

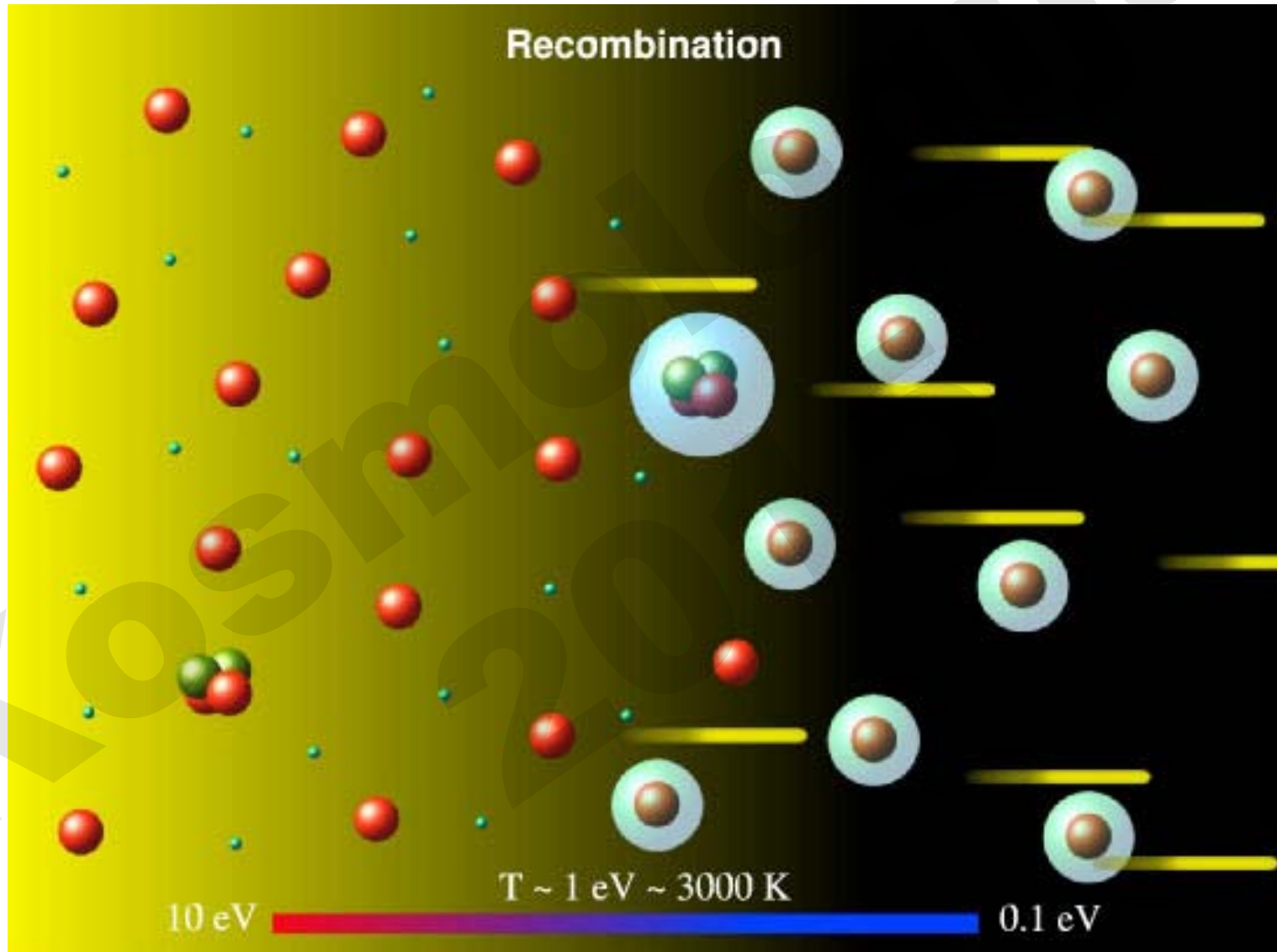
Rekombinacija i CMB

14.08.2015.

Rekombinacija

- Slično rezonovanje kao kod nukleosinteze:
prethodno slobodni konstituenti grade vezane sisteme kad temperatura dovoljno opadne!
- Do rekombinacije dolazi na $T < 1$ eV (zašto ne 13,6 eV?)
- Reakcija na koju primenjujemo kinetičku teoriju je, naravno: $e + p \leftrightarrow H + \gamma$
- Ukupno naelektrisanje je nula, dakle $n_e = n_p$

Recombination



Procedura ostaje ista

- Napišemo Saha ravnotežu za rekombinaciju.
- Utvrdimo gde dolazi do narušenja aproksimacije.
- Napišemo punu Boltzmanovu jednačinu i rešimo je numerički.
- Dobijemo rezultate za trajanje i efekte rekombinacije u izotropnoj aproksimaciji.
- Razmatramo anizotropije:
 - dipolnu
 - primordijalne (Saks-Vulfeov efekat, talasi u plazmi)
 - kasnije kosmološke (integrisani Saks-Vulfeov efekat, slaba gravitaciona sočiva, Sunjajev-Zeljdovičev efekat, itd.)

