

# Standardni Model Kosmologije

Dejan Stojkovic

*State University of New York at Buffalo*



GR100, SANU  
Beograd, 23 Jun 2015

# Sadržaj



- **Big Bang: Osnovne Cinjenice**
- **Standardni Model Kosmologije**
- **Problemi:**
  - **Tamna Materija (nedostajuca masa)**
  - **Tamna Energija (ubrzanje svemira)**
- **Predlozena Resenja:**
  - **Kosmoloska konstanta**
  - **Fazni prelaz u Univerzumu**

**Sta je sve ovo oko nas?**

**Kako je nastalo?**

**Kako i kada ce nestati?**



# Prvi kosmoloski model



# Malo sofisticiraniji kosmoski model



## COSMOLOGY MARCHES ON



Znacajan progres je napravljen u poslednjih nekoliko hiljada godina

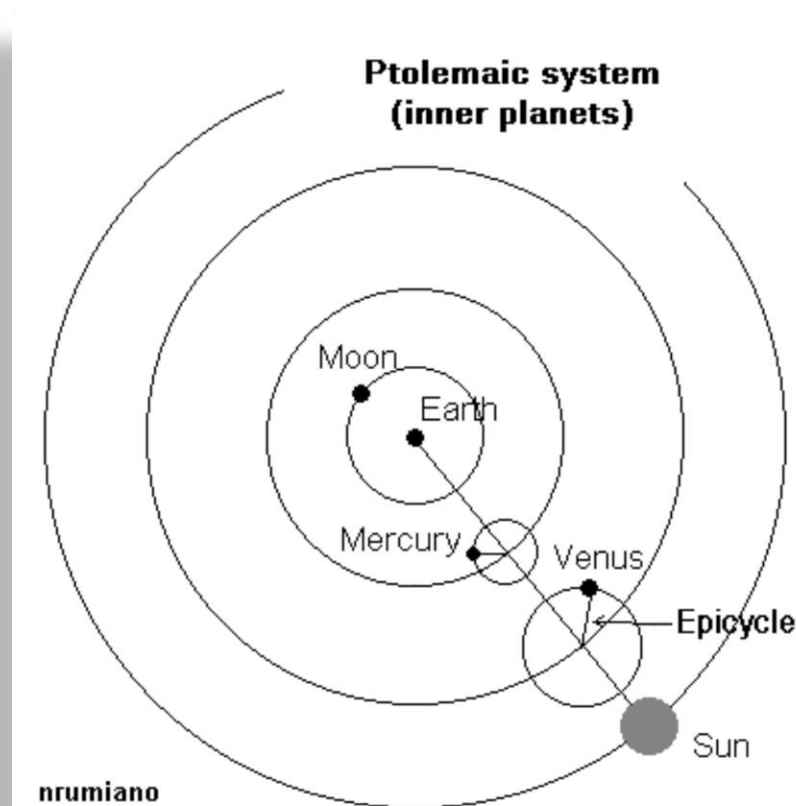
# Moderna Kosmologija



# Big Bang



# Pre Kopernika: Zemlja je u centru Svemira

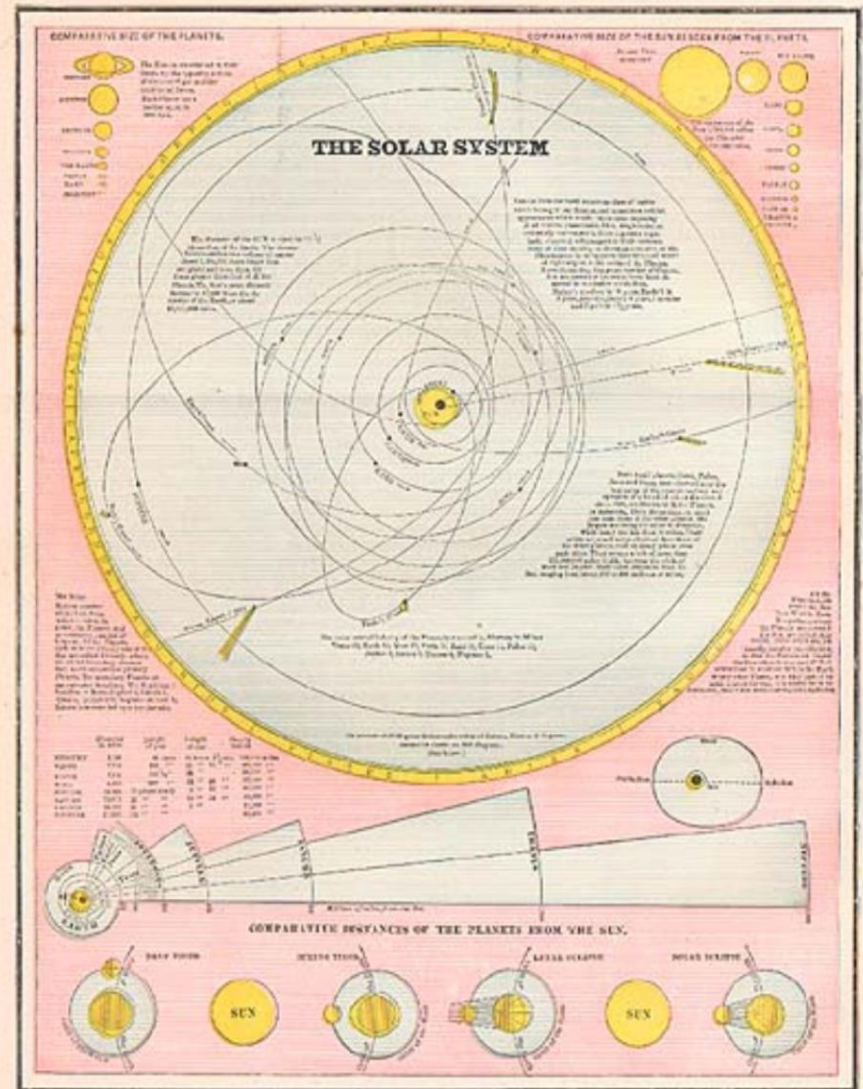


# Kopernikov Princip

- Ne zauzimamo specijalno mesto u Svemiru

- Nismo u centru Suncevog sistema, Galaksije, Svemira

...



# Olber-ov Paradoks

**Zasto je nebo nocu tamno?**

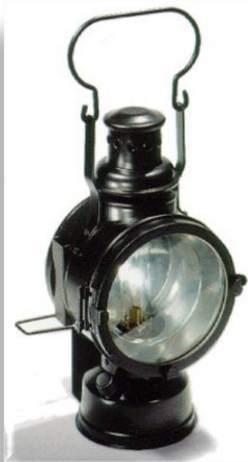
- Ako je Svemir beskonacan, u svakom pravcu na nebu mora da postoji bar jedna zvezda, bez tamnih praznina izmedju

**1. Svemir je konacan**

**2. Brzina svetlosti je konacna  
(postoji horizont)**

# Brzina Svetlosti

**Galileo: “Svetlost je  
brza od zvuka”**



**1620: Dva posmatraca  
na dva susedna brda:**

- Svetlosni signal stize  
pre zvucnog signala



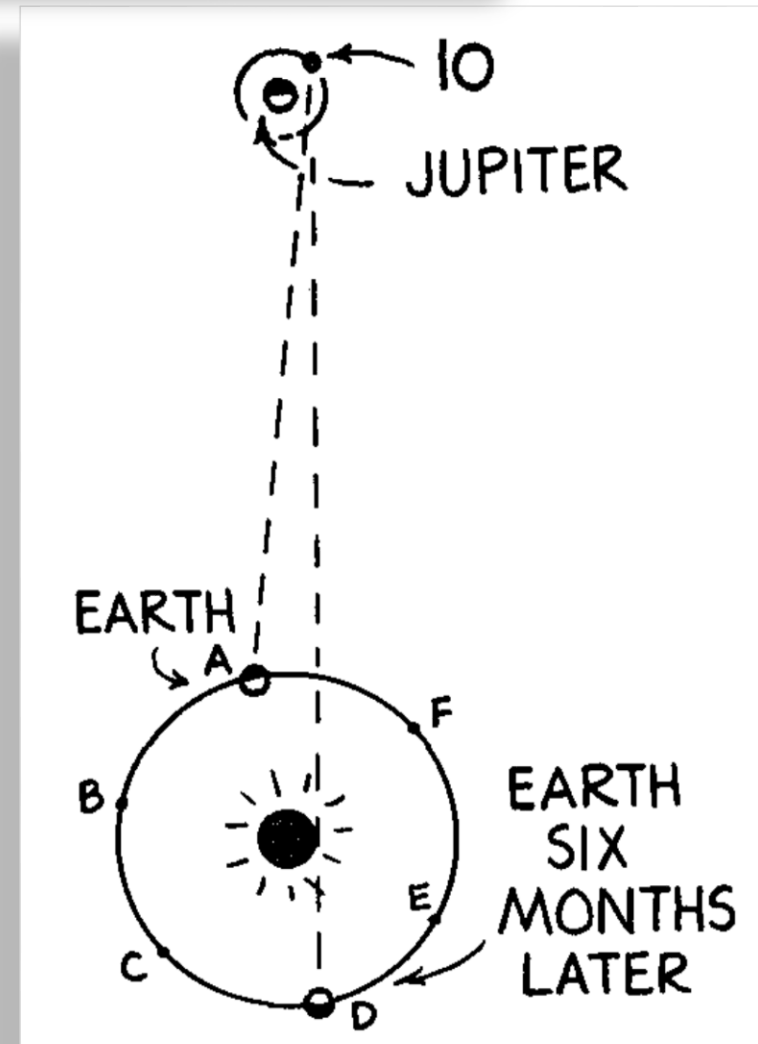
# Brzina svetlosti je konacna

**Olaf Roemer: 1670**

Koristi Jupiterov mesec IO kao sat

Meri brzinu svetlosti

**$C = 300\,000 \text{ km/s}$**



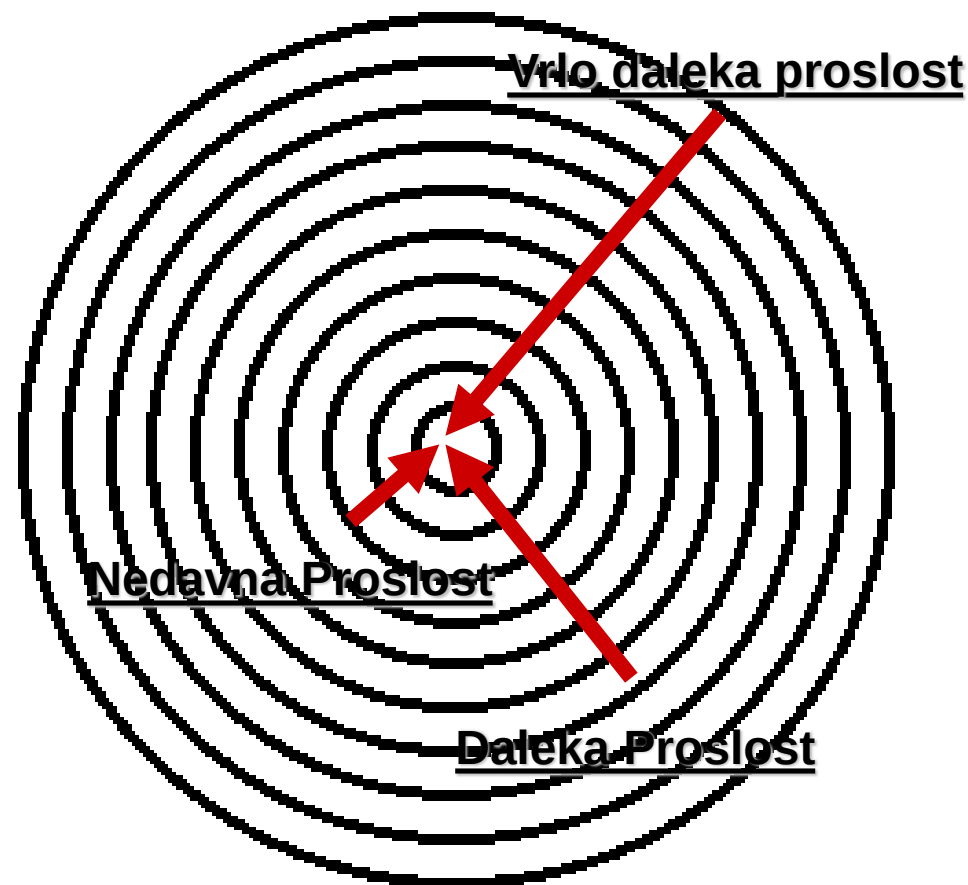


# Kosmicka geologija

## ***Svetlost putuje do nas:***

- od Sunca: 8.4 min
- od najblize zvezde: 4 god
- od centra nase galaksije: 25 000 god
- od Andromedine galaksije: 2.9 miliona godina

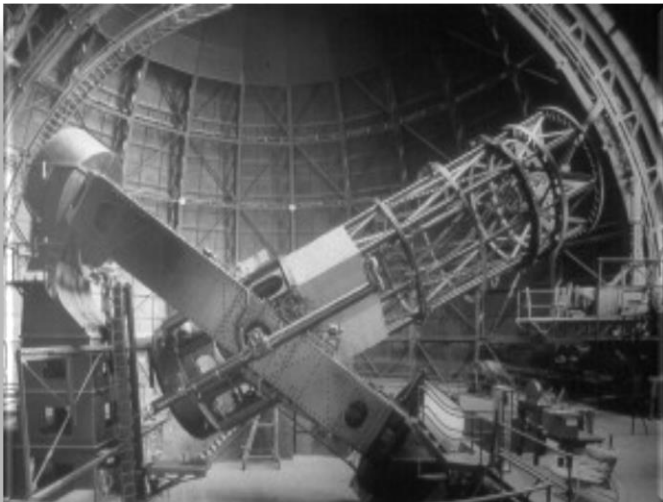
**Kad pogledamo oko sebe...  
...vidimo proslost**



**Istorija Univerzuma je oko nas**

# Hubble: Svemir se siri!

- **Edwin Hubble (1929)**  
otkriva da se Svemir siri



# Hubble-ovo otkrice

➤ Hubble proucava daljine i brzine galaksija

➤ Pronalazi pravilo: Udaljenije galaksije se kreću brže!

