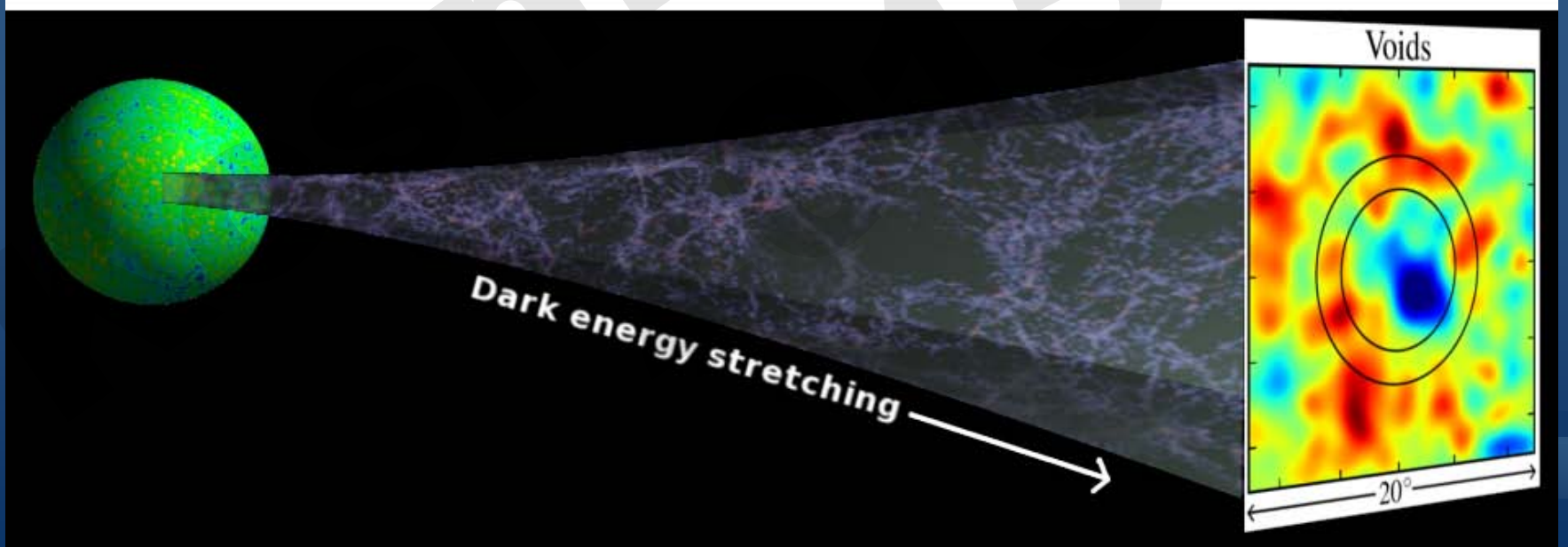
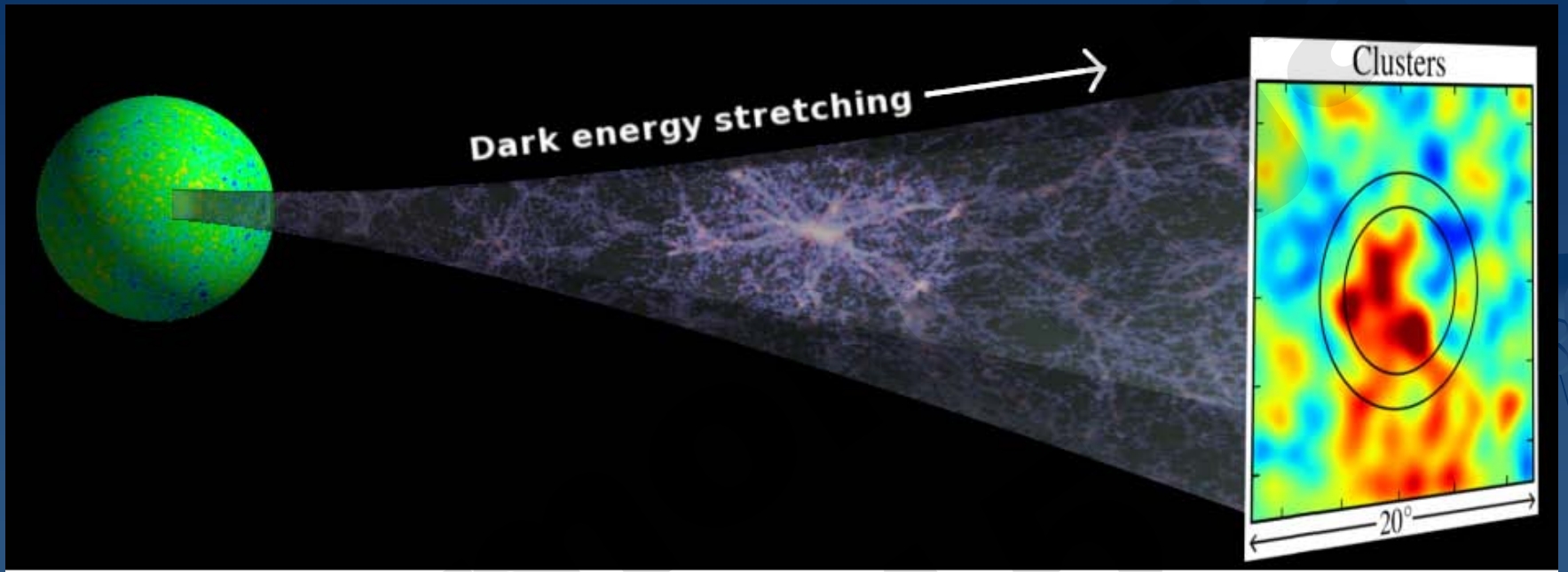