Saha ravnoteža...

...sada glasi:

$$\frac{n_e n_p}{n_H} = \frac{n_e^{(0)} n_p^{(0)}}{n_H^{(0)}}$$

- Definišimo frakciju slobodnih elektrona:

$$X_e \equiv \frac{n_e}{n_e + n_H} = \frac{n_p}{n_p + n_H}$$

- Podsetimo se definicije ravnotežnih gustina:

$$n_i^{(0)} \equiv g_i \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} e^{-\frac{E_i}{T}} = \begin{cases} g_i \left(\frac{m_i T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_i}{T}}, & m_i \ll T \\ g_i \frac{T^3}{\pi^2}, & m_i \gg T \end{cases}$$

- Iz ovoga dobijamo:

$$\frac{X_e^2}{1 - X_e} = \frac{1}{n_e + n_H} \left[\left(\frac{m_e T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_e + m_p - m_H}{T}} \right] \approx \frac{1}{n_B} \left[\left(\frac{m_e T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\varepsilon_0}{T}} \right]$$

- gde je $n_p + n_H \approx n_B$ (zanemarujemo He) i

$$\varepsilon_0 \equiv m_p + m_e - m_H = 13,6 \text{ eV}$$

- odnos bariona i fotona **pre razdvajanja**

$$n_B = \eta n_\gamma \approx 10^{-9} T^3$$

⇒ da za $T \sim \varepsilon_0$, desna strana gore biće reda $10^9 \left(\frac{m_e}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \approx 10^{15}$ (!)

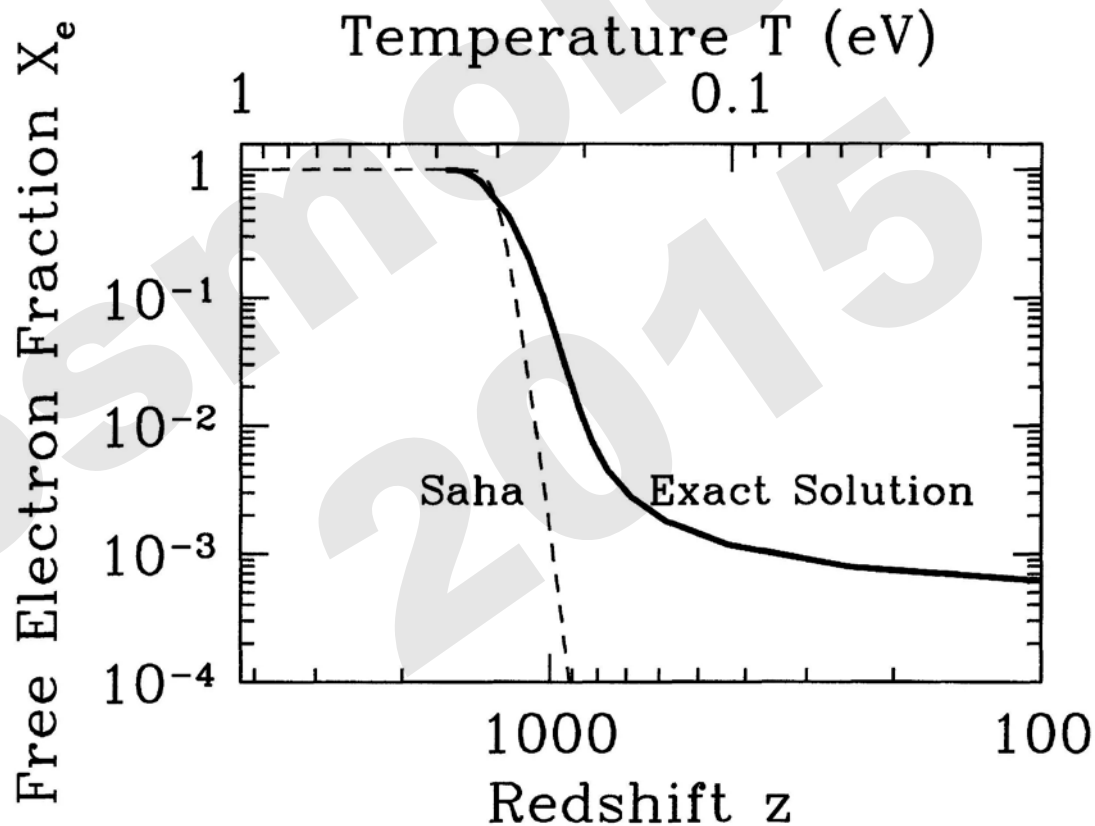
$$\frac{X_e^2}{1 - X_e} \approx 10^{15} \quad \text{iz čega sledi...???$$