Brzina

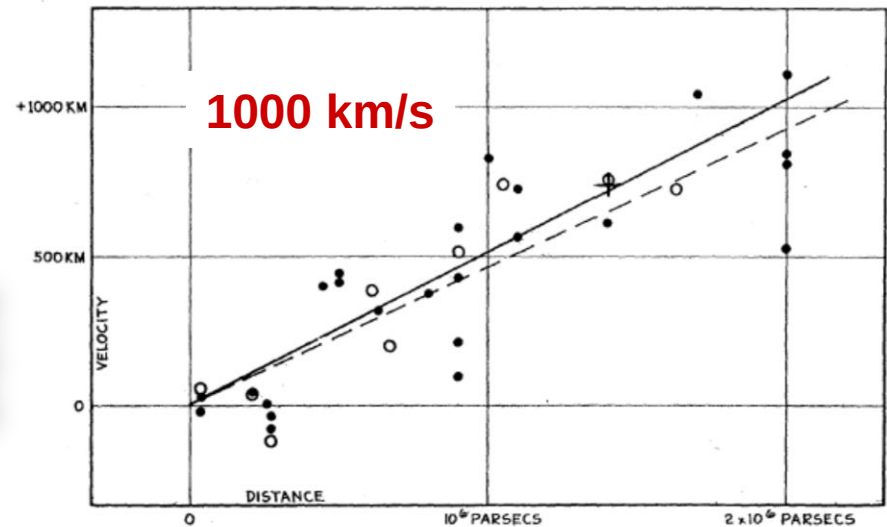
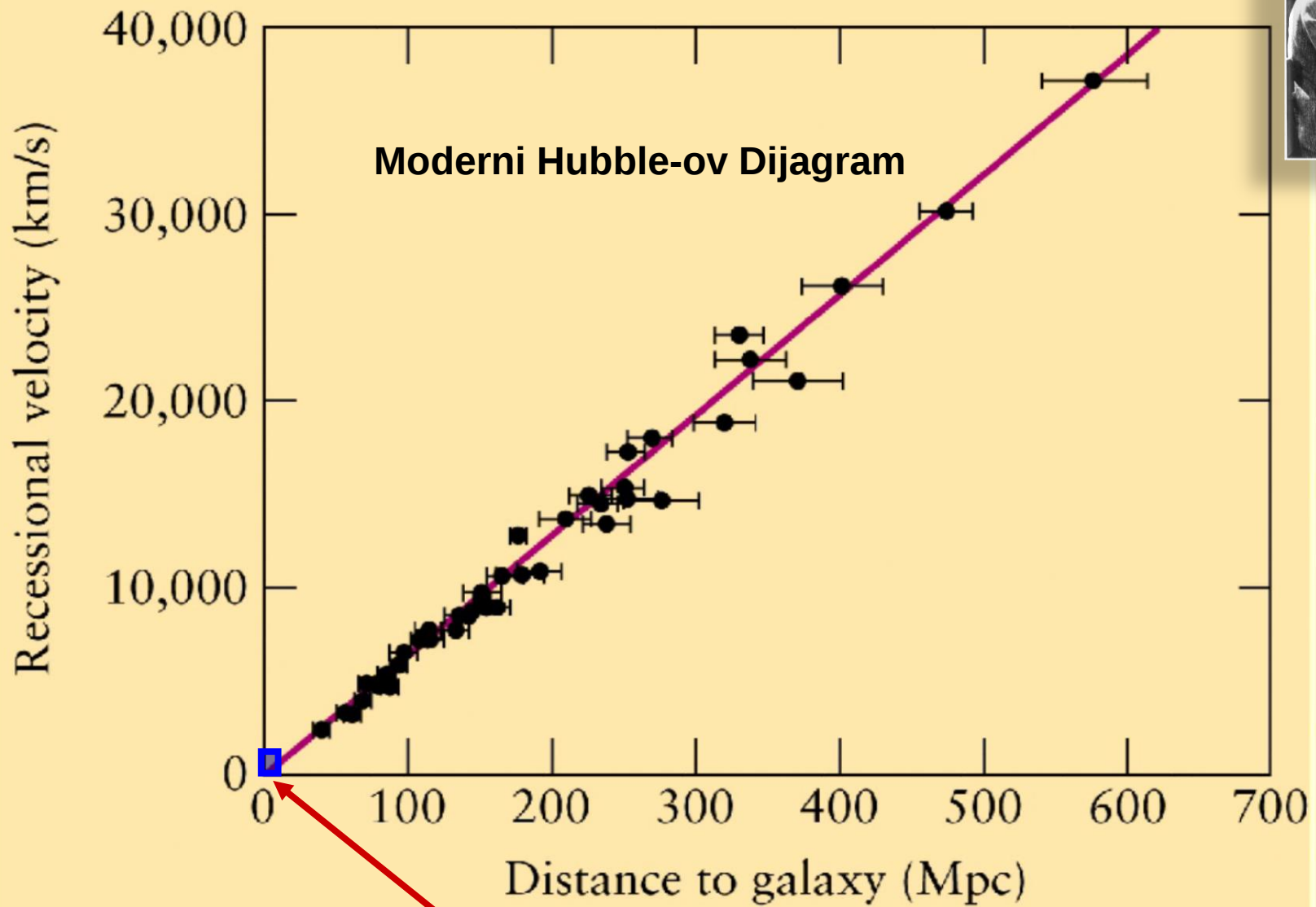


FIGURE 1  
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Daljina od nas

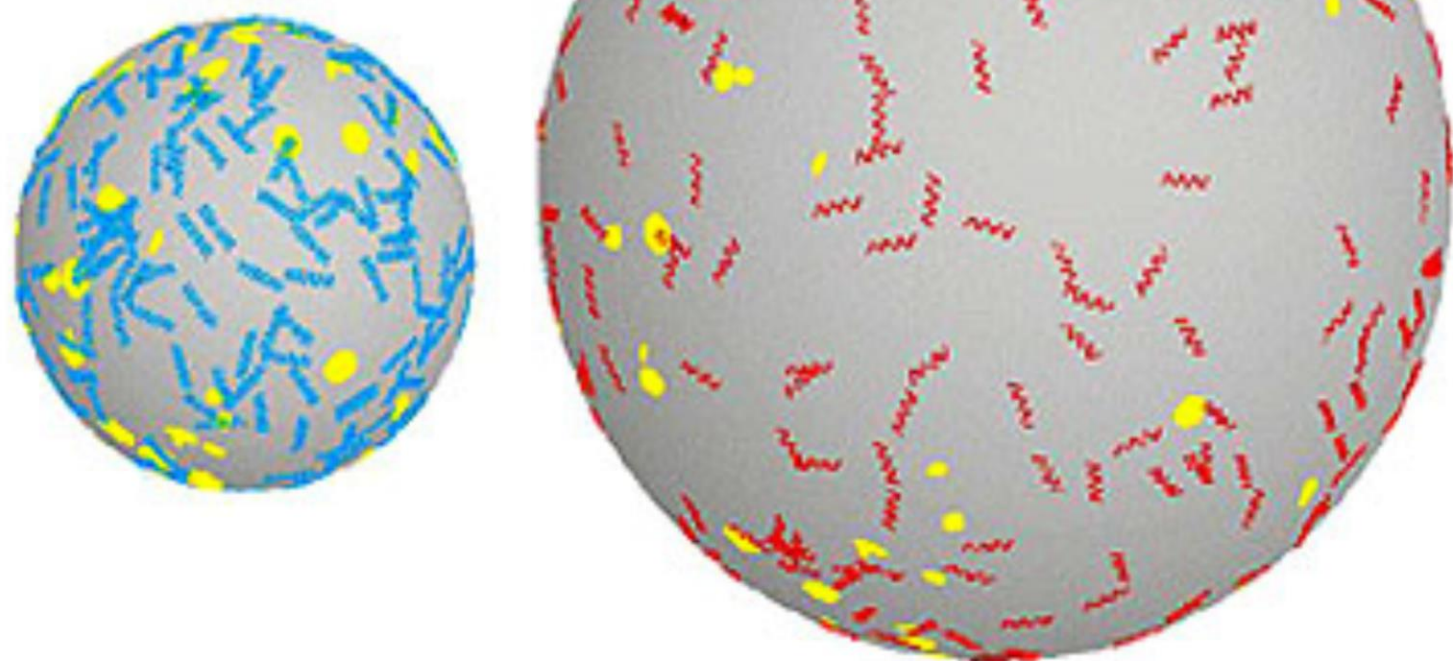
$$v = H_0 r$$

Hubble-ova konstanta



**Originalna merenja su bila ovde**

**Expanding Balloon Analogy**  
**Photons move and redshift**  
**Galaxies spread apart but**  
**stay the same size**



# Implikacije ekspanzije

Svemir se danas siri

**Okrenimo sat unazad:**

U proslosti, Svemir je bio manji

Gustina je bila veća

Temperatura je bila veća

Na pr. kao unutrašnjost Sunca



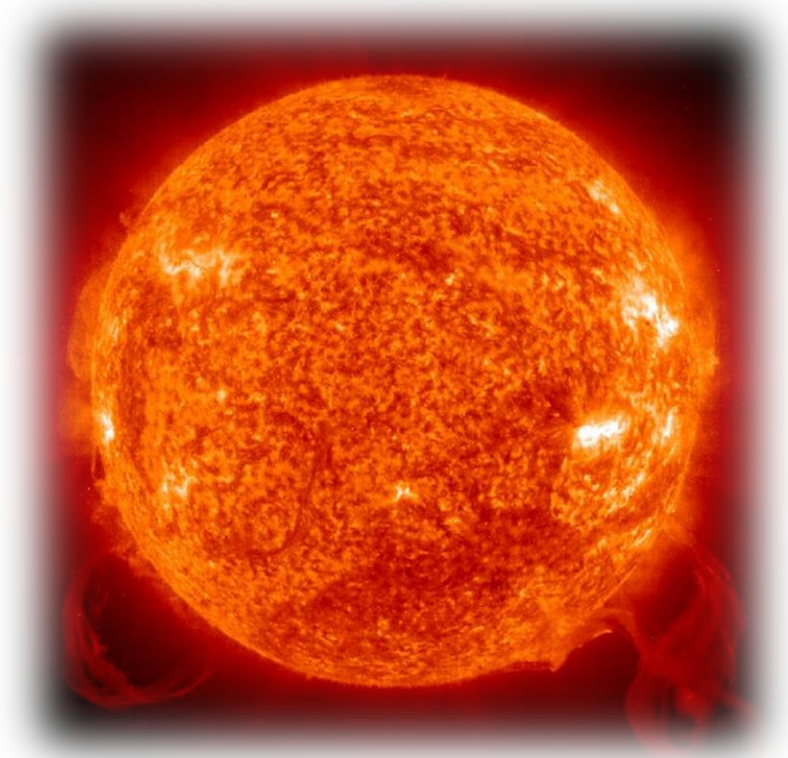
**Topli objekti emituju radijaciju**



**Mozemo li da vidimo radijaciju iz ranog Univerzuma?**

# Termalno zracenje iz Big Bang-a

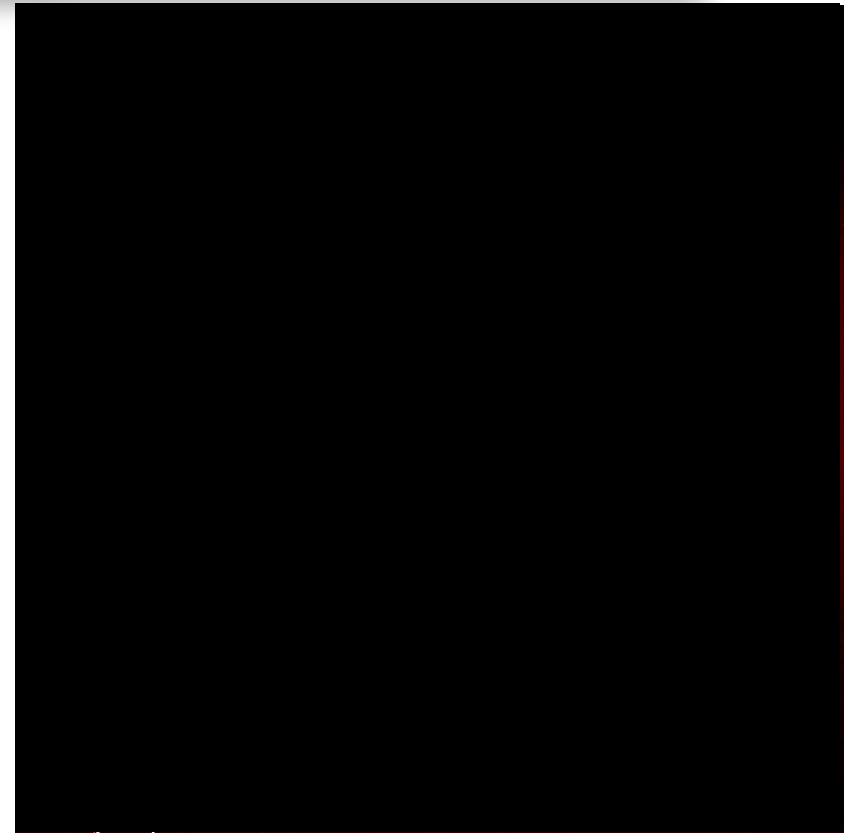
- Izgleda kao i svako drugo termalno zracenje
- Ali toliko toplo da je potpuno neprovidno
- Mozemo da gledamo u proslost naseg Univerzuma sve do vremena kad je on bio vrela plazma
- Dalje ne mozemo da vidimo!