Rana mapa,  $z \sim 1000$

(SW + akustični talasi + rani ISW)

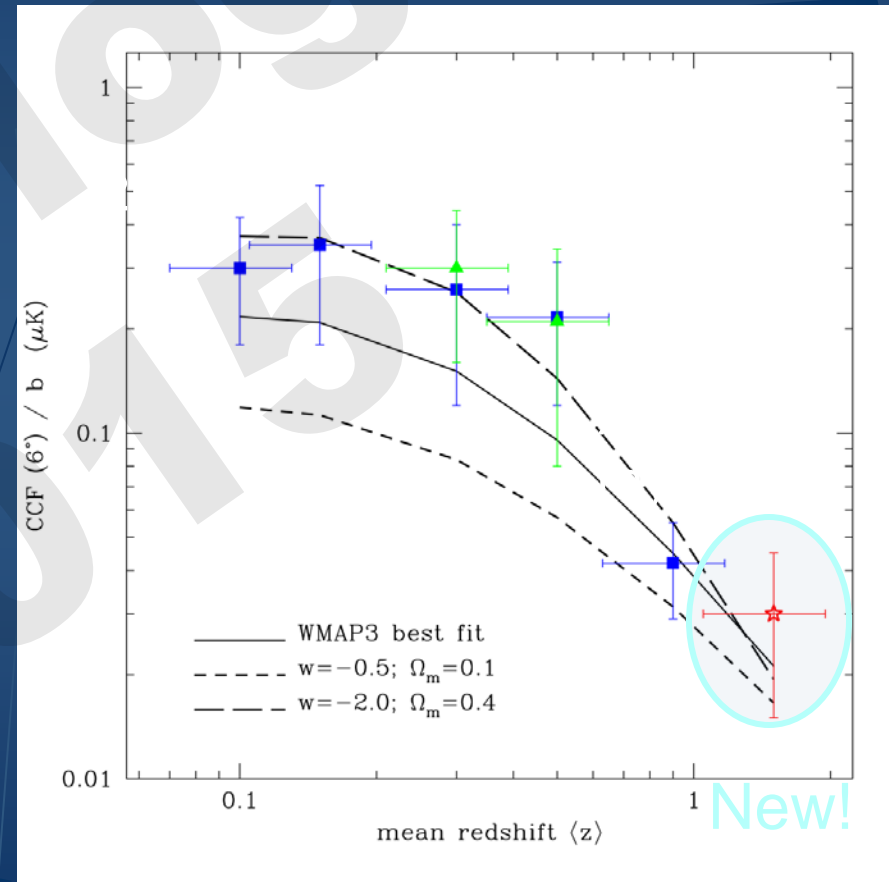
Kasna mapa,  $z < 4$

(Kasni ISW + SZ + slaba sočiva)



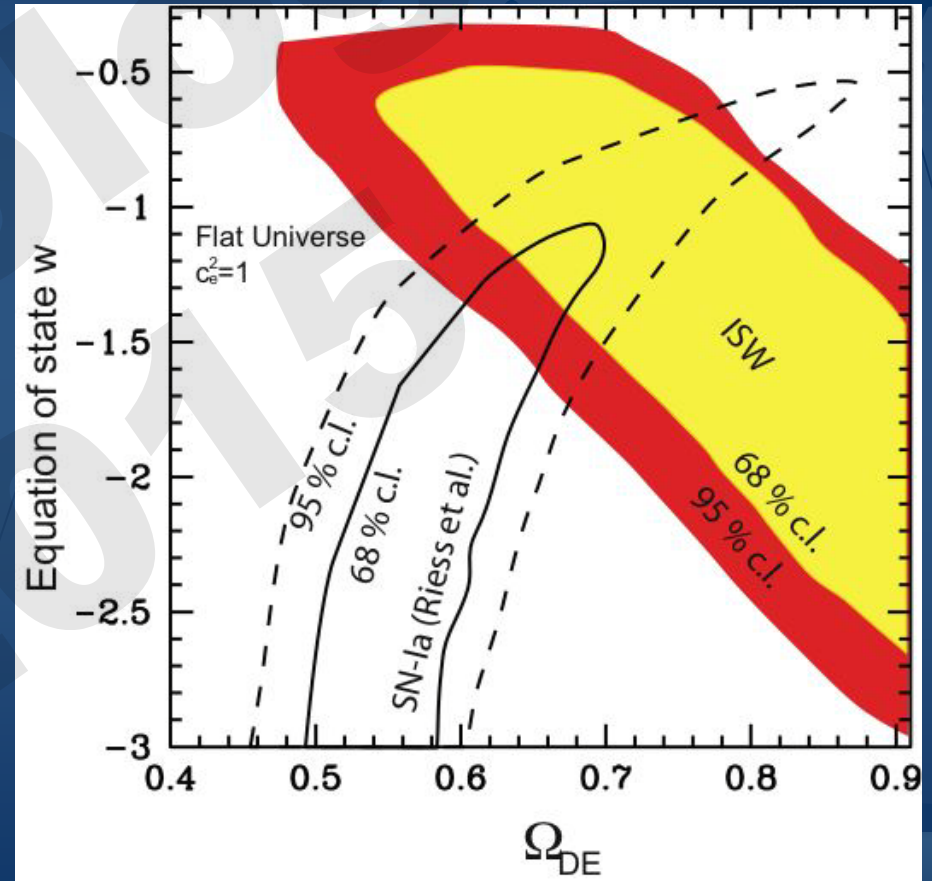
# Detekcije ISW...