Naravno:

$$X_e \approx 1 \quad (!)$$

- Sav vodonik je jonizovan!
- Rekombinacija se dešava tek kasnije, za $T \ll \varepsilon_0$.
- Obrnuto, rešavanje jednačine Saha za $X_e = 0,5$ daje temperaturu $T_{rek} \sim 4000$ K.
- Pošto je $T_{rek} = T_0 (1 + z_{rek}) \Rightarrow z_{rek} \square 1500$

Prednosti i mane aproksimacija...



Precizniji tretman:

- Boltzmanova jednačina za gustinu elektrona:

$$a^{-3} \frac{d(n_e a^3)}{dt} = n_e^{(0)} n_p^{(0)} \langle \sigma v \rangle \left[\frac{n_H}{n_H^{(0)}} - \frac{n_e^2}{n_e^{(0)} n_p^{(0)}} \right] =$$
$$= n_B \langle \sigma v \rangle \left[(1 - X_e) \left(\frac{m_e T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\epsilon_0}{T}} - X_e^2 n_B \right]$$

- Ovo važi zbog:

$$\frac{n_e^{(0)} n_p^{(0)}}{n_H^{(0)}} = \left(\frac{m_e T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\epsilon_0}{T}}$$

$$n_e = n_B X_e \quad ; \quad n_B a^3 = \text{const.} \quad (\text{„održanje barionskog broja“})$$

„Prava“ jednačina za slobodne elektrone

$$\frac{dX_e}{dt} = \left[(1 - X_e) \beta - X_e^2 n_B \alpha^{(2)} \right]$$

- gde smo definisali:

$$\beta \equiv \langle \sigma v \rangle \left(\frac{m_e T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\varepsilon_0}{T}} \quad (\text{“stopa jonizacije”})$$

$$\alpha^{(2)} \equiv \langle \sigma v \rangle \quad (\text{“stopa rekombinacije”})$$

- Uporediti ovo sa aproksimacijom Saha, koja bi u istim varijablama izgledala ovako:

$$\frac{X_e^2}{1 - X_e} = \frac{1}{n_B} \frac{\beta}{\alpha^{(2)}}$$

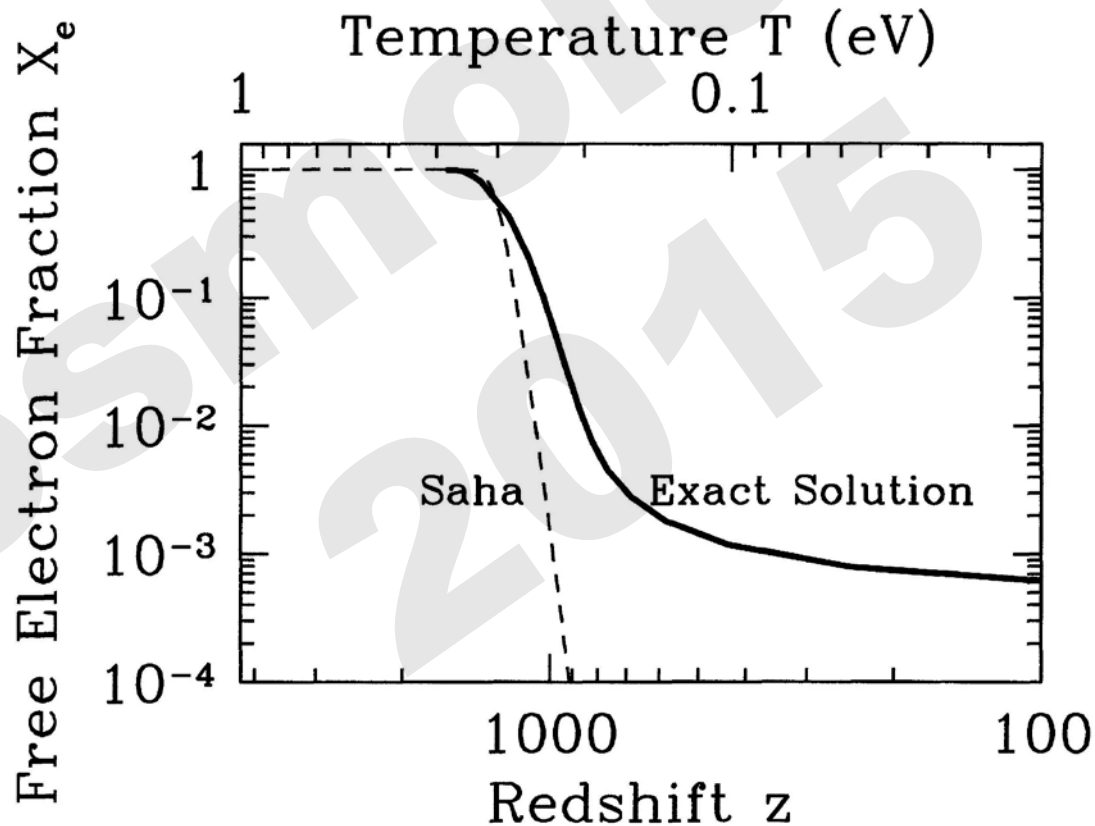
Kao i u slučaju nukleosinteze...