03/03/18 07:19

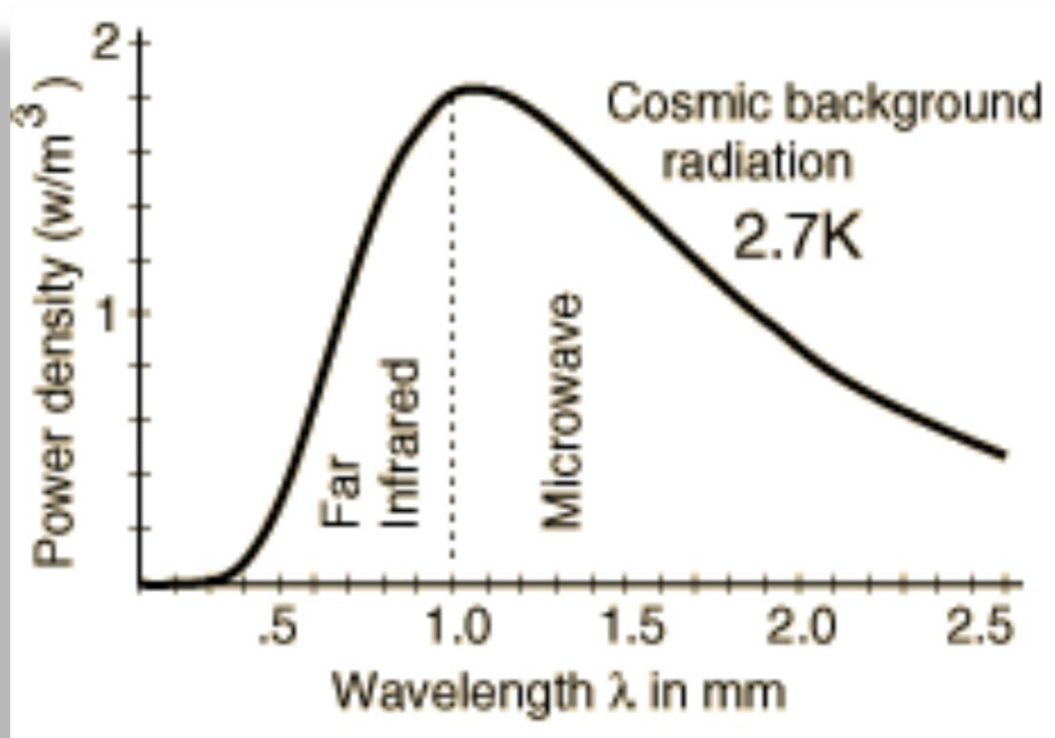
# **Termalno zracenje iz Big Bang-a: DANAS**

- **Svemir se siri**
- **Talasna duzina emitovanog zracenja se razvlaci**
- **Umesto vidljive svetslosti, to je danas 1000 puta duzi radio signal!**



**Nije u vidljivom delu spektra!**

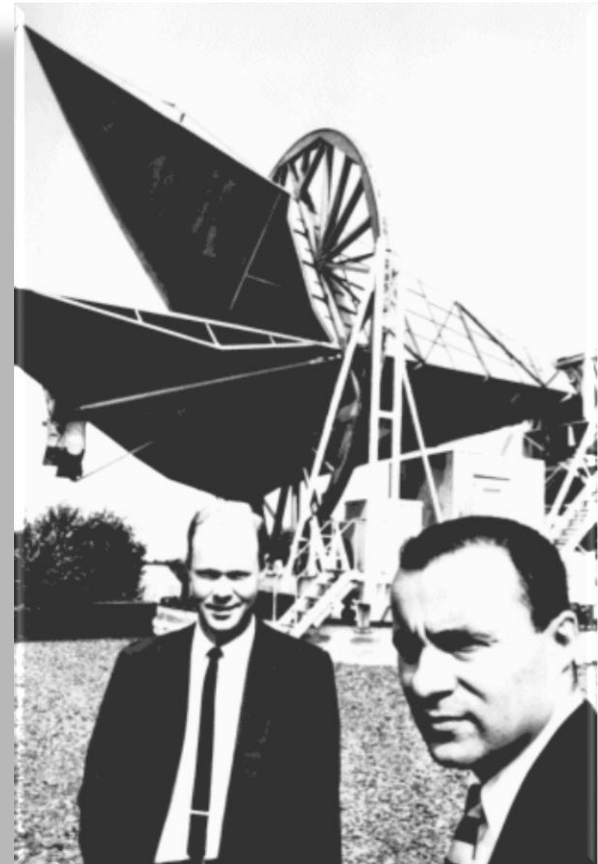
# Predikcija



Spektrum predvidjen 1940 (Gamov, Alpher i Hebert),  
i opet 1960 (Peebles)

# Kosmicki Sum:

## Otkrice Kosmickog Pozadinskog Zracenja (CMBR)



**Penzias i Wilson pokusali da nadju izvor suma u njihovom novom Bell Labs radio teleskopu (originalno namenjenom za komunikaciju sa satelitima).**

**Izgledalo je kao da sum dolazi sa svih strana Univerzuma...**

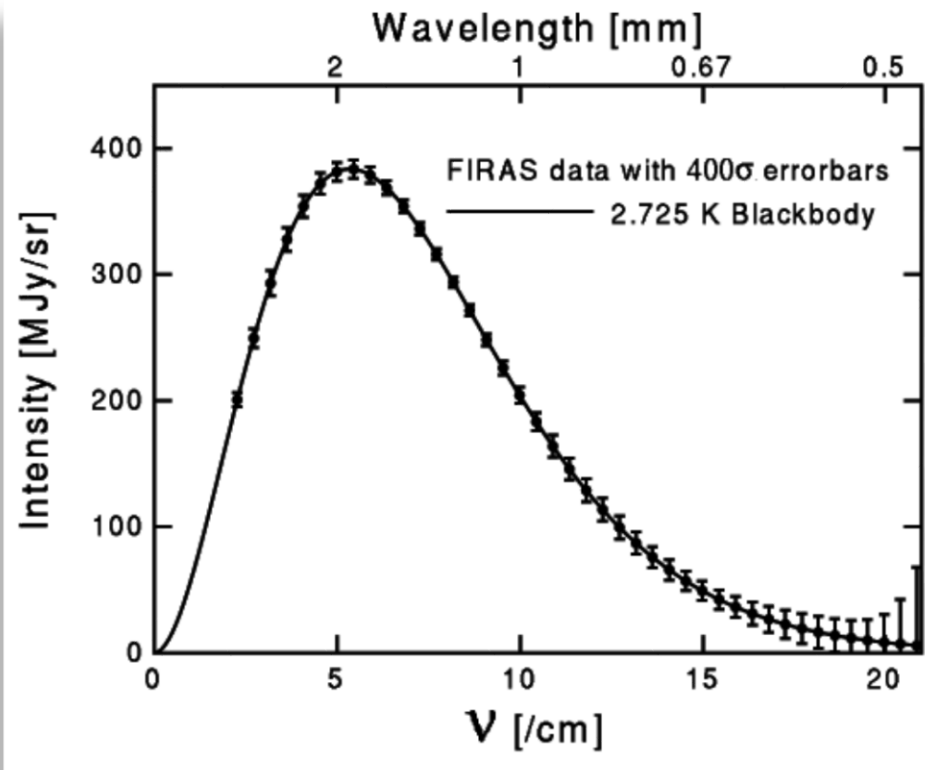
**Dobili Nobel-ovu Nagradu za svoje slucajno otkrice**

# Satelit COBE

- **Cosmic Background Explorer Satellite (COBE)**
- **Lansiran 1989**
- **Napravio prva precizna merenja CMBR**

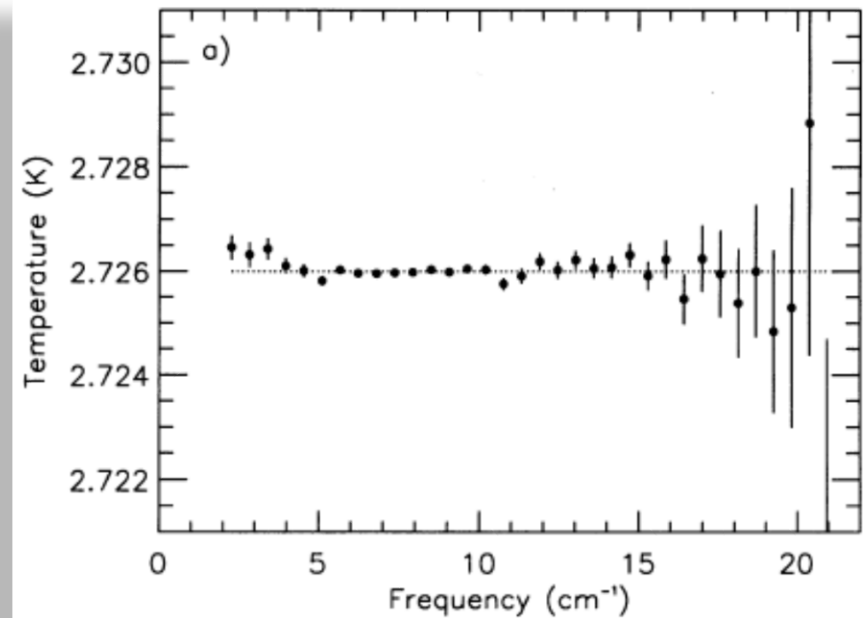


**COBE u orbiti**



**Sta je COBE video?**

**Perfektni termalni spektrum**



# Okrenimo sat dalje unazad

- Univerzum je bio još topliji i gušći
- Toliko topao da je mogao da podrži nuklearnu fuziju
- Fuzija stvara nove elemente

- Fuzija vodonika u helijum, helijuma u ugljenik itd.
- Sve do gvozdja
- Fuzija elemenata težih od gvozdja ima negativan energetska bilans
- Elementi teži od gvozdja su sintetizovani kasnije u zvezdama

## Letters to the Editor

**P**UBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

## Obilje lakih elemenata

Alpher, Bethe i Gamow su predložili (1948) da su svi laki elementi proizvedeni u ranoj fazi evolucije Univerzuma, tačnije u periodu zvanom NUKLEOSINTEZA.

### The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER\*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,  
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

*Cornell University, Ithaca, New York*

AND

G. GAMOW

*The George Washington University, Washington, D. C.*

February 18, 1948

**A**S pointed out by one of us,<sup>1</sup> various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed protons must have led first to the formation of deuterium nuclei, and the subsequent neutron captures resulted in the building up of heavier and heavier nuclei. It must be remembered that, due to the comparatively short time allowed for this process,<sup>1</sup> the building up of heavier nuclei must have proceeded just above the upper fringe of the stable elements (short-lived Fermi elements), and the present frequency distribution of various atomic species was attained only somewhat later as the result of adjustment of their electric charges by  $\beta$ -decay.

**Izracunali su relativno obilje vodonika, helijuma, litijuma...**

**Proporcije:**

**76% Vodonik**

**24% Helijum**

**Manje od 1% svih ostalih elemenata**

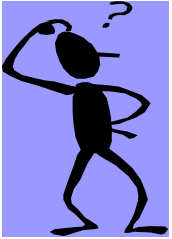
**Slaganje sa posmatranjima - IZVANREDNO!**