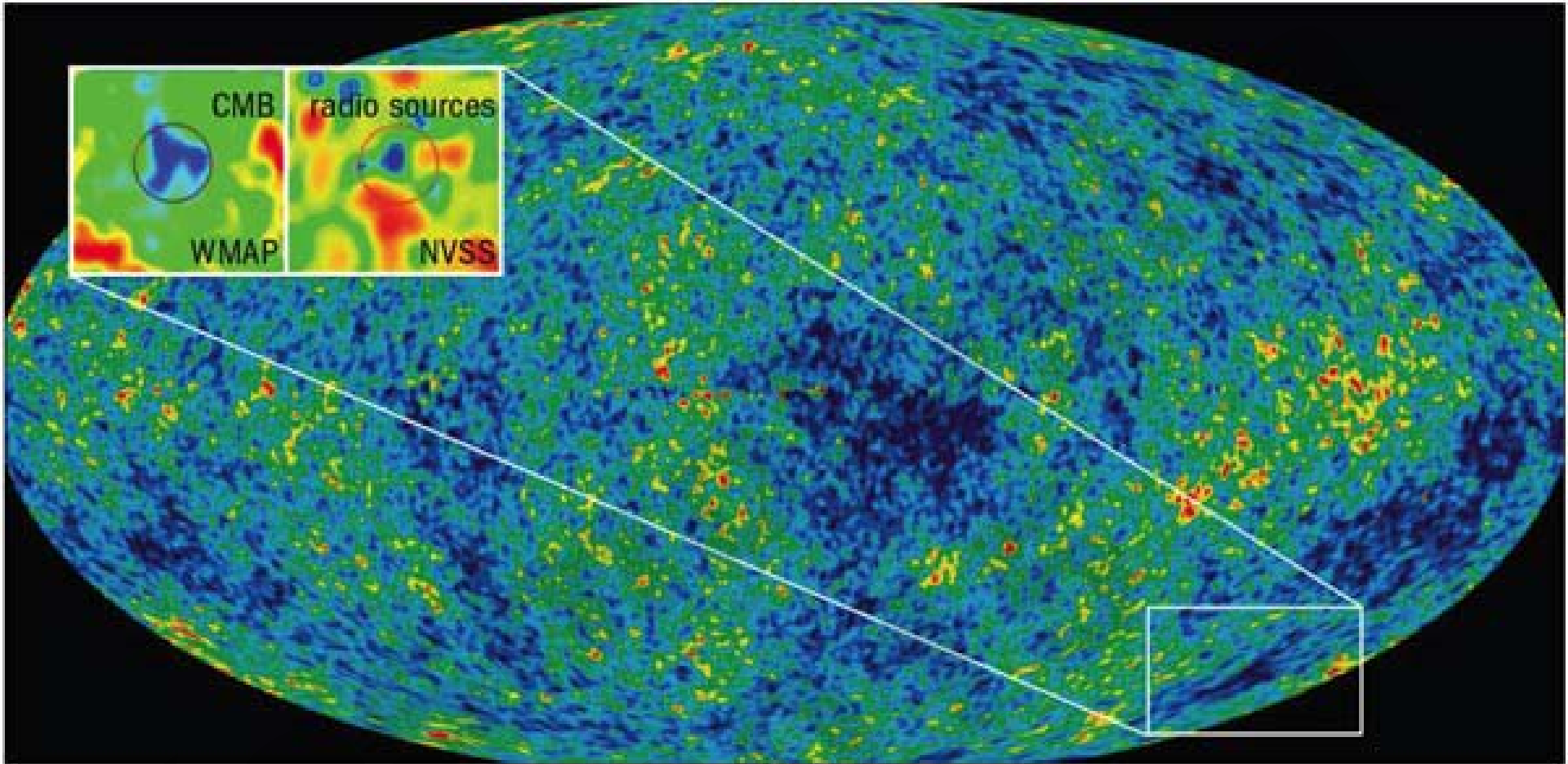
- Korelacije viđene na više frekvencija na velikom rasponu crvenog pomaka!
- Sve saglasne sa Novim standarnim kosmološkim modlom, mada nešto jače nego što je očekivano. (lakše za detekciju!)
- Postoji kovarijansa među različitim posmatranjima.
- Korelacije na  $6^\circ$  da bi se izbegla kontaminacija SZ i drugim efektima na veoma malim uglovima.



# Šta saznajemo o jednačini stanja za $\Lambda$ ?

- Za sada još uvek vrlo slaba ograničenja iz ISW!
- Rezultati saglasni sa novim standardnim kosmološkim modelom.
- Mogu se odbaciti modeli sa mnogo većim ili negativnim korelacijama.
- Ima prostora za mnogo dalje rada!





WMAP Hladna mrlja je ISV uzrokovan super-prazninom (supervoid); pošto Rudnick et al. (2007) pronalaze koincidentan pad u NVSS odbroju radiogalaksija u Hladnoj mrlji.