- ...nevolja je što α i β zavise od temperature.
- Potreban je input iz mikrofizike; npr. kvantna mehanika daje

$$\alpha^{(2)} = 9,78 \frac{\alpha^2}{m_e^2} \left(\frac{\varepsilon_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{\varepsilon_0}{T} \right)$$

- Sa ovime se numerički integriše, da bi se dobila precizna dinamika.
- Danas postoje brzi kodovi za rekombinaciju, najpoznatiji je *CosmoRec* (J. Chluba, U. of Toronto), sa tačnošću na nivou 0,1% !

Repetitio est mater studiorum...





Vreme



za



pauzu!





Uzgred: a šta je sa helijumom?

- Rekombinacija He se odigrava ranije zbog višeg **jonizacionog potencijala** u odnosu na H.
- Dve faze (Switzer & Hirata 2008):
 - $\text{He}^{++} + e \rightarrow \text{He}^+ + \gamma$ (blizu Saha ravnoteže, $z \sim 6000$)
 - $\text{He}^+ + e \rightarrow \text{He} + \gamma$ (sporije od Saha ravn., $z \sim 2000$)
- Rekombinacija He ne igra veliku ulogu u nastanku CMB anizotropija zato što je svemir **još uvek neprozračan kada se ona završi.**

Rekombinacija vs. razdvajanje

- Razlikovati **rekombinaciju** od **razdvajanja** (engl. *decoupling*) fotona i elektrona!
- Tomsonovo rasejanje ima presek:

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 = 0,665 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$n_e \sigma_T = X_e n_B \sigma_T = \text{const.} \times X_e \Omega_B h^2 a^{-3}$$

- Razdvajanje = stopa Tomsonovog rasejanja < stopa širenja svemira.

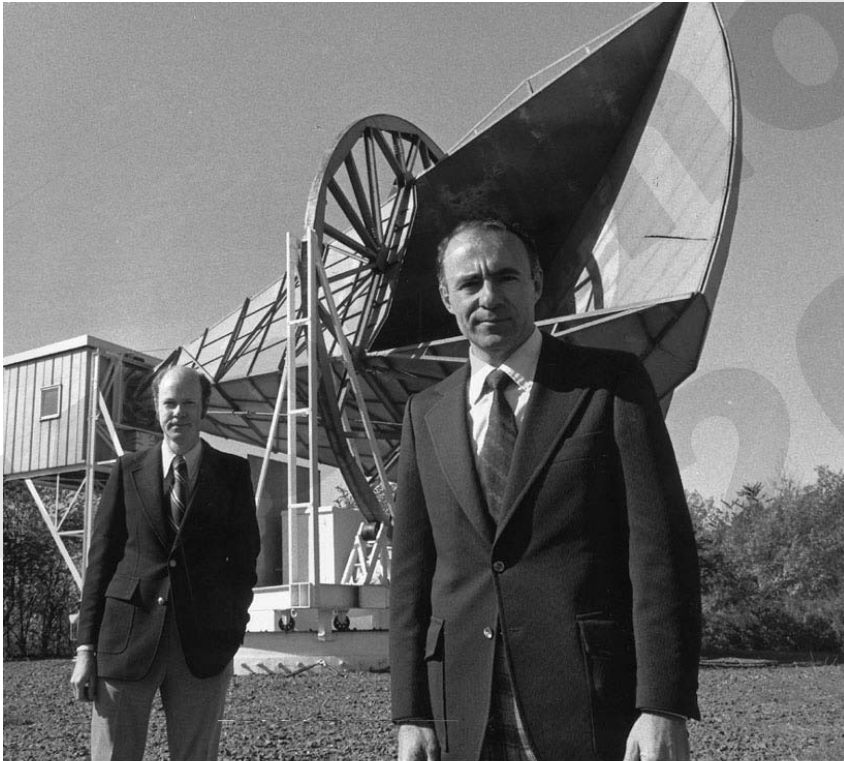
- Ovo se dešava u epohi t kad važi:

$$\frac{n_e \sigma_T}{H(t)} = 0,0692 a^{-3} X_e \Omega_B h \frac{H_0}{H(t)}$$

- Numerički, razdvajanje nastaje za $X_e < 10^{-2}$, odnosno **tokom rekombinacije!**
- Međutim, do razdvajanja bi došlo čak i da nije bilo rekombinacije! (doduše mnogo kasnije, na $z \sim 20$)
- Mnogo kasnije se svemir rejonizovao! Kada? – **problem rejonizacije** (npr. $z \sim 5$?)