# Tri stuba Big Bang-a

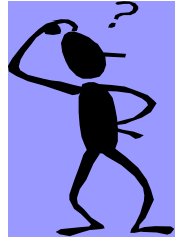


**Vrlo je tesko zamisliti model koji objasjava  
sve ove cinjenice a bitno se razlikuje od  
Big Bang-a!**





# **Lose vesti!**

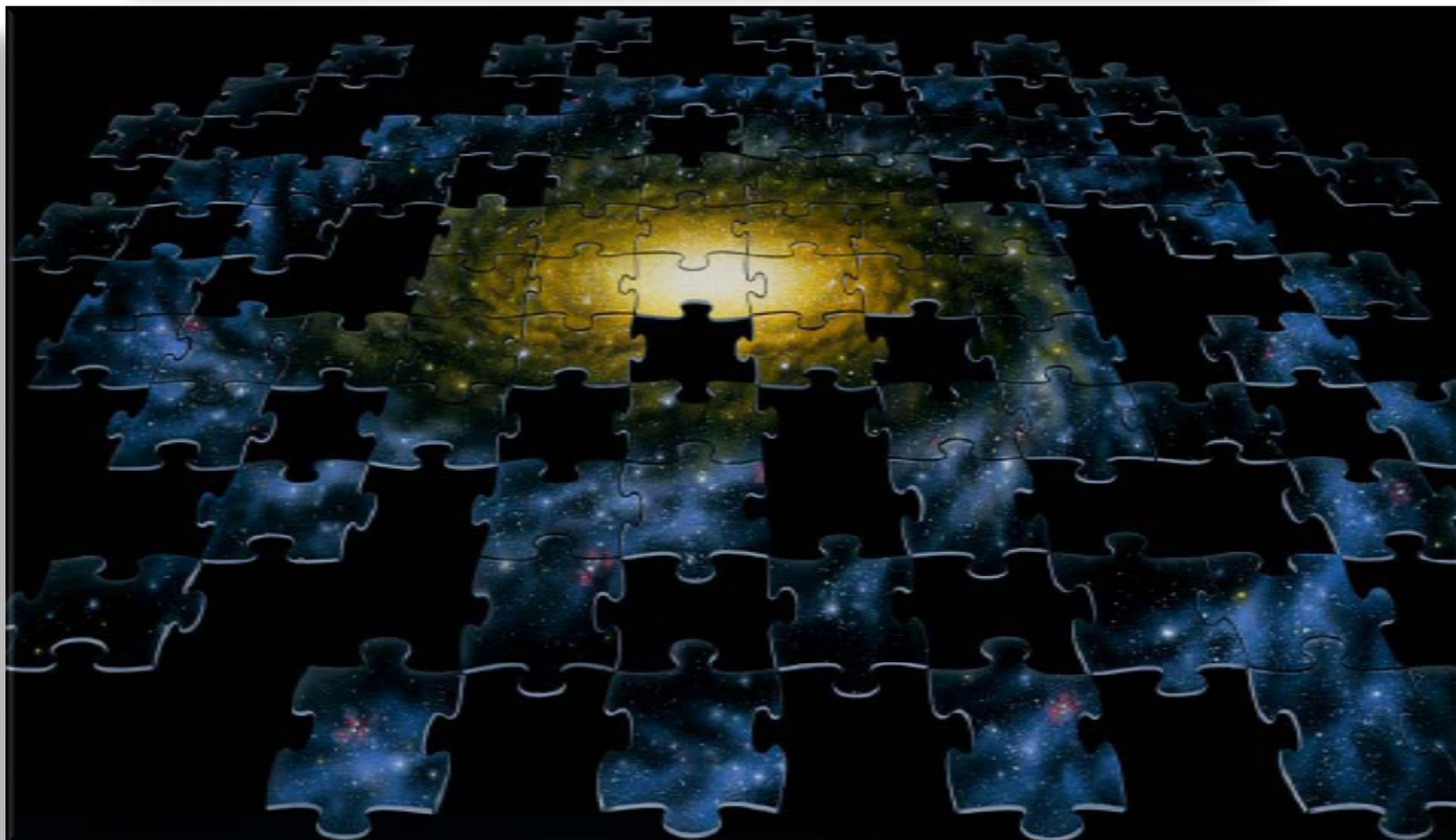


**Veliki problem otkriven nedavnim posmatranjima:**

**96% sadržine Univerzuma  
izgleda da nedostaje**

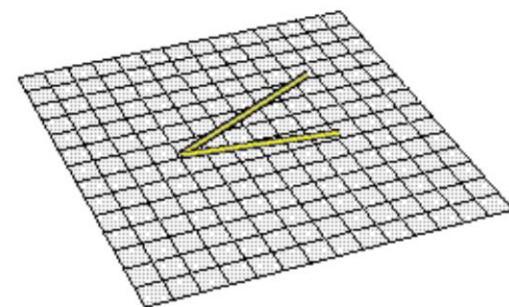
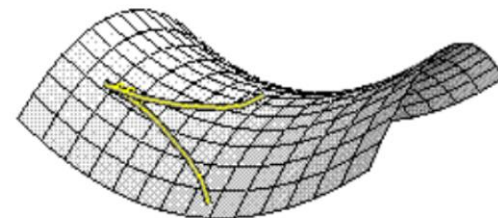
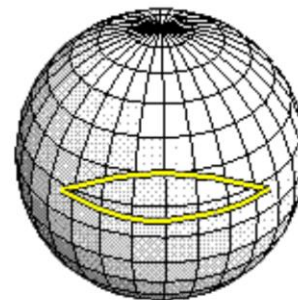


# Zagonetka tamne materije

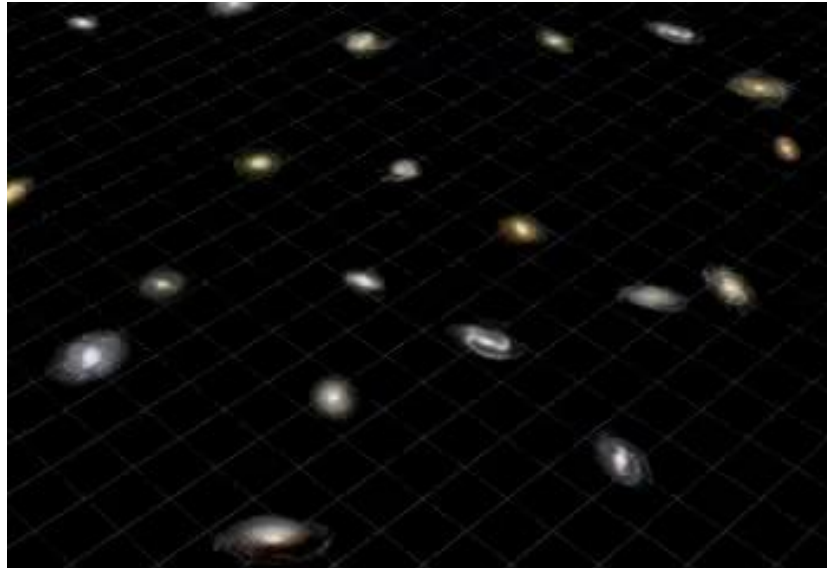


# Geometrija Univerzuma zavisi od kolicine energije/mase u Univerzumu

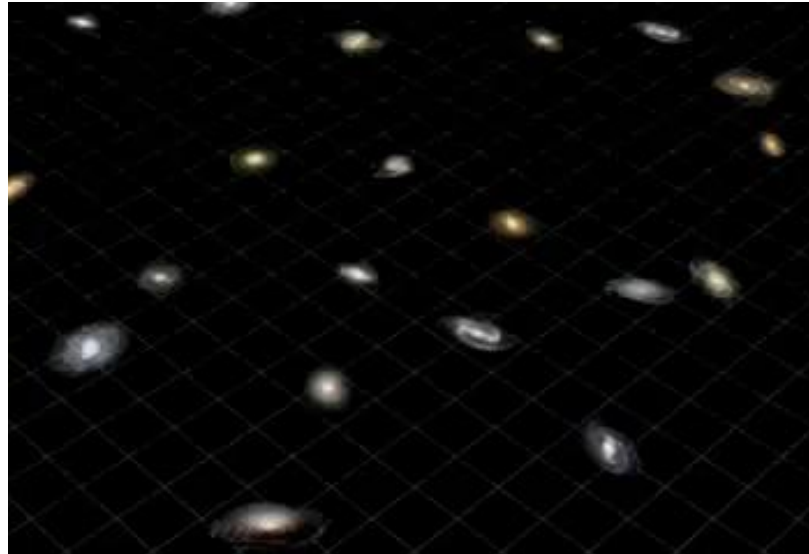
- Ako je  $\Omega > \Omega_c$ , Univerzum je zatvoren
- Ako je  $\Omega < \Omega_c$  Univerzum je otvoren
- Ako je  $\Omega = \Omega_c = 1$  Univerzum je ravan



**Big Crunch  $\Omega_M > 1$**

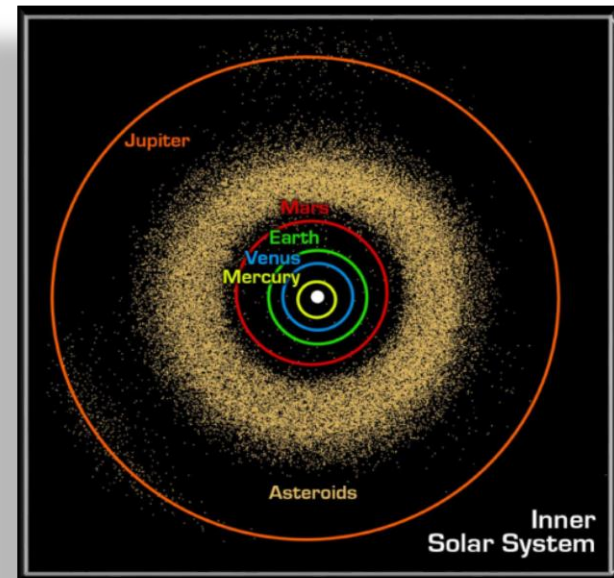


**Big Rip  $\Omega_M < 1$**

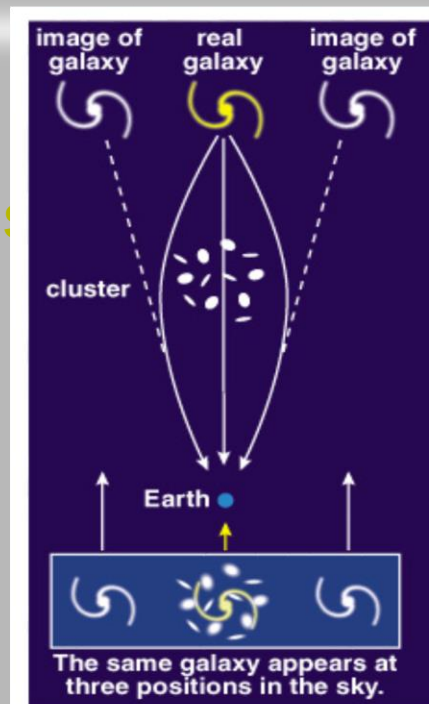


# Kako se meri sadrzina Univerzuma?

- Da bi izmerili masu, moramo da koristimo gravitaciju
  - Rotacija masivnih objekata (Newton...)
  - Krivina prostora (Einstein...)
- Obe metode ukazuju na prisustvo nevidljive (tamne) materije



NASA  
JPL  
image



Copyright © Addison Wesley.

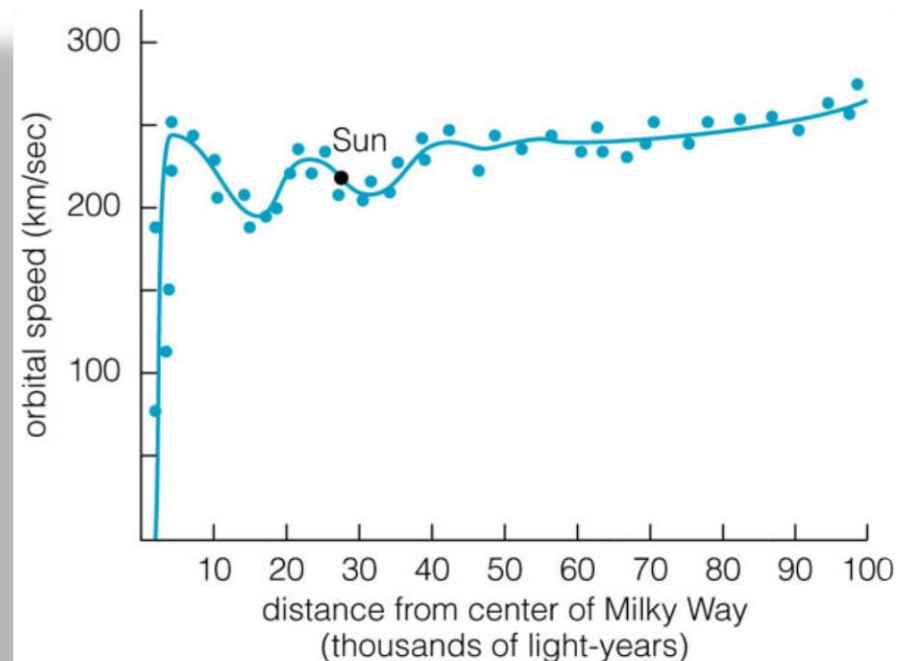
# Rotaciona kriva nase Galaksije (Mlečni Put)

Koristimo *Newton-ovu verziju trećeg Kepler-ovog zakona*

Posmatranjem *orbitalnih brzina zvezda* mozemo da procenimo koliko je mase skoncentrisano u Galaksiji

$$v^2 \propto \frac{GM(r)}{r}$$

Rotaciona kriva nase galaksije: **orbitalna brzina zvezda kao funkcija rastojanja od centra Galaksije**

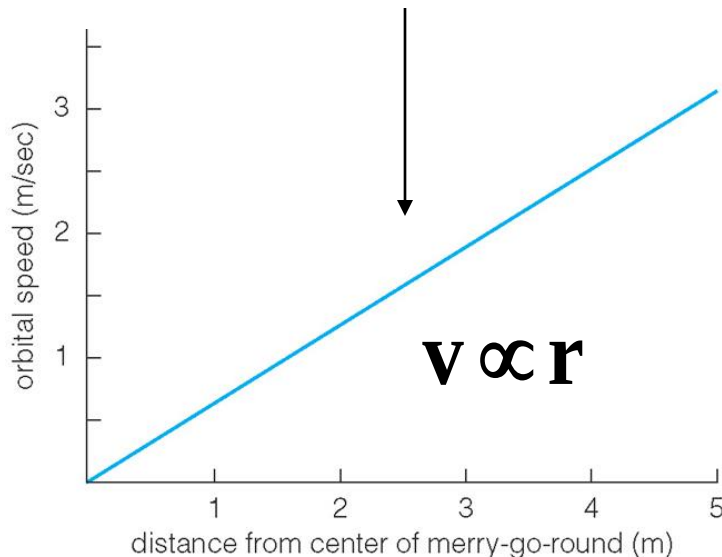


# Rotacione krive sistema koje poznajemo

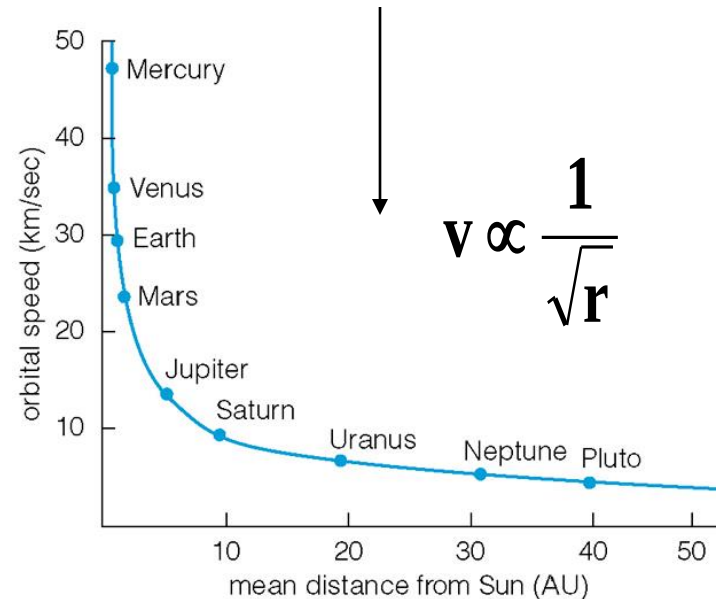
- Pogledajmo prvo kako izgledaju rotacione krive

1. Rotirajućeg krutog tela
2. Sistema sa masom u centru

Rotaciona kriva  
krutog tela



Rotaciona kriva sistema sa  
masom skoncentrisanom u  
centru (npr. nas Suncev  
sistem)