**Super-praznina:** 140 Mpc (!!!) na  $z \leq 1$

Tipična praznina: 3-5 Mpc

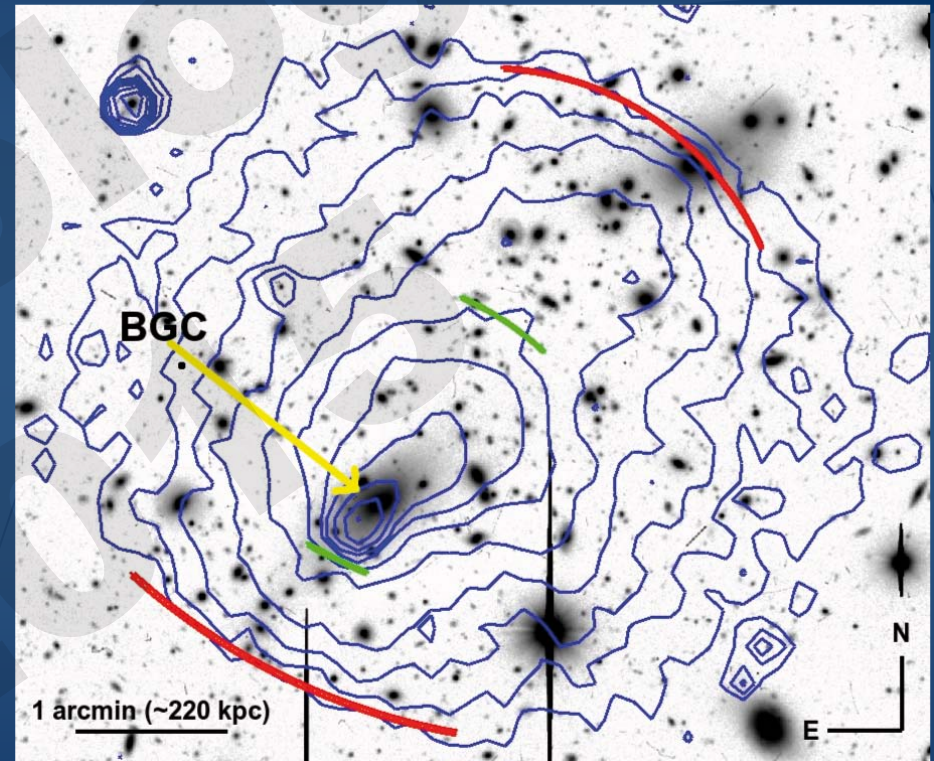
# Šta još utiče na mapu CMB-a?

- **Termalni Sunjajev-Zeljdovičev efekat**  
Inverzno Komptonovo rasejanje u vrelom gasu u jatima: signal zavisi od frekvencije.
- **Kinetički Sunjajev-Zeljdovičev efekat (kSZ)**  
Doplerov pomak od kretanja jata galaksija i drugih oblasti rejonizacije; signal (skoro) nezavisan od frekvencije.
- **Ostriker-Vishniac efekat (OV)**  
Isto kao kSZ, ali za rana linearna kretanja.
- **Gravitaciona sočiva - megasočiva**  
Deformacija mape CMB od globalne zakrivljenosti svemira.
- **Gravitaciona sočiva – slaba sočiva**  
Deformacija mape CMB od lokalnih zakrivljenosti sa velikim impakt parametrom.

# Sunjajev-Zeljdovičev efekt – vrlo ukratko

- Svi znamo (ahem, trebalo bi!) da su bogata jata galaksija ispunjena rendgenskim gasom na  $T \sim 10^6$  K...
- Poreklo gasa nedovoljno jasno (ima i rendgenskih linija Fe, isl.)!
- Virijalna teorema:

$$k_B T_e \approx \frac{GMm_H}{2R_{\text{eff}}}$$
$$\approx 7 \left( \frac{M}{3 \times 10^{14} M_{\odot}} \right) \left( \frac{R_{\text{eff}}}{1 \text{ Mpc}} \right)^{-1} \text{ keV}$$



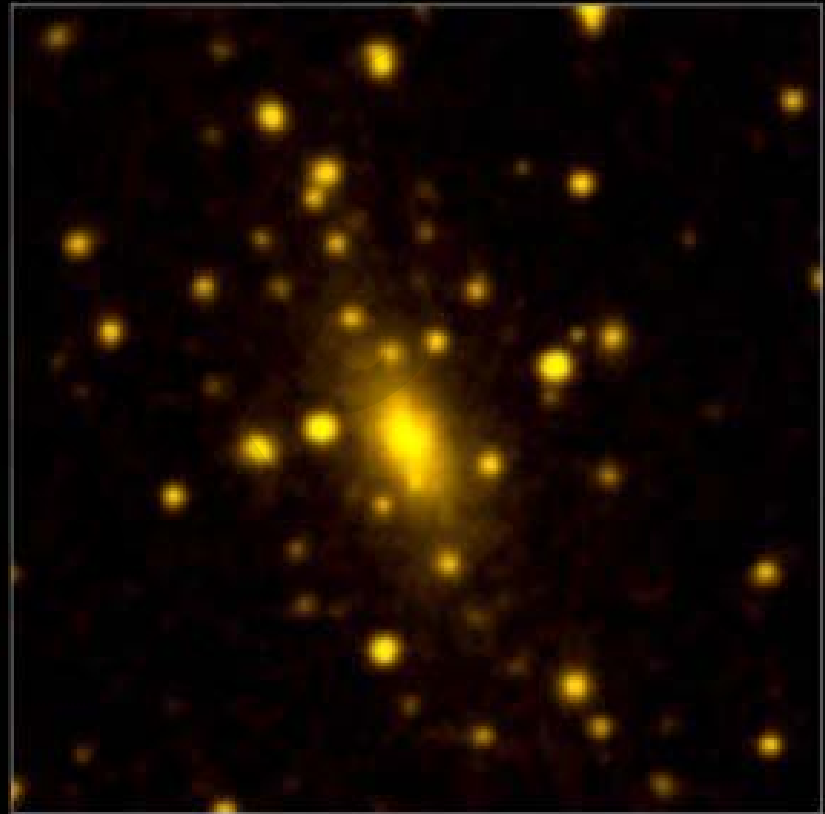
- Abell 2146 ( $z = 0,243$ )