Kao posledica rekombinacije, nastao je rezervoar primordijalnih fotona - **kosmičko (mikrotalasno) pozadinsko zračenje!**

Istorija, istorija...



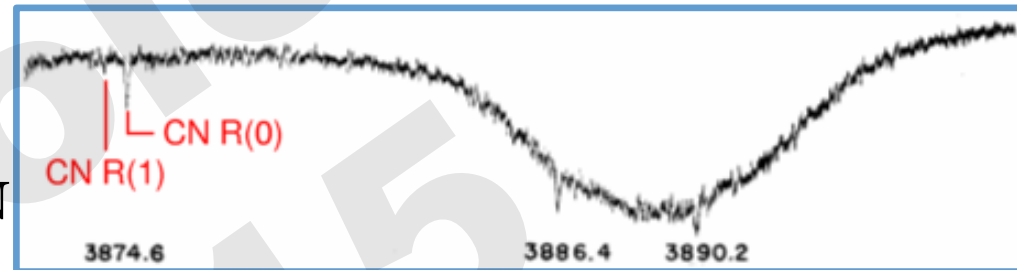
© 2004 Thomson - Brooks/Cole

- 1948: Gamov, Alfer, Herman predviđaju ostatak „primordijalne vatrene lopte“
- 1956: Gamovljevo poslednje predviđanje: $T = 6 \text{ K}$
- 1957: Tigran Šmaonov prijavljuje „pozadinu“ na $3,2 \text{ cm}$ sa $T = 4 \pm 3 \text{ K}$.
- 1960: Dike na Prinstonu procenjuje $T < 40 \text{ K}$ i započinje program potrage
- 1964: Doroškevič i Novikov razvijaju aparat za analizu CMB
- **1965: Penzias & Wilson; Dicke et al.**
- 1966: Sachs i Wolfe sugerišu mehanizam generisanja anizotropija na maloj skali.

„Tajna istorija“

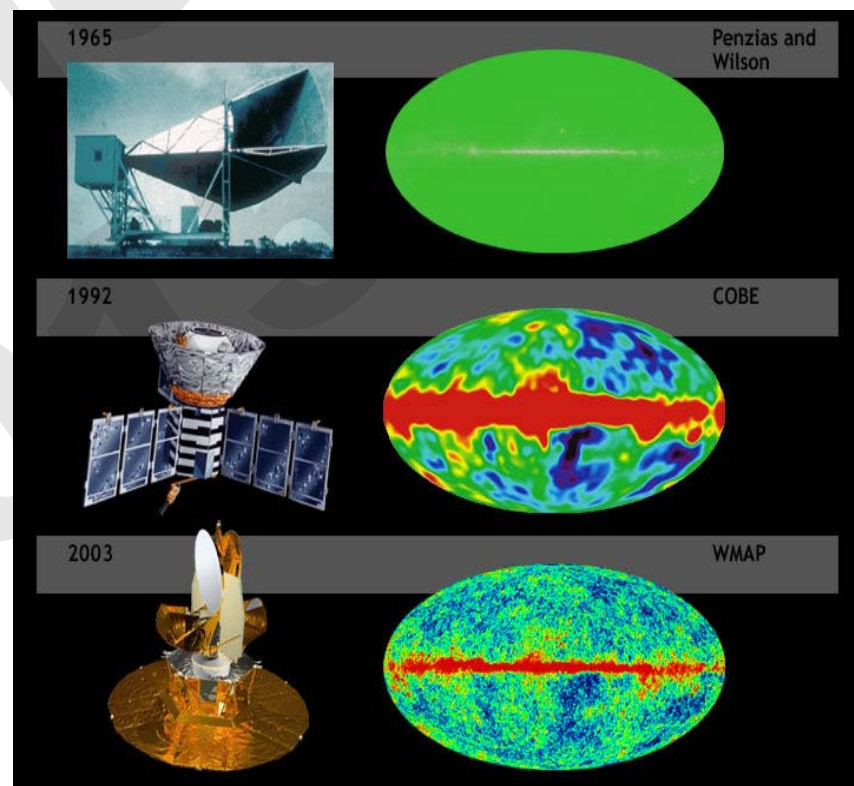


- 1940-41: Dominion Astrophysical Observatory
- Andrew McKellar posmatra ekscitaciju međuzvezdanog CN
- Rotaciona temperatura prema ζ Oph: 2,3 K (!)
- Malo čitani bilten DAO...
- Herzbergova monografija (1950): „temperature of space... which has of course a very restricted meaning“
- Ironija: na McKellarov rezultat prvi skrenuo pažnju... Fred Hojl! 😊