# Sta nam ravna rotaciona kriva Mlecnog Puta govori?

Ravna rotaciona kriva Mlecnog Puta indicira:

- Masa nije skoncentrisana u centru galaksije
  - Masa raste sa rastojanjem od centra
- 
- Vecina mase se nalazi u sferi koja obuhvata disk Galaksije
  - Ukupna masa je **10 puta** veca od mase skoncentrisane u zvezdama



**Ali vrlo malo svetlosti dolazi iz tog regiona!**

# Tamna Materija u drugim galaksijama

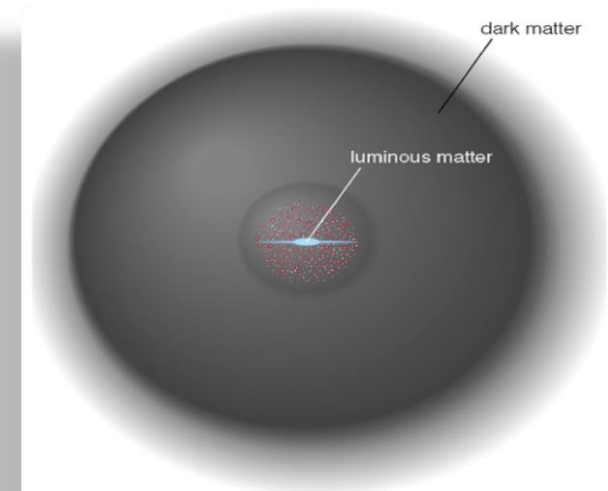
Sve opservacije indiciraju da:

- 90% mase galaksija NE emituje svetlost
- Vecina mase je **DARK MATTER (Tamna Materija)**

10%

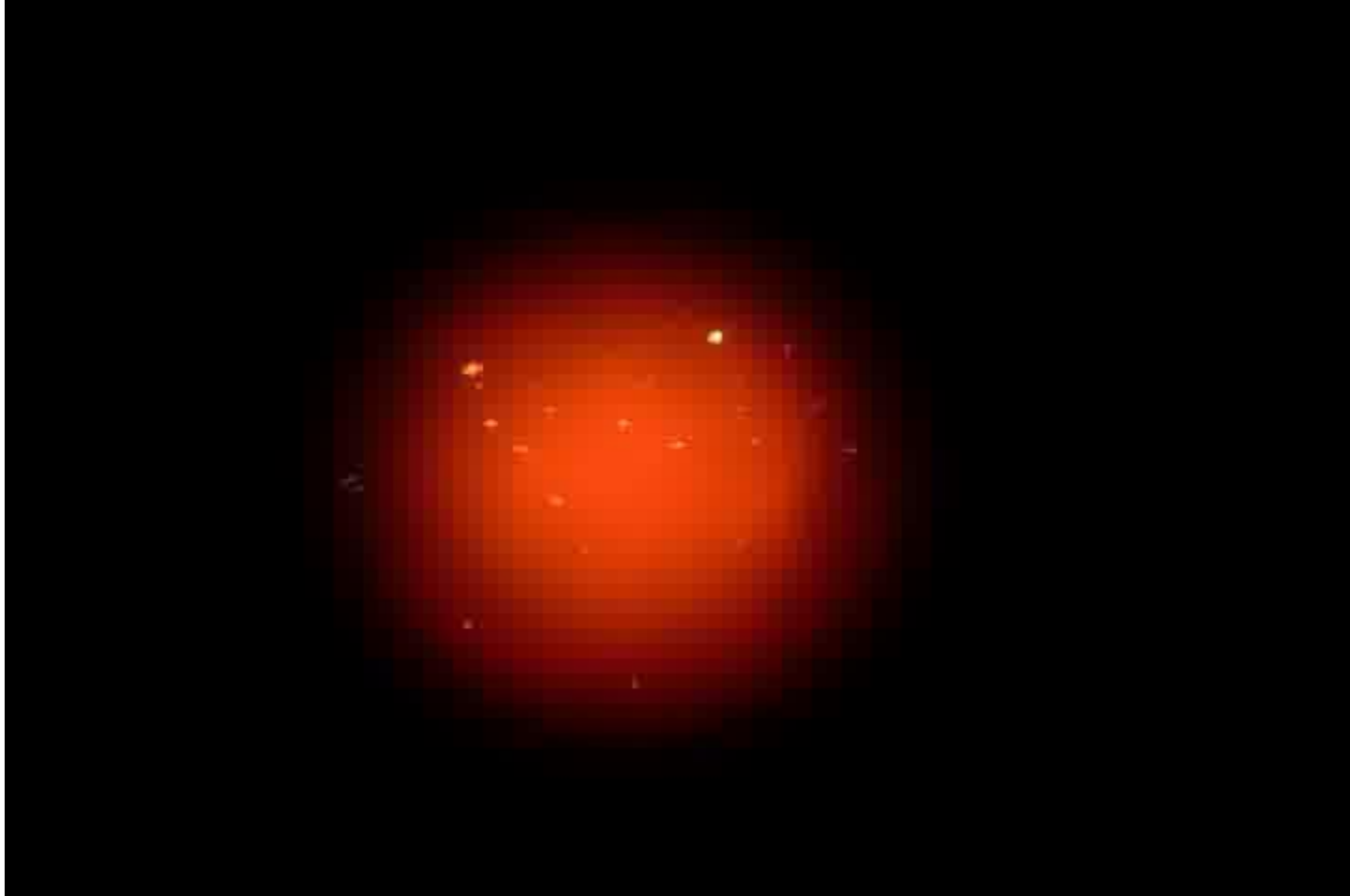


90%



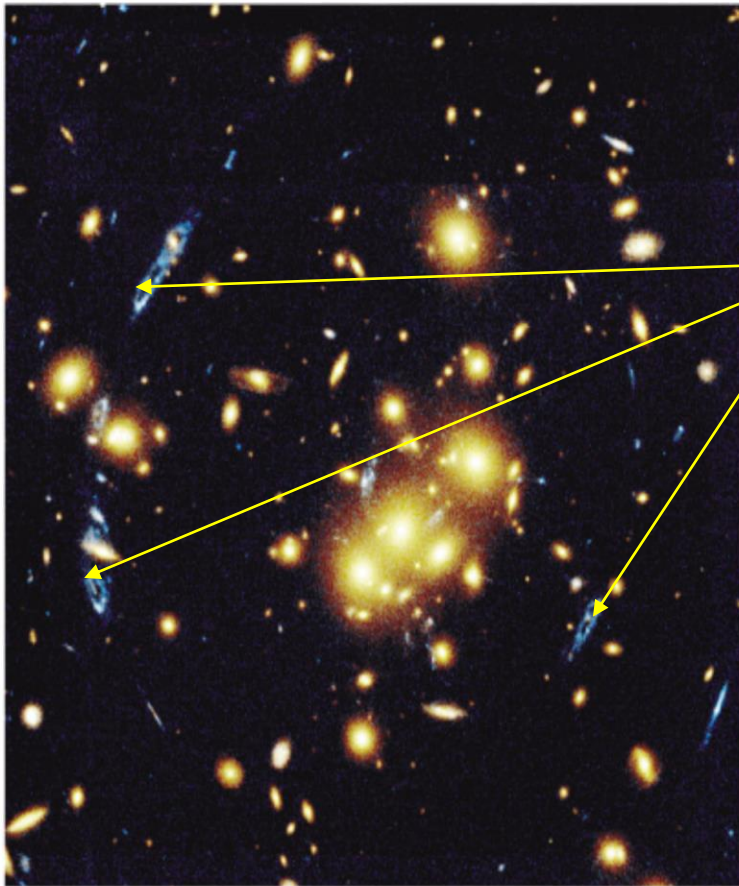
© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

# Klasteri Galaksija



# Efekat Gravitacionog Sociva

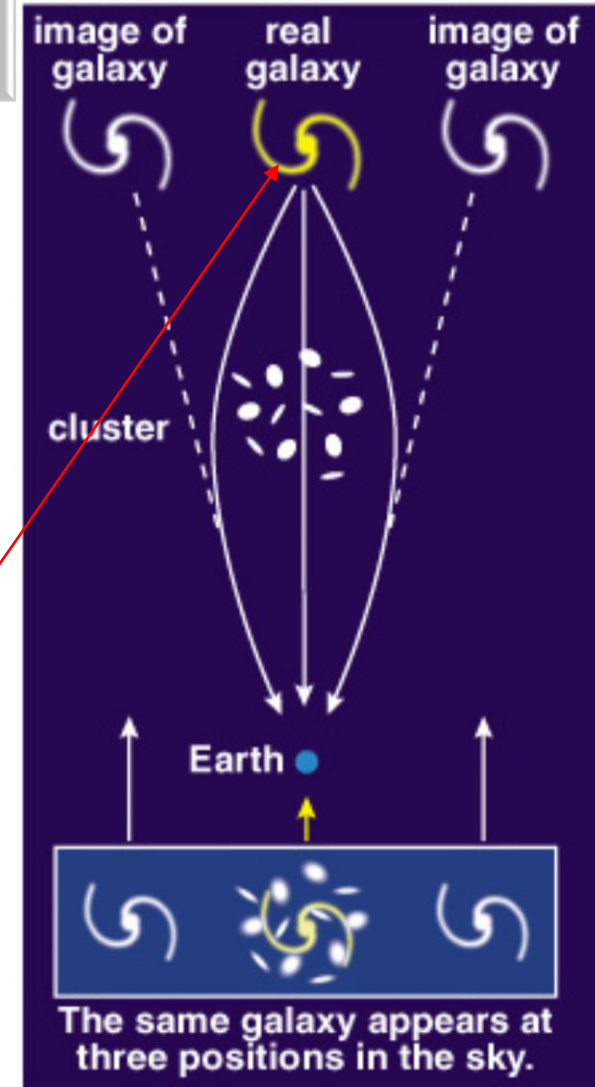
Masivni objekti mogu da oponasaju efekat sociva  
Prave višestruke slike udaljenih objekata



Copyright © Addison Wesley.

Gravitaciono socivo  
proizvodi višestruke  
slike iste galaksije

Ako znamo daljinu  
galaksije koju  
gledamo kroz socivo  
mozemo da  
izracunamo masu  
klastera koji sacinja  
socivo

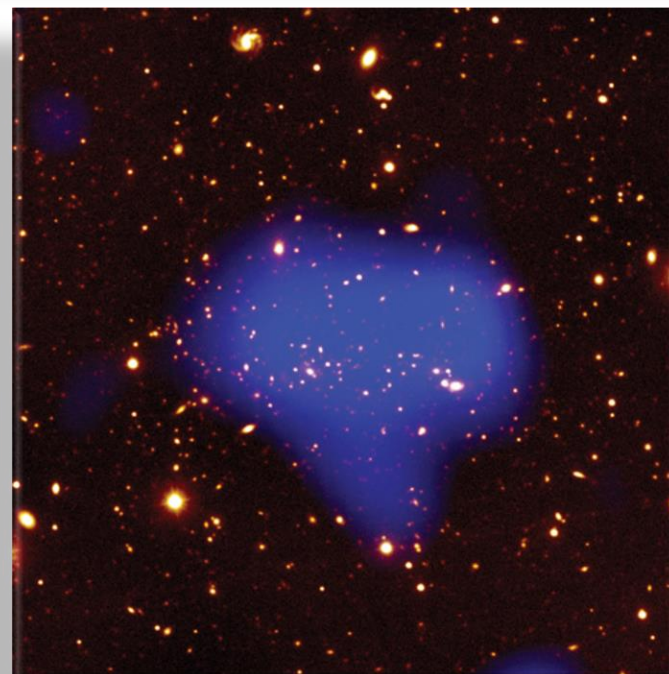


Copyright © Addison Wesley.

# X-ray zracenje interklasternog medijuma

- Ako je pritisak vrelog interklasternog gasa u ravnotezi sa gravitacijom (kao gas u zvezdi), onda merenjem pritiska (temperature) mozemo proceniti masu koja je izvor gravitacije
  - **Procenjena masa** interklasternog medijuma **u prostoru izmedju galaksija je 50 puta veca nego vidljiva masa u klasteru**

**Plava oblast predstavlja emisiju X-zracenja vrelog gasa u klasteru**



# Sta je Tamna Materija?

## Moguci kandidati I:

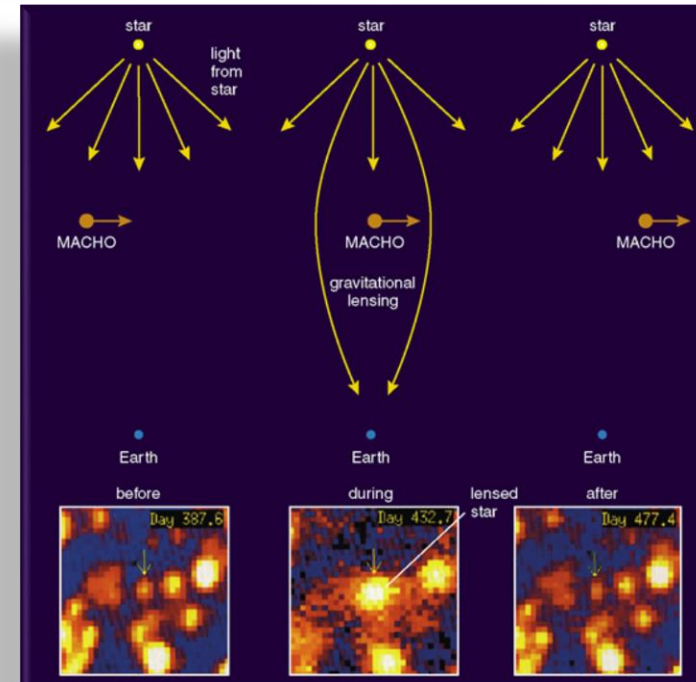
- Obicna Tamna Materija:**

**MACHO** (Massive Compact Halo Objects) :  
Obicna materija koja ne emituje mnogo svetlosti?

- ⇒ Beli patuljci,
- ⇒ Planete tipa Jupitera,
- ⇒ Crne rupe Sunceve mase...

