

98765

9 8 7 6 5

4 3 2 1 ...

9 8 7 6 5

4 3 2 1 ...

L^AT_EX Production Presents ...

Kozmičko pozadinsko zračenje



prva fotografija svemira

Krešimir Kumerički

Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu

Ljetna škola mladih fizičara: “Svjetlost — fizika, tehnologija, kozmologija”
23-29. lipnja 2002., Korčula, Hrvatska

Pregled

1. Veliki prasak — povijest ranog svemira

Pregled

1. Veliki prasak — povijest ranog svemira
2. Nastanak pozadinskog zračenja

Pregled

1. Veliki prasak — povijest ranog svemira
2. Nastanak pozadinskog zračenja
3. Informacije zapisane u pozadinskom zračenju:
 - homogenost ranog svemira
 - brzina gibanja Zemlje kroz svemir
 - klice stvaranja galaktika
 - određivanje geometrije svemira
 - tamna tvar

Povijest ranog svemira

Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak

Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike

Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike
- ◆ Najveći dio tog vremena svemir je smjesa vodika i helija

Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike
- ◆ Najveći dio tog vremena svemir je smjesa vodika i helija
- ◆ Prve tri minute — obilje događanja ključnih za današnji izgled svemira

Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike
- ◆ Najveći dio tog vremena svemir je smjesa vodika i helija
- ◆ Prve tri minute — obilje događanja ključnih za današnji izgled svemira
- ◆ S porastom temperature materija se raspada na sastavne dijelove:

Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike
- ◆ Najveći dio tog vremena svemir je smjesa vodika i helija
- ◆ Prve tri minute — obilje događanja ključnih za današnji izgled svemira
- ◆ S porastom temperature materija se raspada na sastavne dijelove:

atomi

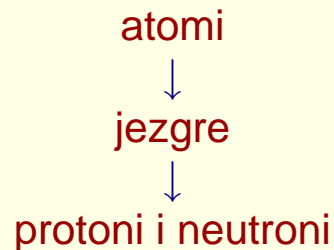
Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike
- ◆ Najveći dio tog vremena svemir je smjesa vodika i helija
- ◆ Prve tri minute — obilje događanja ključnih za današnji izgled svemira
- ◆ S porastom temperature materija se raspada na sastavne dijelove:

atomi
↓
jezgre

Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike
- ◆ Najveći dio tog vremena svemir je smjesa vodika i helija
- ◆ Prve tri minute — obilje događanja ključnih za današnji izgled svemira
- ◆ S porastom temperature materija se raspada na sastavne dijelove:



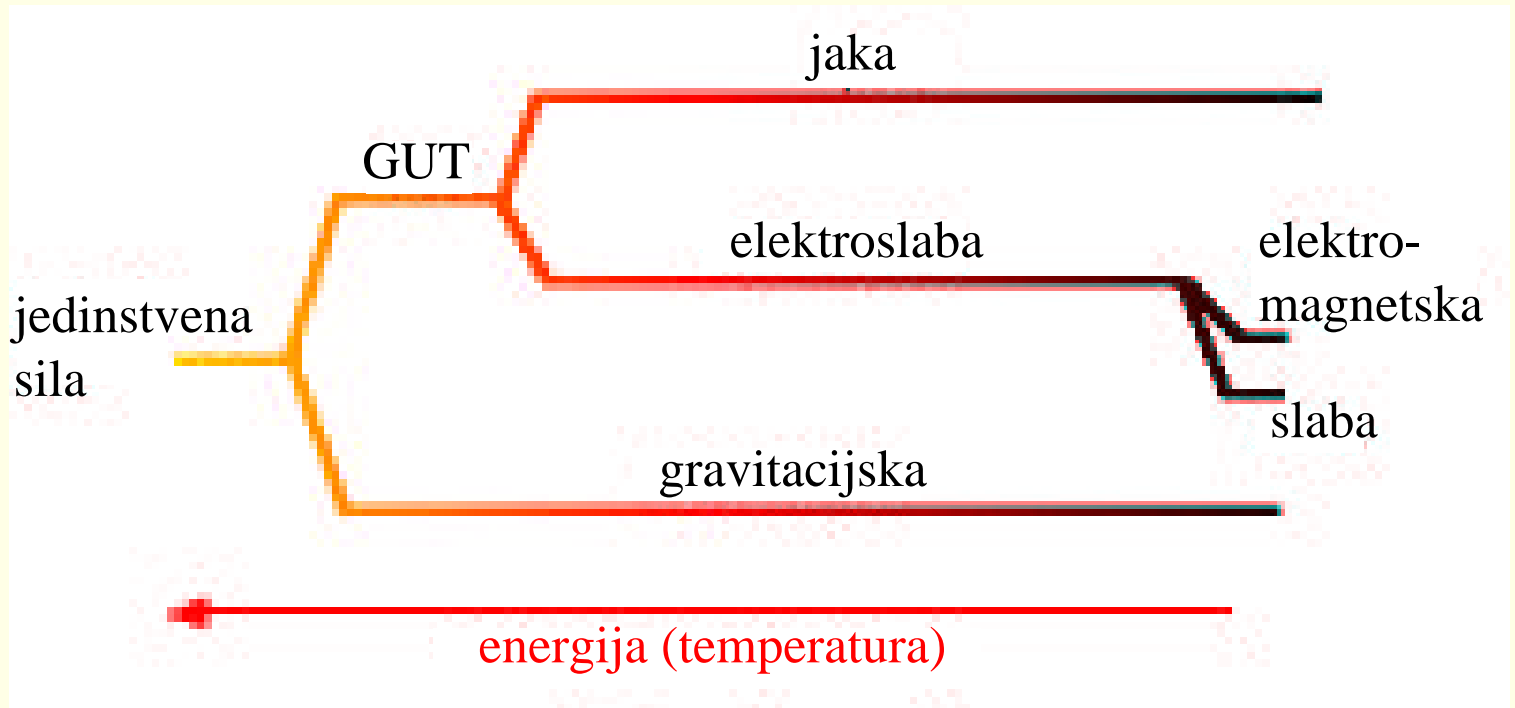
Povijest ranog svemira

- ◆ Prije 10-15 milijardi godina — Veliki prasak
- ◆ Prvih milijuna godina svemir je jednostavni homogeni plin koji se širi i hladi u skladu s poznatim zakonima termodinamike
- ◆ Najveći dio tog vremena svemir je smjesa vodika i helija
- ◆ Prve tri minute — obilje događanja ključnih za današnji izgled svemira
- ◆ S porastom temperature materija se raspada na sastavne dijelove:

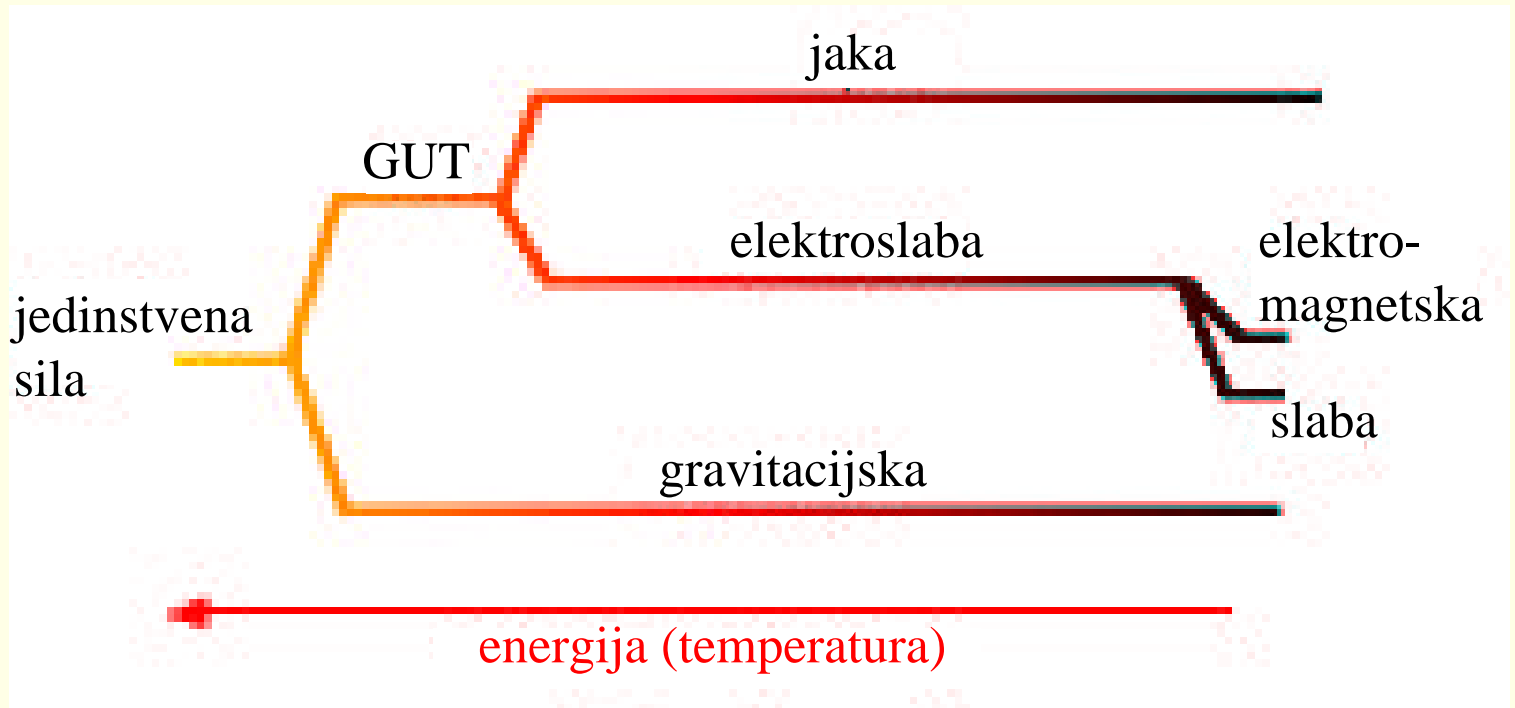


- ◆ S daljnjim porastom temperature stvaraju se egzotične teške i vrlo nestabilne čestice (W i Z bozoni, Higgsovi bozoni, ...)

- ◆ S daljnjim porastom temperature stvaraju se egzotične teške i vrlo nestabilne čestice (W i Z bozoni, Higgsovi bozoni, ...)
- ◆ Dolazi do postupnog ujedinjavanja sila



- ◆ S daljnjim porastom temperature stvaraju se egzotične teške i vrlo nestabilne čestice (*W* i *Z* bozoni, Higgsovi bozoni, ...)
- ◆ Dolazi do postupnog ujedinjavanja sila



- ◆ Prvi djelići sekunde su razmjerno nepoznati (posebno prvih 10^{-43} s.)

Neki zanimljivi događaji u ranom svemiru

Neki zanimljivi događaji u ranom svemiru

- ◆ Stvaranje prostornih nehomogenosti → klice budućih galaktika (stvaranje strukture)

Neki zanimljivi događaji u ranom svemiru

- ◆ Stvaranje prostornih nehomogenosti → klice budućih galaktika (stvaranje strukture)
- ◆ Stvaranje asimetrije između količina materije i antimaterije (bariogeneza) → dominacija materije

Neki zanimljivi događaji u ranom svemiru

- ◆ Stvaranje prostornih nehomogenosti → klice budućih galaktika (stvaranje strukture)
- ◆ Stvaranje asimetrije između količina materije i antimaterije (bariogeneza) → dominacija materije
- ◆ Stvaranje jezgara lakih elemenata (deuterija, helija, litija) (prvotna nukleosinteza)

Neki zanimljivi događaji u ranom svemiru

- ◆ Stvaranje prostornih nehomogenosti → klice budućih galaktika (stvaranje strukture)
- ◆ Stvaranje asimetrije između količina materije i antimaterije (bariogeneza) → dominacija materije
- ◆ Stvaranje jezgara lakih elemenata (deuterija, helija, litija) (prvotna nukleosinteza)
- ◆ Stvaranje kozmičkog pozadinskog zračenja (rekombinacija)