Tri osnovna elementa standardne interpretacije CMB:

- **spektralni profil**
- **temperatura**
- **izotropija**



talasna dužina [mm]

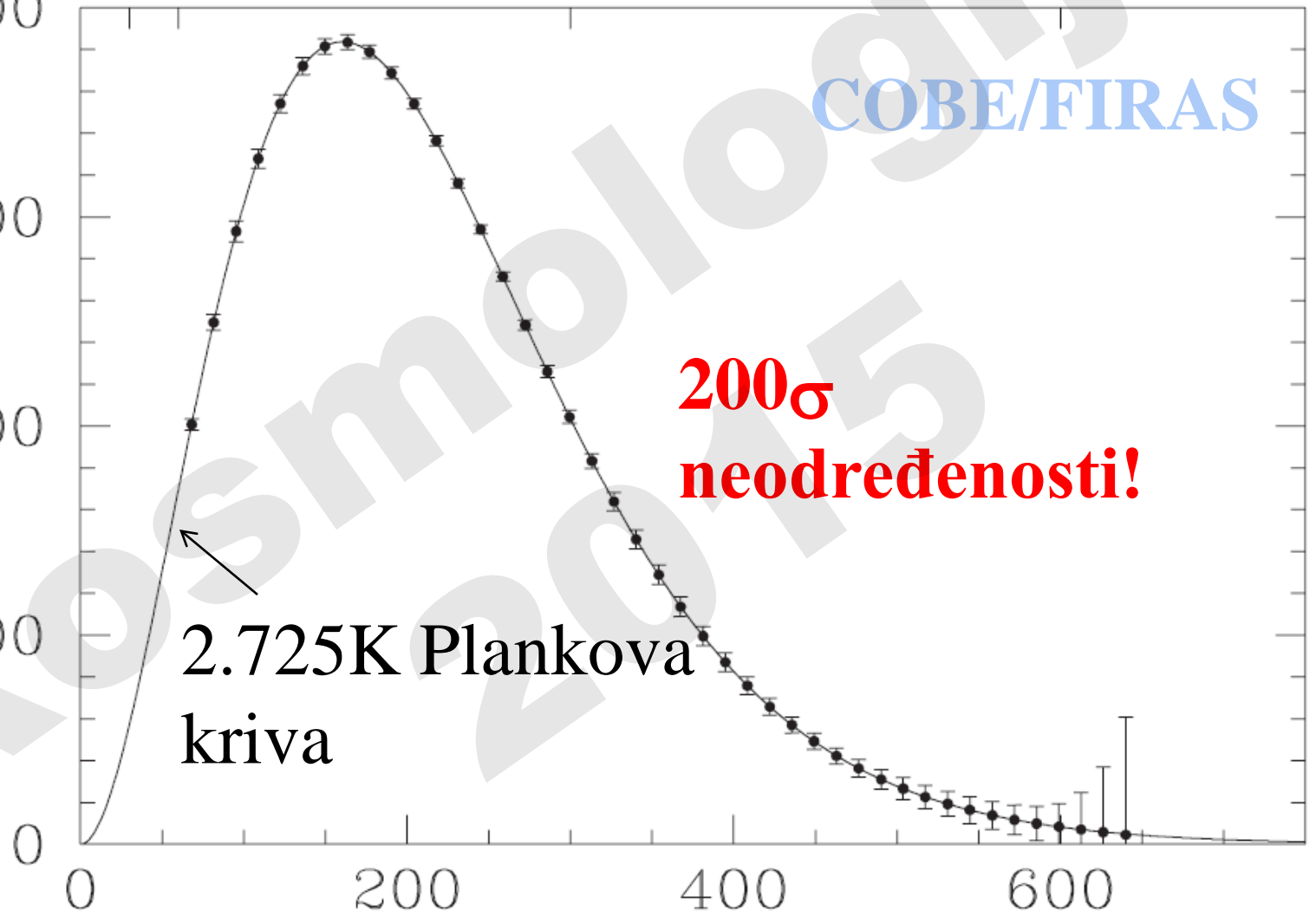
10 5 1 0.5

intenzitet [MJy/str]