*Posmatranja: nema dovoljno MACHO-a da bi se objasnila Tamna Materija...*

## Gravitaciono socivo MACHO-a



© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

**Znaci, treba nam nesto drugo!**

**Posmatranja indiciraju da Tamna Materija mora biti**

- Masivna**
- Neutralna**
- Hladna (ne-relativisticka)**
- Stabilna (veka slicnom starosti Univerzuma)**

**Takav kandidat ne postoji u Standardom Modelu**



**Potrebna nam je fizika iza Standardnog Modela**

# Sta je Tamna Materija?

## Moguci kandidati II:

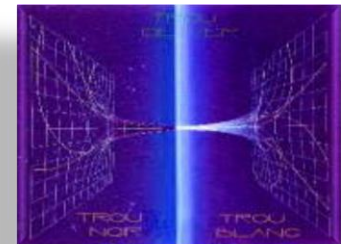
### Egzoticna materija:

**WIMPs** (Weakly interacting *massive* particles)

– *hipotetckie* teske cestice

⇒ **Supersimetricni partneri obicnih cestica**

⇒ **Cestice asocirane sa ekstra dimenzijama**



# Klaster “Metak” (2006)

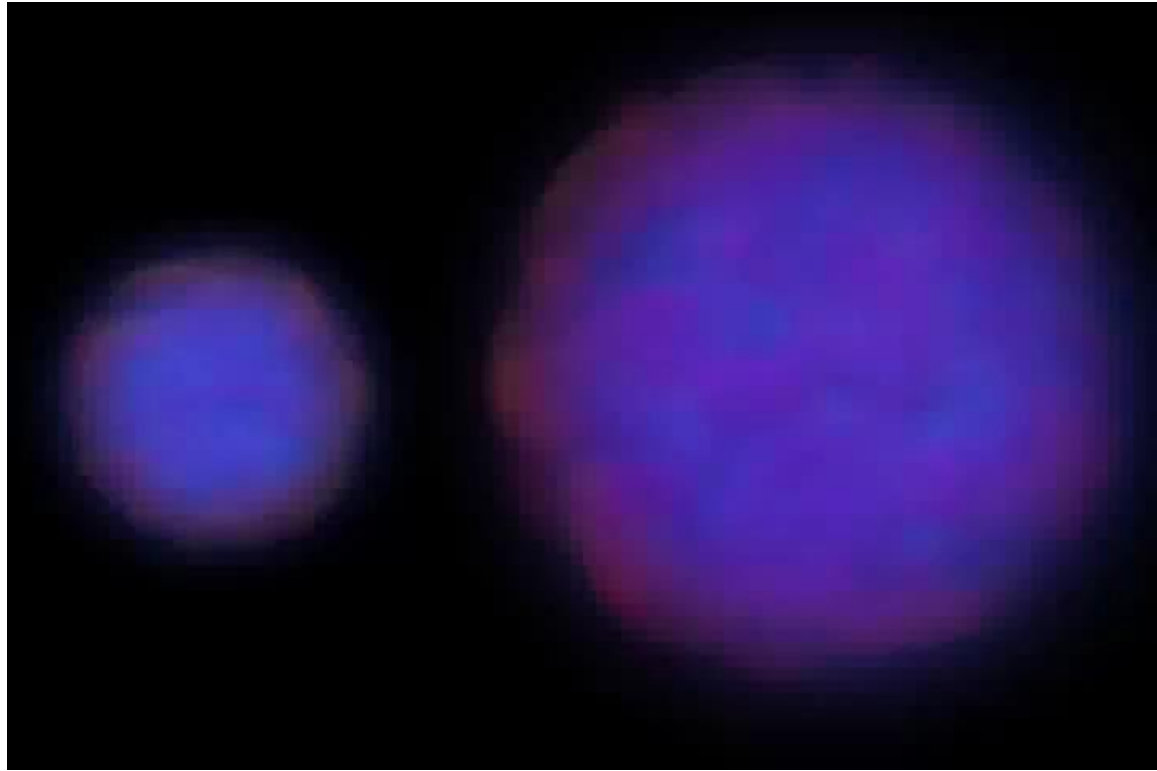
## Ubedljiv argument za Tamnu Materiju



Dva klastera  
galaksija u sudaru

Tamna Materija **plavo**  
obicna materija **crveno**

- Tamna Materija, detektovana indirektno, nije poremećena u sudaru
- Obicna Materija je poremećena i formira front oblika metka
- Tesko je objasniti sliku bez uvođenja Tamne Materije



**Stroge indikacije da  $\Omega_M = 0.27$**

**4% obicna materija  
23% tamna materija**

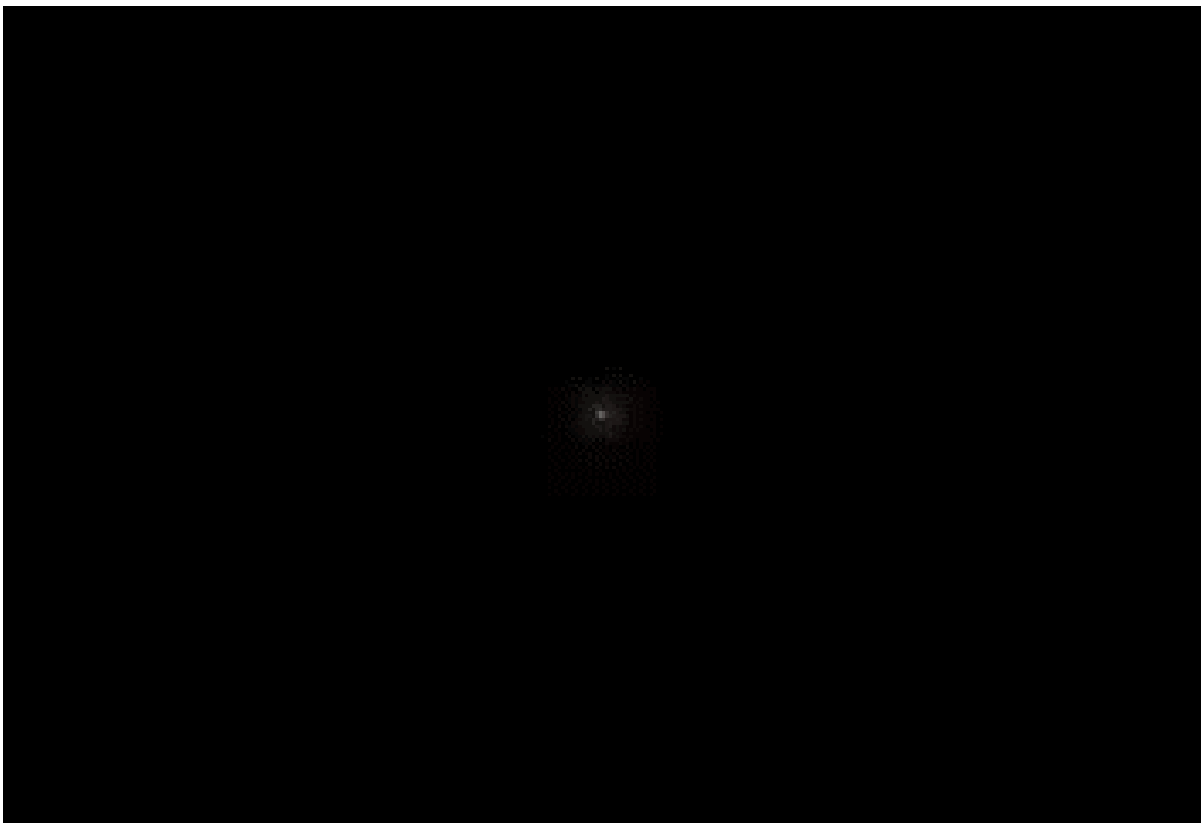
**Gde je ostalih 73%?**

# **Zagonetka Tamne Energije**

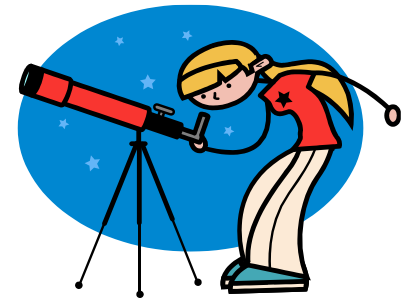
Nedavno, studirajući Supernove tipa Ia,  
astronomi su приметili nešto čudno

**Ekspanzija našeg Univerzuma se ubrzava!**





# Supernova



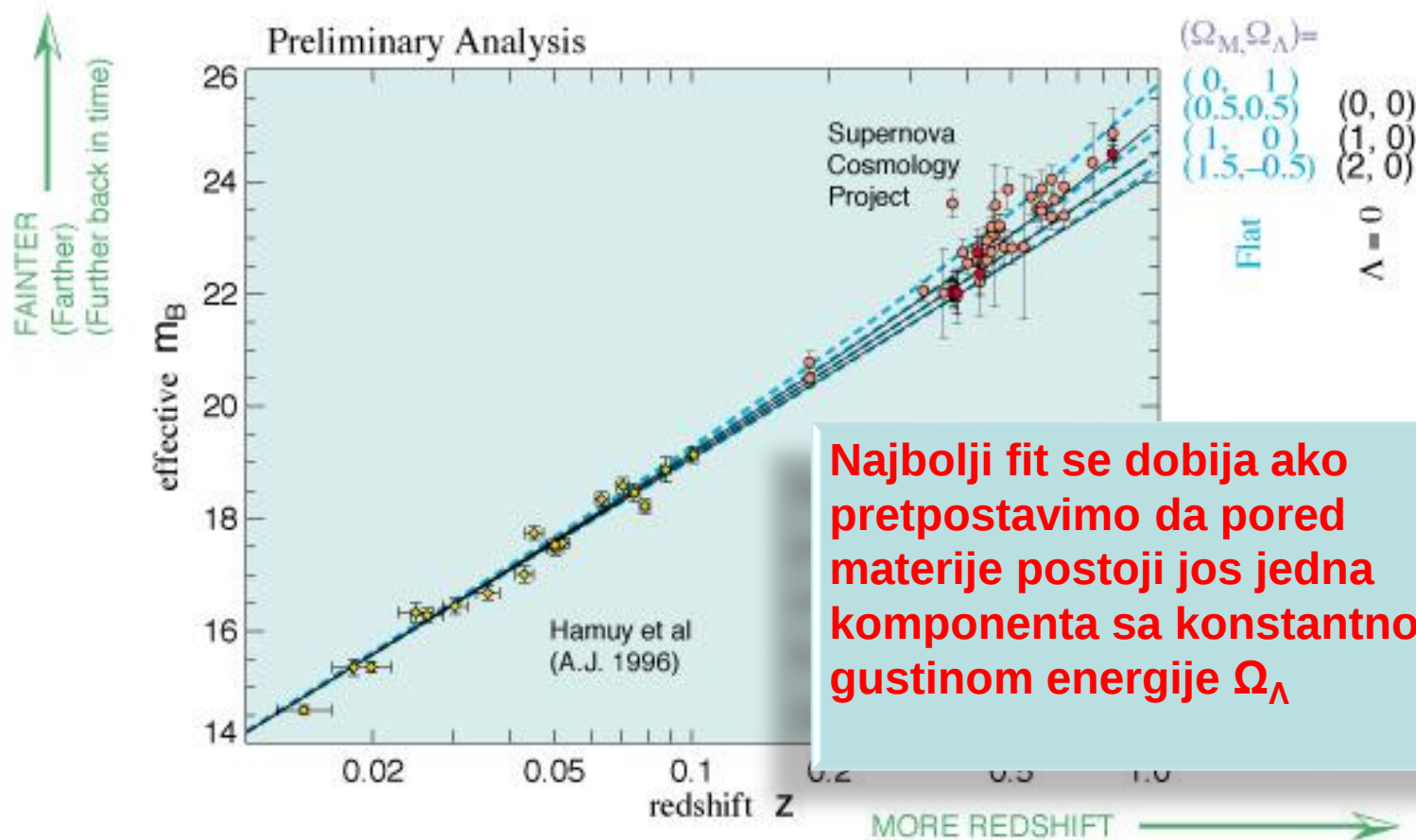
- Astronomski objekat čija je fizika dobro poznata
- Velika eksplozija blizu kraja života jedne zvezde