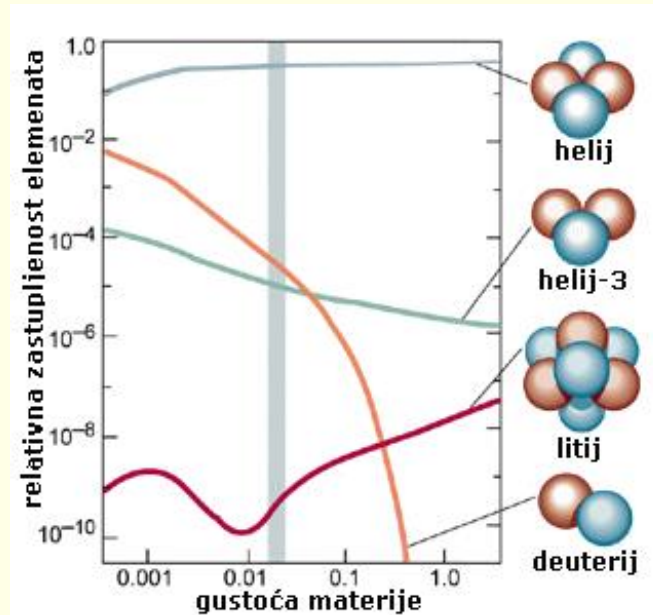
Prvotna nukleosinteza

Prvotna nukleosinteza

- ◆ $t=100$ s: Protoni i neutroni se vežu u jezgre lakih elemenata: deuterija, helija, litija, ...

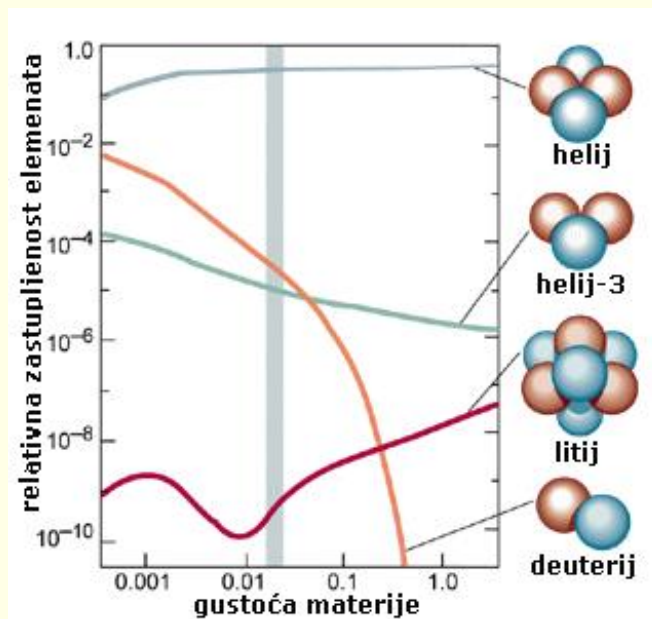
Prvotna nukleosinteza

- ◆ $t=100$ s: Protoni i neutroni se vežu u jezgre lakih elemenata: deuterija, helija, litija, ...



Prvotna nukleosinteza

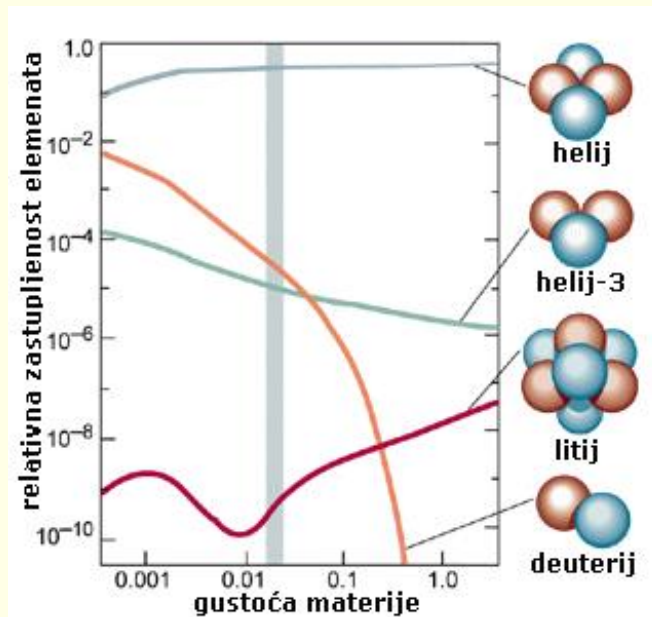
- ◆ $t=100$ s: Protoni i neutroni se vežu u jezgre lakih elemenata: deuterija, helija, litija, ...