COBE/FIRAS

**200 σ
neodređenosti!**

2.725K Plankova
kriva

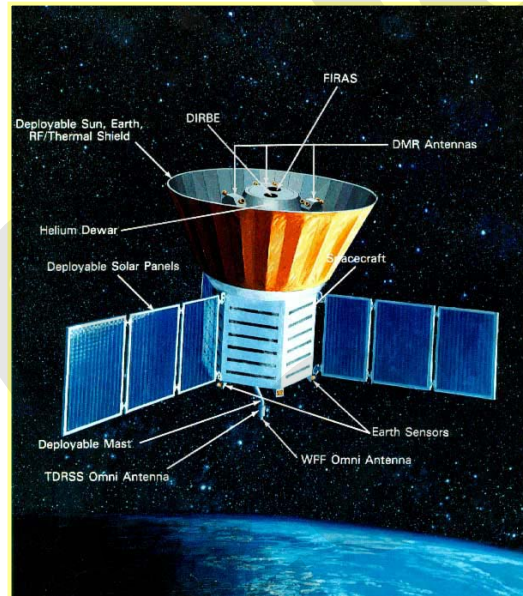


frekvencija [GHz]

2006: Nobel ova nagrada za *COBE*



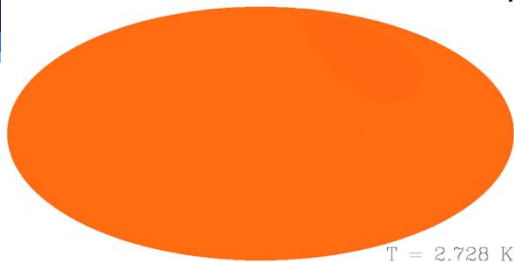
**Džon Mater
(1945)**



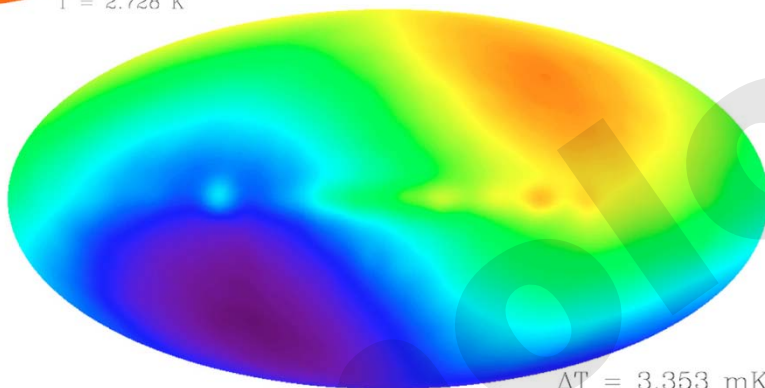
**Džordž Smut
(1945)**

- Za “otkriće spektra crnog tela i anizotropija kosmičke mikrotalasne pozadine”

(almost) uniform 2.726K blackbody



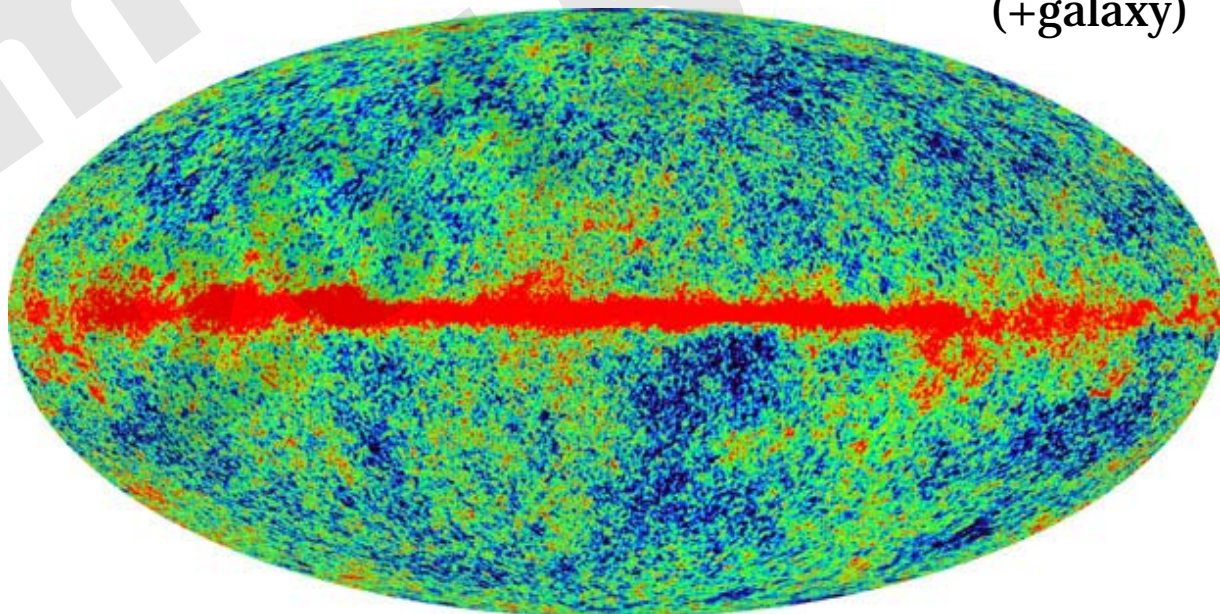
$T = 2.726 \text{ K}$



Dipole (local motion)