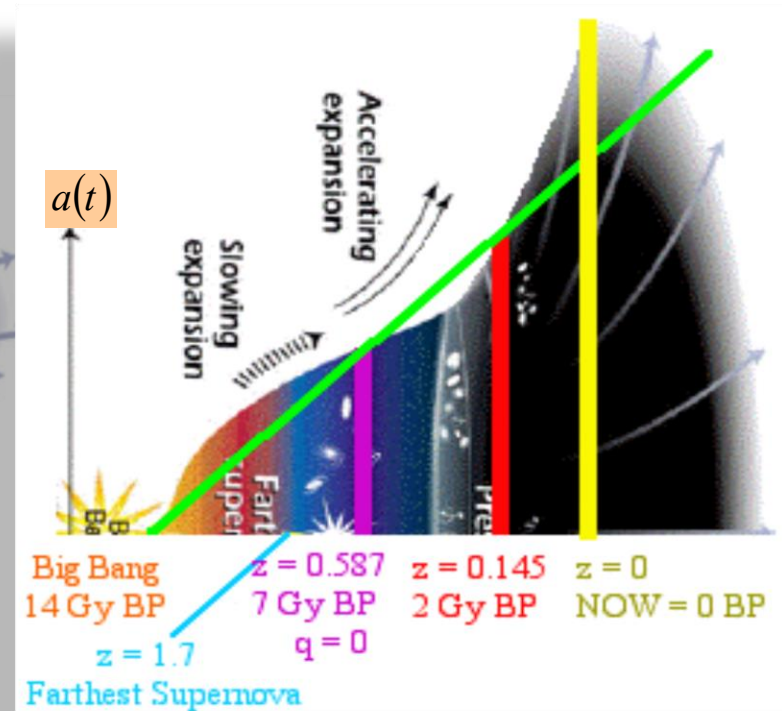
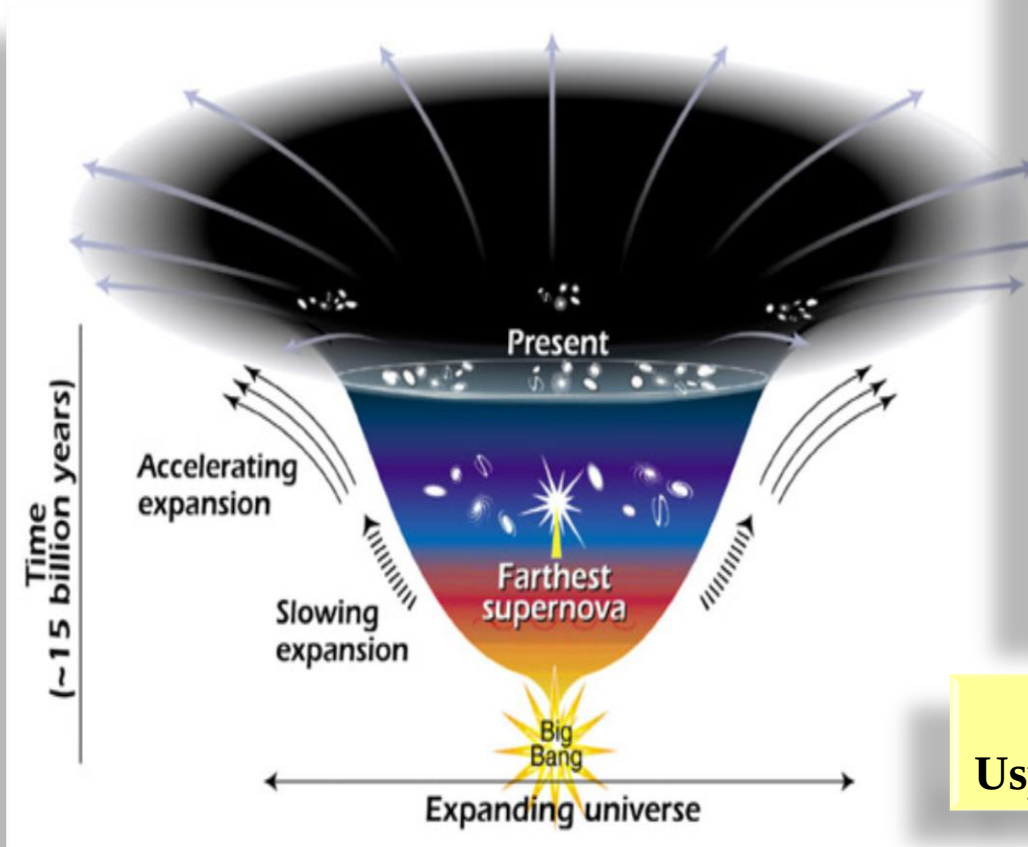
# Kosmicka akceleracija: Supernove tipa Ia

Supernove datog crvenog pomaka izgledaju tamnije (dalje) nego sto smo očekivali ➡ Univerzum ubrzava ekspanziju

## Hubble Plots



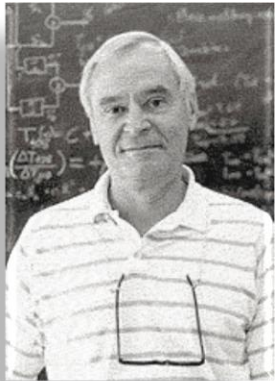
# Istorija ekspanzije Univerzuma



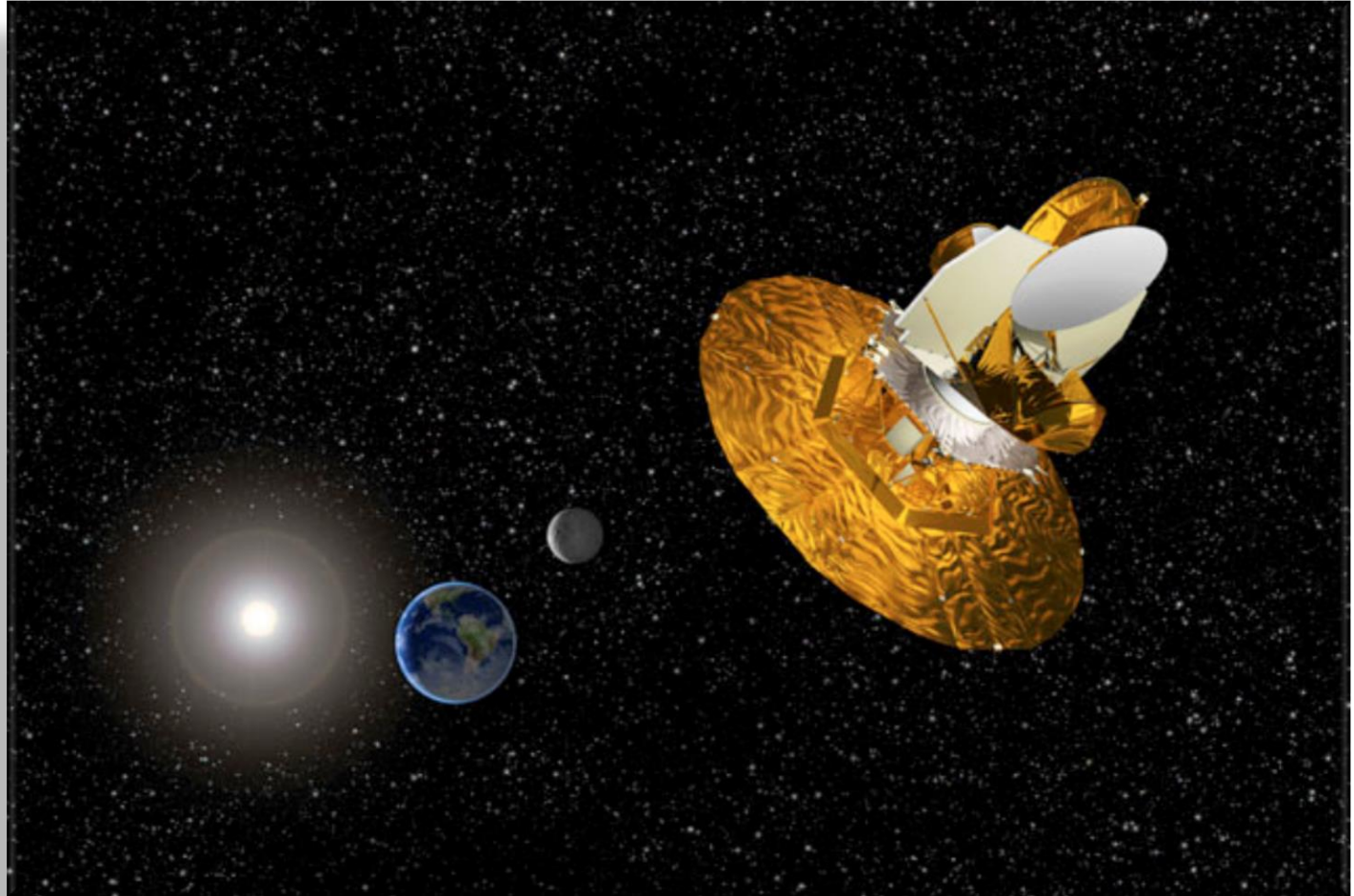
**Ocekivano:**  
Usporavanje ekspanzije zbog gravitacije

**Primeceno:**  
Ekspanzija se ubrzava

# Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (Wilkinson-ova mikrotalasna proba an-izotropije)

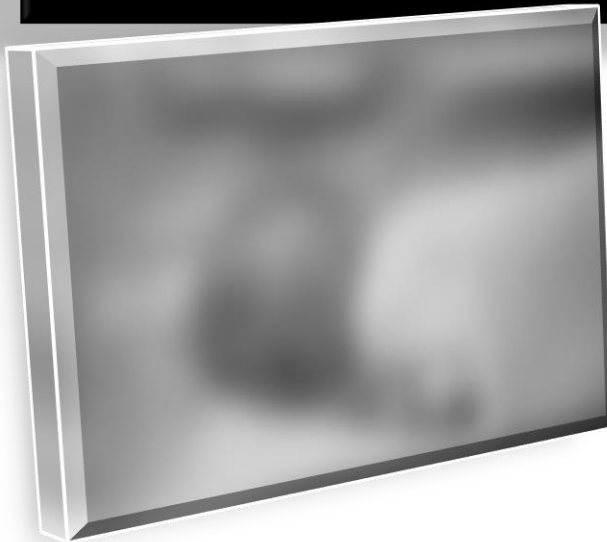
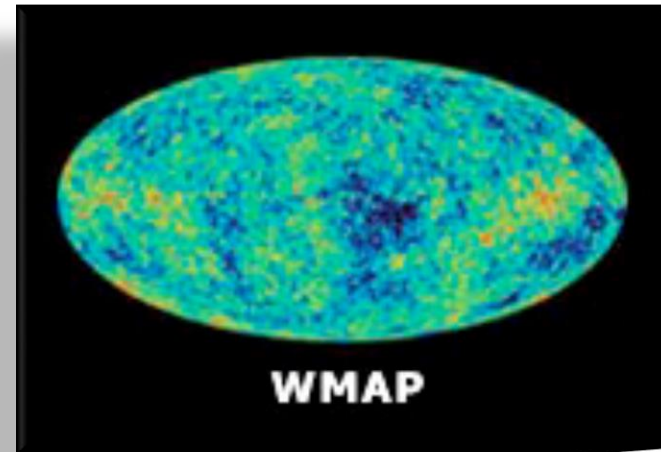
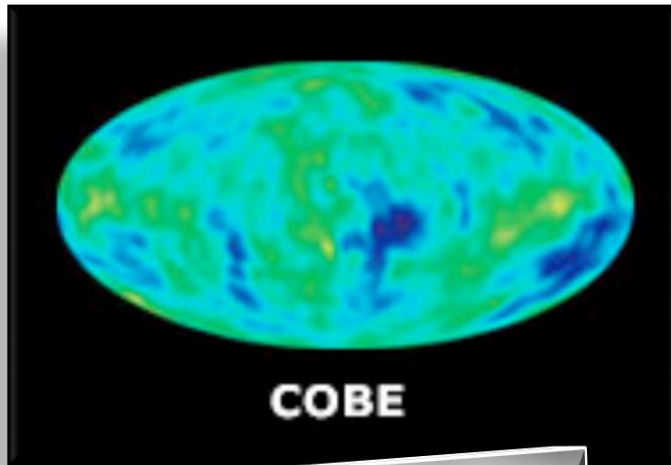