# Abell 2029



CHANDRA X-RAY



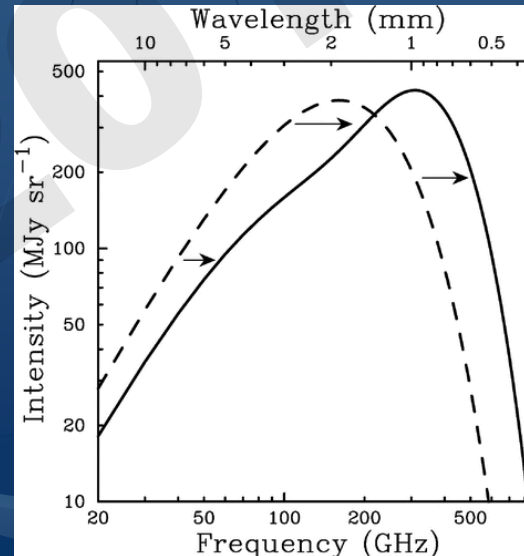
DSS OPTICAL

# Teorija...

- Sunjajev & Zeljdovič (1970)
- Inverzno Komptonovo rasejanje na slobodnim elektronima u jatima dovodi do distorzije spektra i temperaturne anizotropije:

$$\frac{\Delta T}{T} = -2 \frac{\sigma_T k}{m_e c^2} \int n_e T_e dl$$

- Ne zavisi od  $z$  !!!



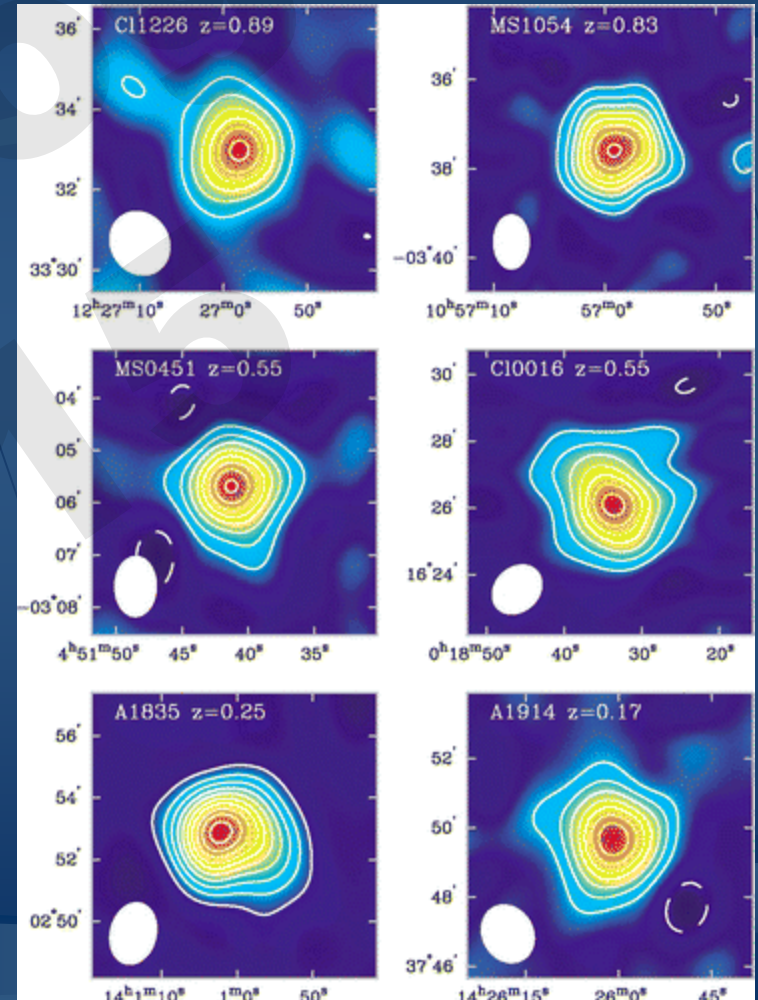
# ...i posmatranja!

- Mnogo lažnih uzbuna tokom 70-tih i 80-tih...
- Prvi pouzdani rezultati (Lake & Partridge 1980) za Abell576:

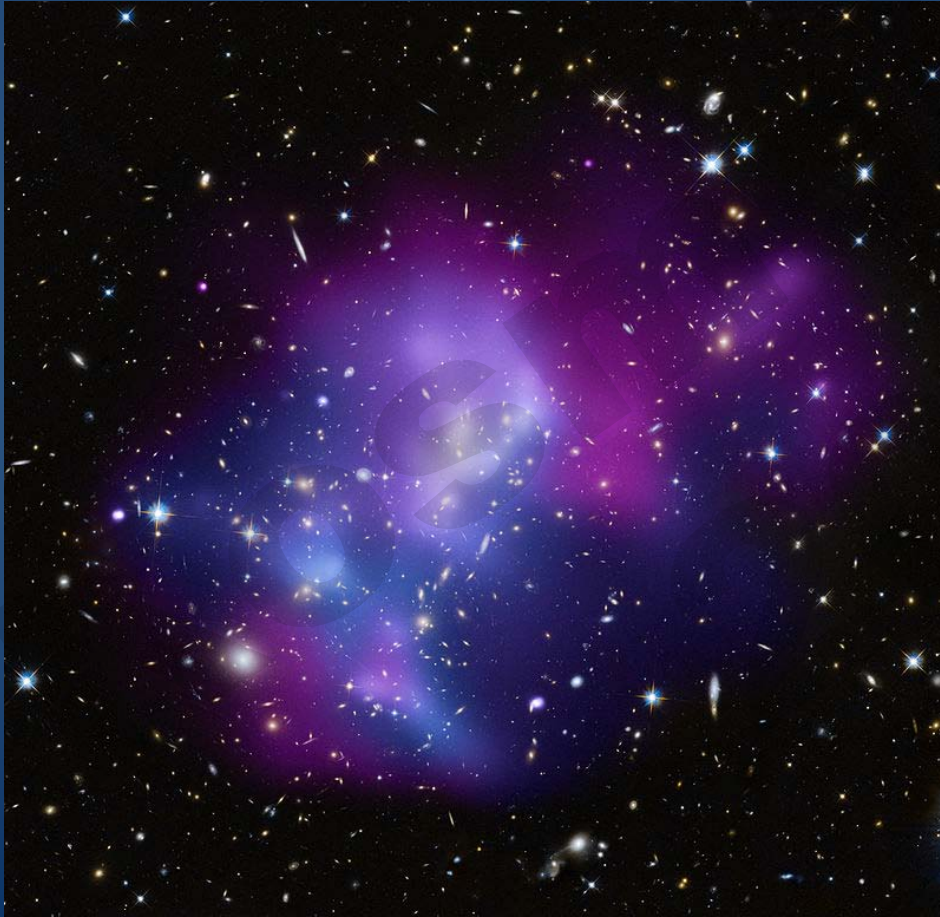
$$\Delta T = -1.27 \pm 0.28 \text{ mK}$$