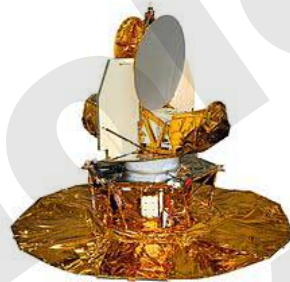
$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$

$O(10^{-5})$ perturbations
(+galaxy)

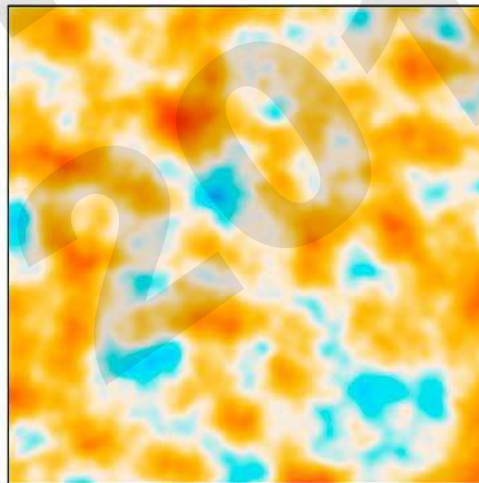


**Posmatranja
CMB neba**

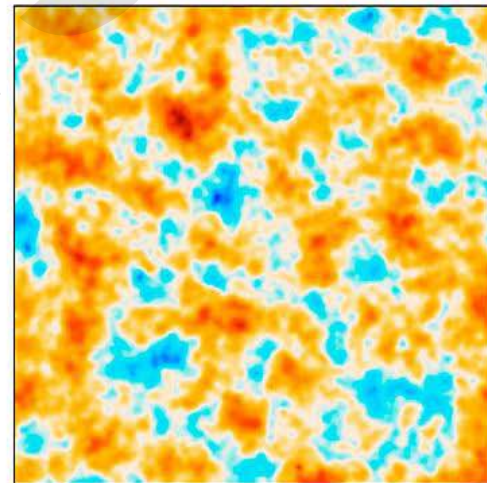
Po jedan satelit na deceniju...



COBE

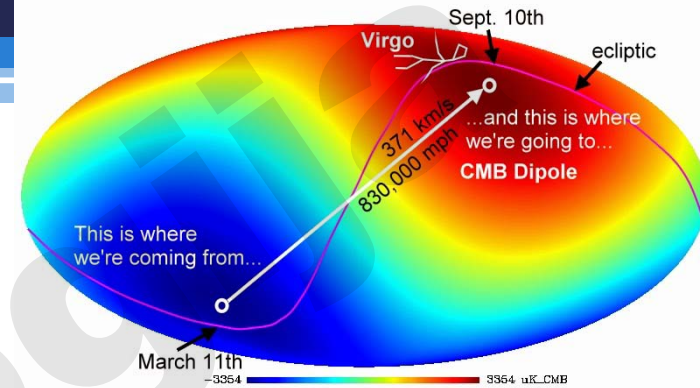


WMAP



Planck

Dipolna anizotropija



- „Trčimo po kiši“ fotona...
- Broj fotona je Lorenc-invarijantan!
- Temperatura mora biti funkcija ugla između pravca fotona i brzine Zemlje:

$$T' = \frac{T}{\gamma(1 + \beta \cos \vartheta)}$$

- gde su standardne relativističke oznake

$$\beta \equiv \frac{v}{c}$$

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Heliocentrizam potvrđen!

- Najveća temperatura u pravcu kretanja, tj. za $\cos \theta = -1$.
- Prva detekcija dipola 1969, a definitivno otkriće Corey & Wilkinson 1976 (debata oko prioriteta sa G. Smootom).
- Eksperiment FIRAS na COBE-u daje:

$$\Delta T = 3.372 \pm 0.014 \text{ mK}$$

$$l = 264.14 \pm 0.30; \quad b = 48.26 \pm 0.30$$

- Ovo odgovara:

$$v_{LG} = 627 \pm 22 \text{ km s}^{-1}$$

Nastaviće

se

!