David Wilkinson

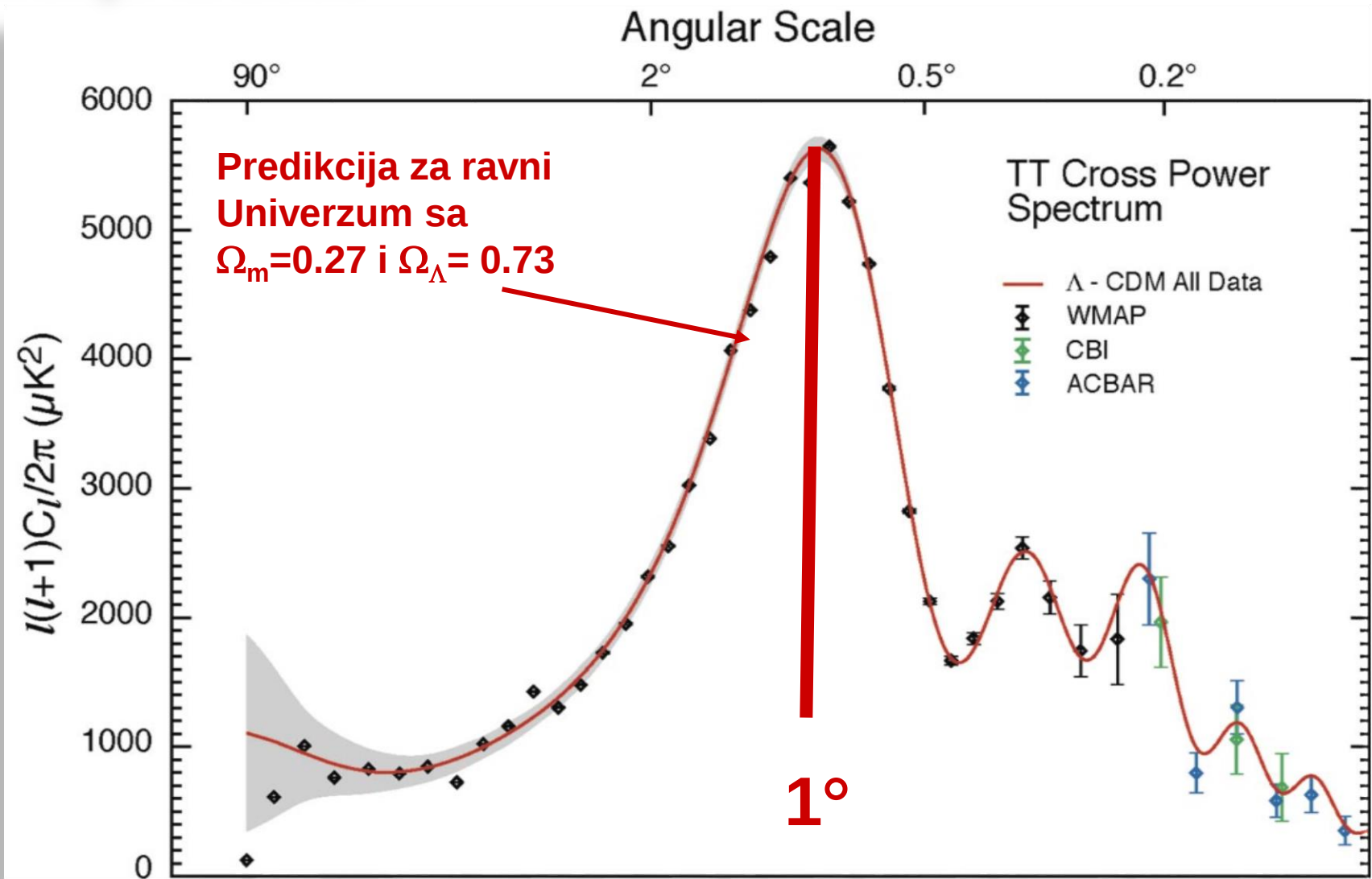


WMAP u svemiru

# WMAP: nova, bolja merenja CMBR-a

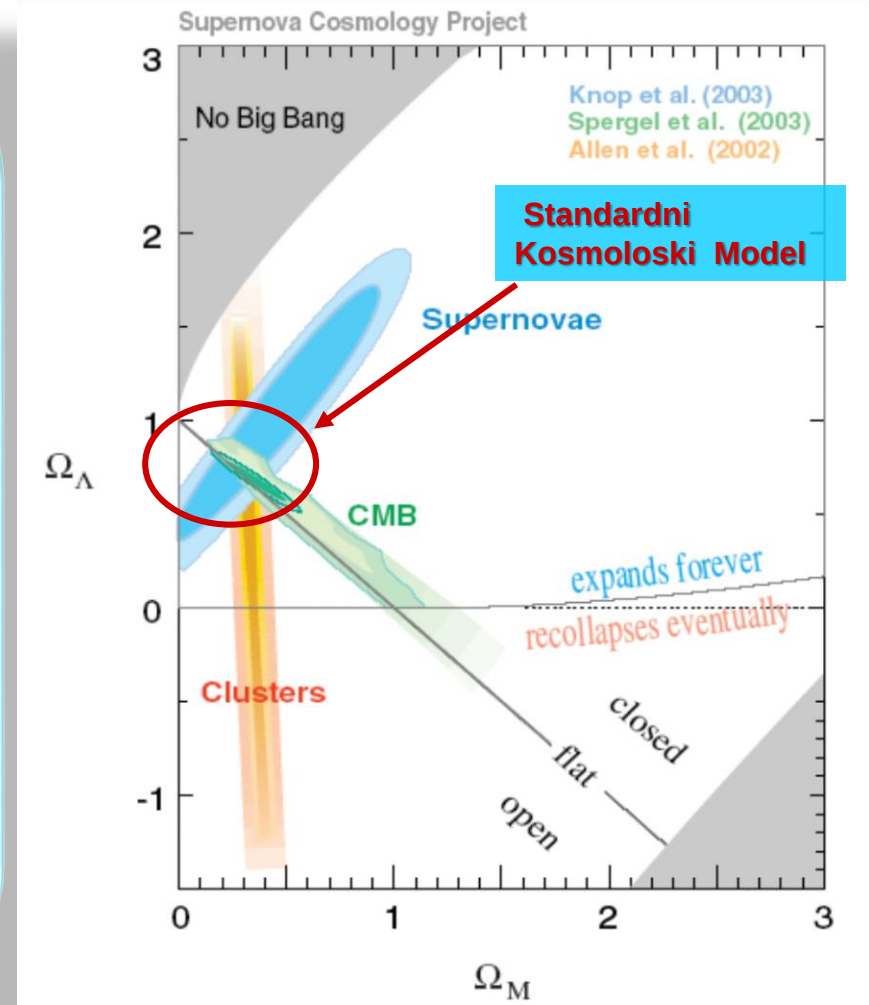


# Merenja iz 2003



# Kosmoloska Konstanta

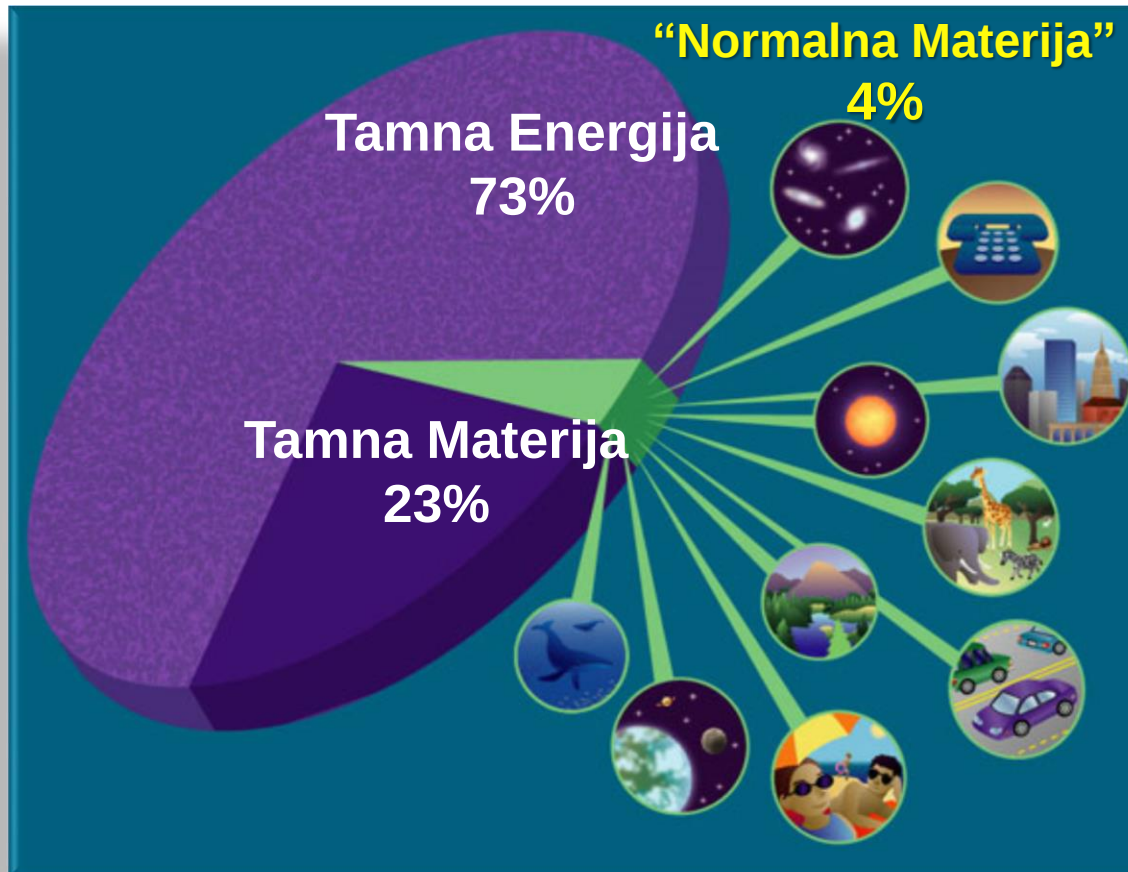
- ❖ Pored materije postoji neka supstanca sa konstantnom gustinom energije  $\Omega_\Lambda$
- ❖ Trenutno se ideje fokusiraju oko **energije vakuma**
- ❖ Ova energija uzrokuje ubrzanu ekspanziju



# Sastav Univerzuma



# Tamna Energija čini 73% Univerzuma



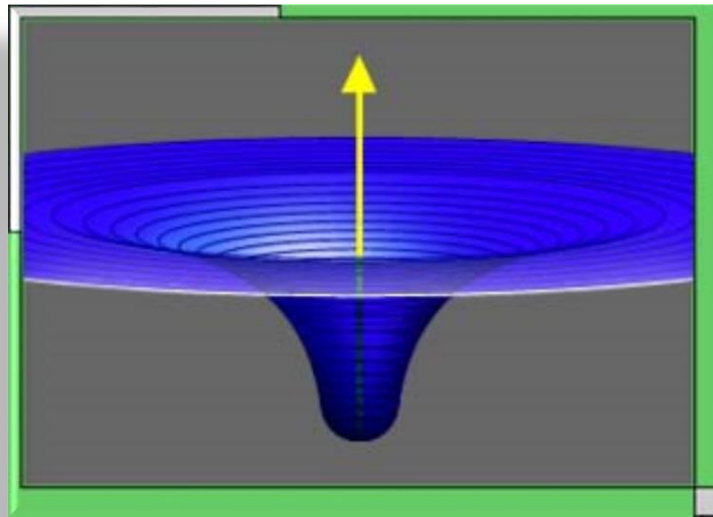
# Kosmoloska konstanta

- Einstein (1915): Opsta Teorija Relativnosti:  $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

Kosmoloska Konstanta

Kosmolosko ubrzanje



# Sta je kosmoloska konstanta?

“Za svaki kompleksni prirodni fenomen postoji **jednostavno, elegantno, privlačno, pogresno** objasnjenje.”



Tommy Gold – astronom i mislilac sa Cornell-a

# Sta je kosmoloska konstanta?

Pokusaj: Gravitaciona energija vacuuma

## • Problemi:

1. Efekti kvantne gravitacije jos uvek nepoznati
2. Ogromno neslaganje izmedju teorije i eksperimenta

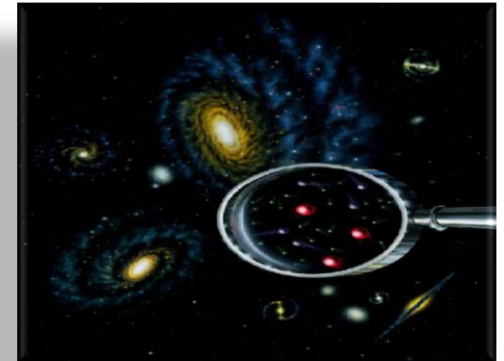
$$\left. \begin{array}{l} \Lambda_{\text{pred}} = (10^{19} \text{ GeV})^4 \\ \Lambda_{\text{obs}} = (10^{-3} \text{ eV})^4 \end{array} \right\} \frac{\Lambda_{\text{pred}}}{\Lambda_{\text{obs}}} = 10^{124}$$



- Problem koincidencije: Zasto je bas **SADA**  $\Omega_{\Lambda} \approx \Omega_{\text{M}}$

# Nas Model

*D. Stojkovic, G. Starkman, R. Matsuo, 2007*



- Mehanizam koji moze da objasni ubrzanje ekspanzije
- **Moze biti testiran u akceleratorima**

# Analogija sa primordijalnom inflacijom

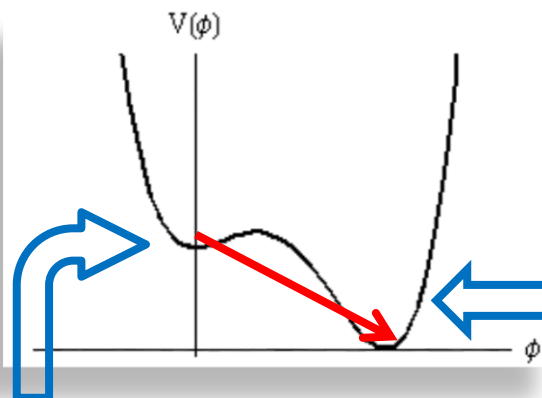
- U svojoj istoriji, Univerzum je vec imao jedan period ubrzane ekspanzije:

**Primordijalna Inflacija !**

- Zamislamo da zivimo u dobu neposredno posle pocetka inflacije kada je Univerzum bio star svega  $t \sim 10^{-35}$  sec
- Vrlo pametan posmatrac bi izracunao da postoji  $M_{\text{GUT}} \sim 10^{15} \text{ GeV}$
- Tada bi bilo logicno zakljuciti da Univerzum prolazi kroz **fazni prelaz** koji uzrokuje **ubranu ekspanziju** Univerzuma

**Vrlo je verovatno da se upravo sada desava nesto slicno!**

# MODEL za narusenje SU(3)<sub>c</sub> simetrije



Lazni Vakum  
Sa ocuvanom simetrijom

Pravi Vakuum  
sa narusenom simetrijom

$$V(\phi) = \frac{\lambda}{4} \phi^2 (\phi - \phi_0)^2 - \frac{\lambda}{2} \epsilon \phi_0 \phi^3$$

Masivno skalarno polje koje nosi **color**

$$m_\phi \approx 1\text{TeV}$$

Energija vakuma skalarnog polja



Kosmoloska konstanta

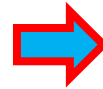
$\epsilon$  je malo  nas Svemir moze biti u laznom vakumu vrlo dugo

# BONUS:

**Model može biti testiran  
u akceleratorima**



**Masivno skalarno polje  
koje nosi color**



**Vrlo interesantna fenomenologija  
u akceleratorima**

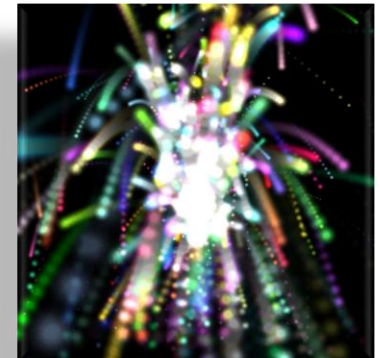
**Nova masivna color singlet stanja:**

1. Vezana stanja cestica  $\Phi$
2. Vezana stanja cestica  $\Phi$  sa kvarkovima



**Hadroni sa frakcionalnim naelektrisanjem!**

**Produkcija hadrona sa frakcionalnim naelektrisanjem  
bila bi stroga indikacija da je naš model korektan**



# Zaključak

- Trenutna situacija u Kosmologiji:
  - Big Bang
  - Inflacija
  - Znamo vrlo precizan sastav Univerzuma  
(4% materija, 23% tamna materija, 73% tamna energija)



- Optimista:  
*“Konacno imamo Standardni Model Kosmologije”*



- Pesimista:  
*“Samo smo dali imena stvarima koje uopste ne razumemo”*

**Hvala**

QuickTime™ and a  
decompressor  
are needed to see this picture.

**KREDIT za animacije, grafove, slike, slajdove....:**

**NASA web site, WMAP web site, COSMOS survey project web site,  
T. McKay, J. Frieman, L. Perivolaropoulos, D. Spergel, Rocky Kolb...**