- Moderni rezultati, npr.

$$\Delta T_{A2218} = -0.40 \pm 0.05 \text{ mK}$$



# Nedavna (2013) detekcija kinetičkog SZ efekta

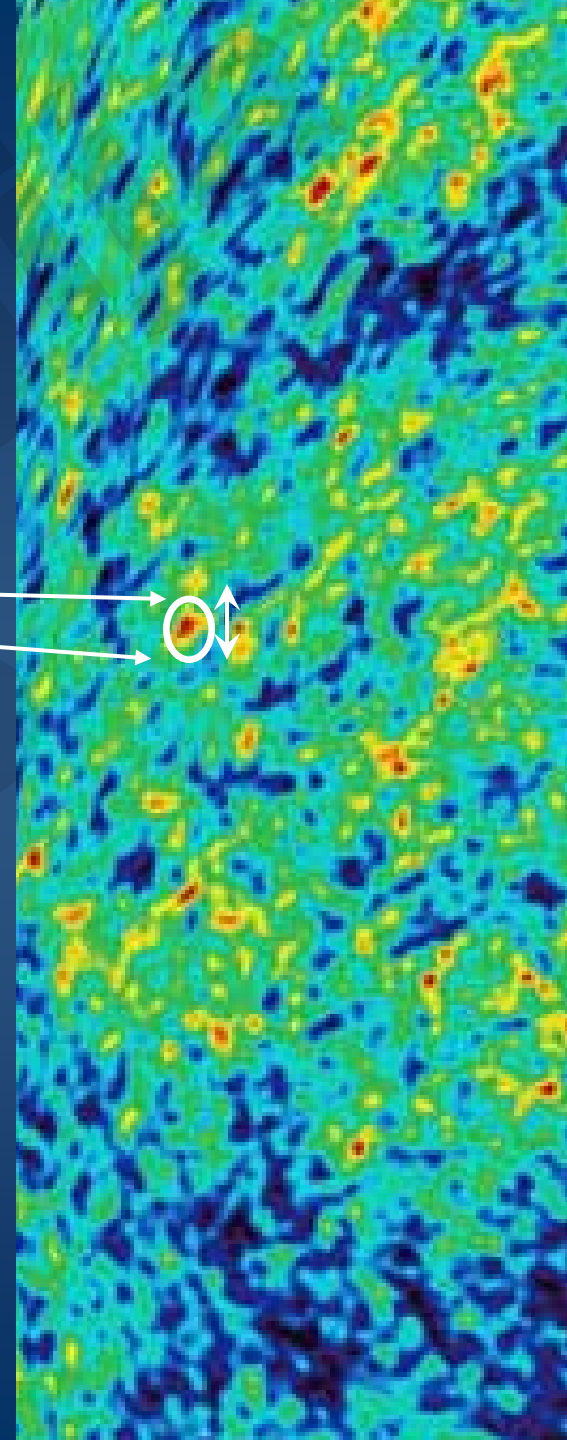
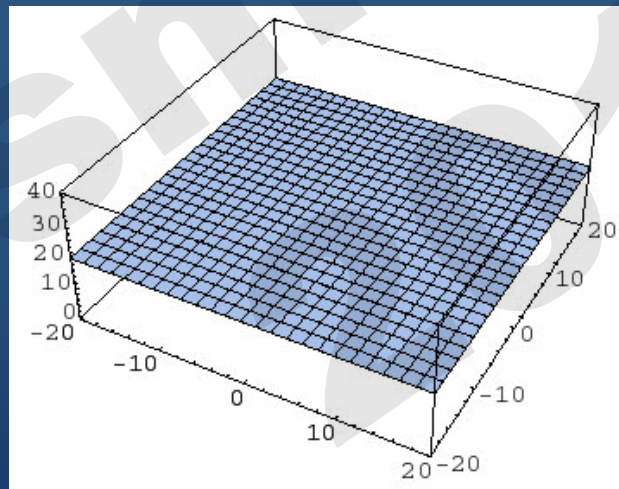
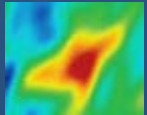
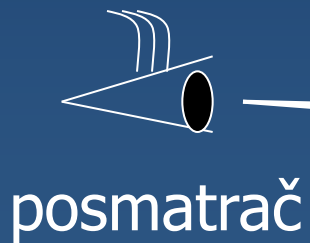


- MACS J0717.5+3745
- $M > 10^{15} M_{\odot}$  (!)
- 4 podklastera: A, B, C, D
- A, C, D – relativno miruju, B se kreće ka nama sa  $\Delta v \sim 3000$  km/s.
- Sayers et al. (2013) – prva detekcija kSZ na 140GHz i 268 GHz

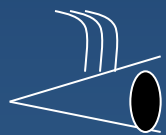
# Gravitaciona sočiva

Transfer zračenja  
zavisi od zakrivljenosti

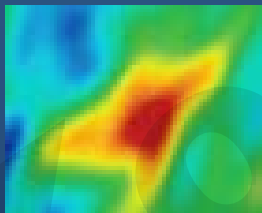
ravan svemir



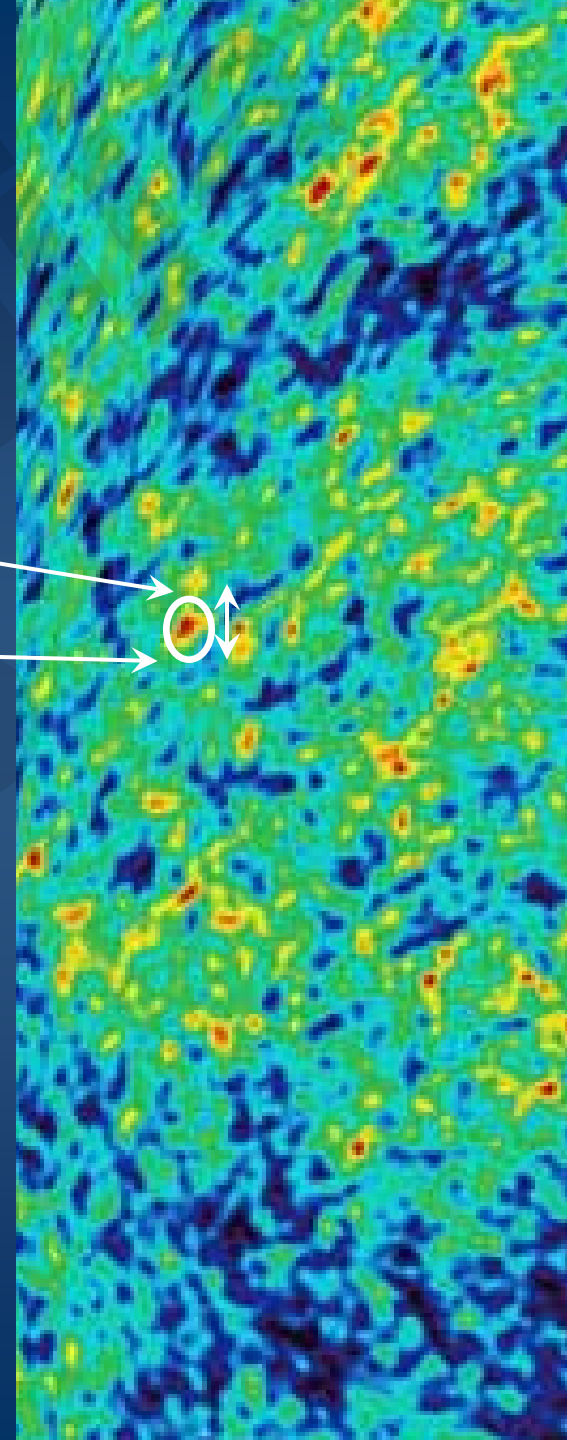
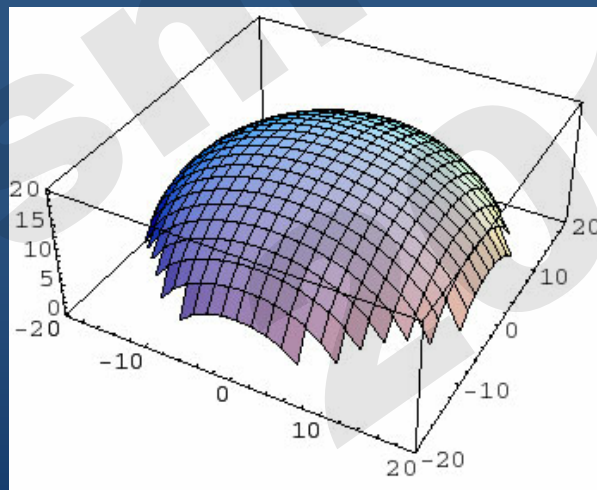
pozitivna zakrivljenost



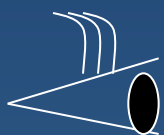
posmatrač



uvećanje!



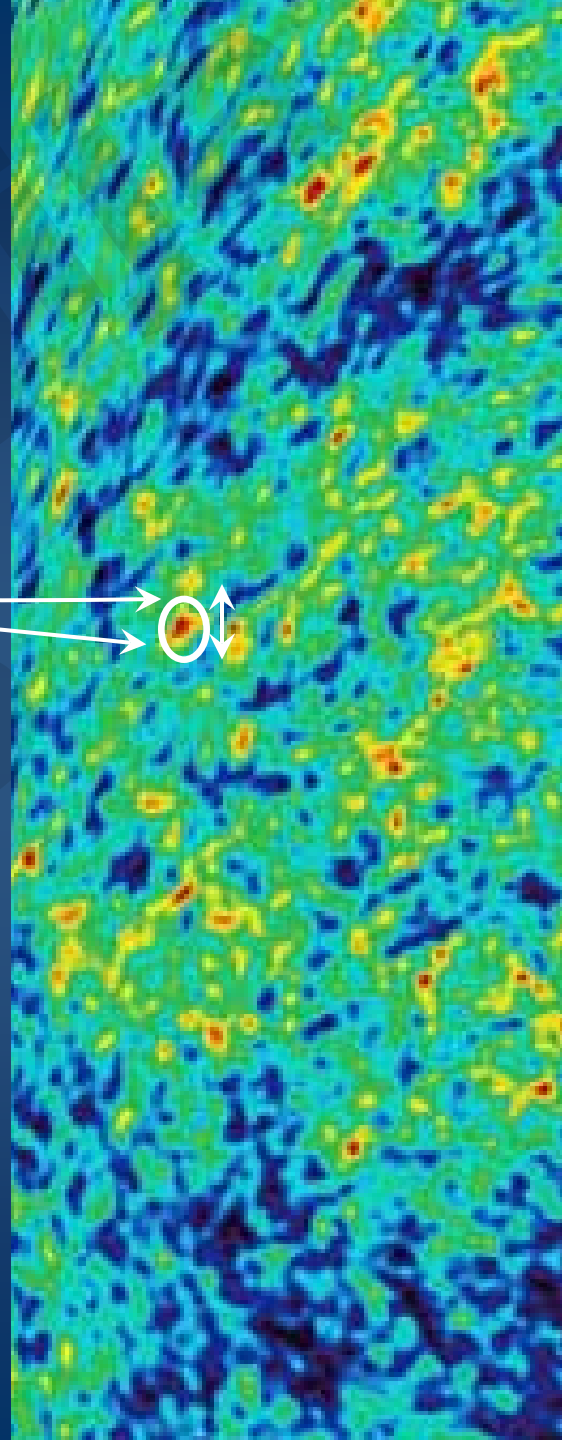
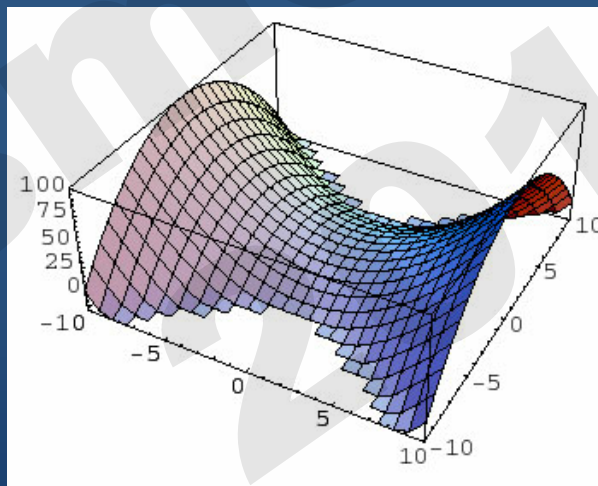
negativna zakrivljenost



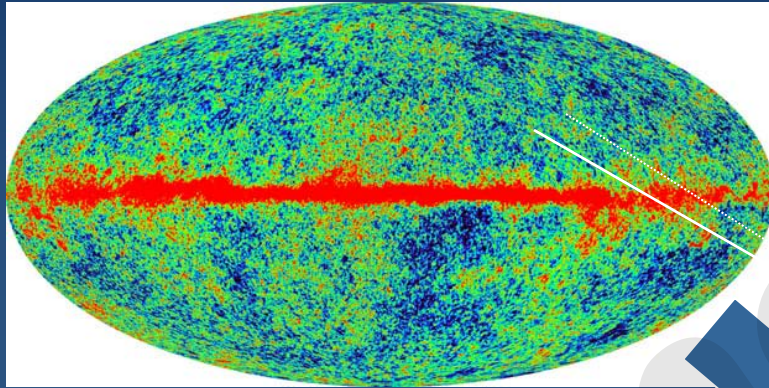
posmatrač



smanjenje!

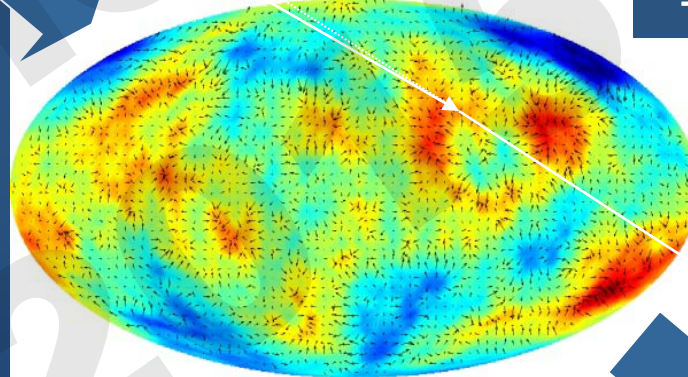


# Slaba gravitaciona sočiva i CMB



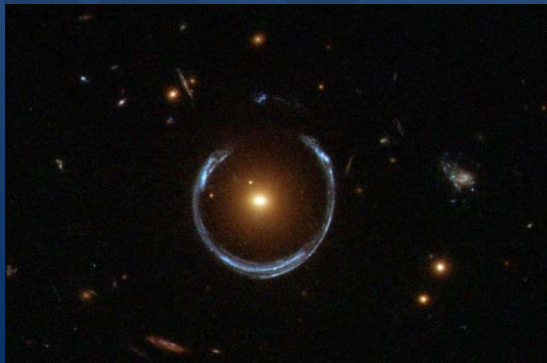
Površ poslednjeg rasejanja

Gunn (1967): "On the Propagation of Light in Inhomogeneous Cosmologies. I. Mean Effects". *Astrophysical Journal* **150**: 737

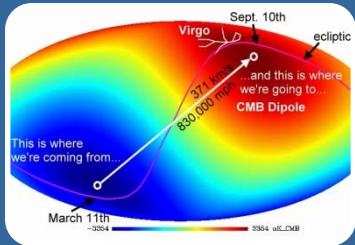


Nehomogeni svemir  
- fotoni deflektovani

posmatrač



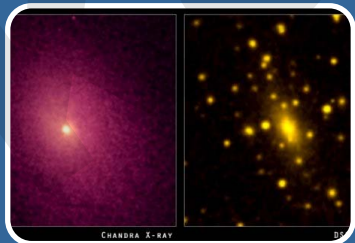




# Nastaviće



# se



# !