- ◆ 1.0 je gustoća **ravnog** svemira — **kritična gustoća** (≈ 1 proton/ m^3)

Prvotna nukleosinteza

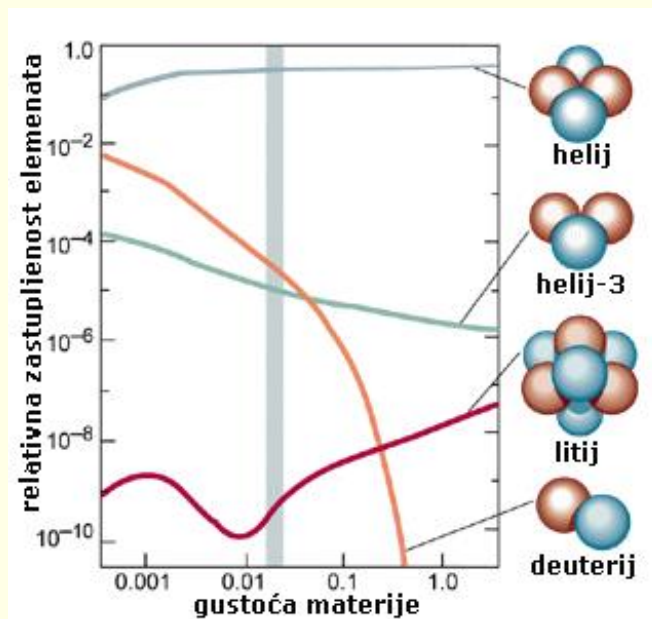
- ◆ $t=100$ s: Protoni i neutroni se vežu u jezgre lakih elemenata: deuterija, helija, litija, ...



- ◆ 1.0 je gustoća **ravnog** svemira — **kritična gustoća** ($\approx 1 \text{ proton/m}^3$)
- ◆ Obične materije ima mnogo manje → **tamna tvar**

Prvotna nukleosinteza

- ◆ $t=100$ s: Protoni i neutroni se vežu u jezgre lakih elemenata: deuterija, helija, litija, ...



- ◆ 1.0 je gustoća **ravnog** svemira — **kritična gustoća** (≈ 1 proton/ m^3)
- ◆ Obične materije ima mnogo manje → **tamna tvar**

[Natrag na zaključak]

Stvaranje kozmičkog pozadinskog zračenja

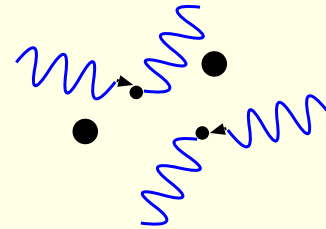
Stvaranje kozmičkog pozadinskog zračenja

◆ $T > 3000 \text{ K}$:

Stvaranje kozmičkog pozadinskog zračenja

◆ $T > 3000 \text{ K}$:

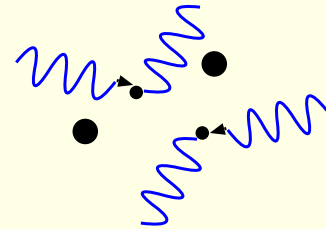
- slobodni elektroni i jezgre (ne mogu se vezati za stalno)
- stalna emisija i apsorpcija zračenja (fotona) razbija atome



Stvaranje kozmičkog pozadinskog zračenja

◆ $T > 3000 \text{ K}$:

- slobodni elektroni i jezgre (ne mogu se vezati za stalno)
- stalna emisija i apsorpcija zračenja (fotona) razbija atome

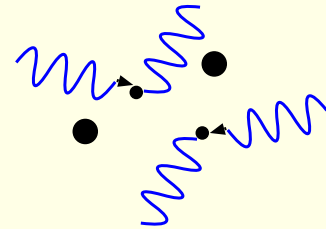


◆ $T < 3000 \text{ K}$:

Stvaranje kozmičkog pozadinskog zračenja

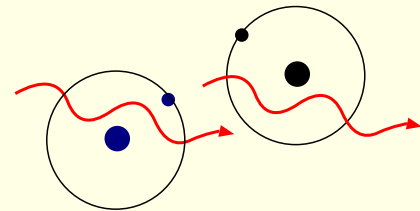
◆ $T > 3000 \text{ K}$:

- slobodni elektroni i jezgre (ne mogu se vezati za stalno)
- stalna emisija i apsorpcija zračenja (fotona) razbija atome



◆ $T < 3000 \text{ K}$:

- Formiranje neutralnih atoma — svemir postaje proziran
- Preostali fotoni se nastavljaju slobodno gibati do danas — tzv. kozmičko pozadinsko zračenje



Otkriće pozadinskog zračenja 1965.

Otkriće pozadinskog zračenja 1965.

- ◆ Usljed ekspanzije svemira fotoni su se s vremenom hladili.

Otkriće pozadinskog zračenja 1965.

- ◆ Usljed ekspanzije svemira fotoni su se s vremenom hladili.
- ◆ Poznavajući nuklearnu fiziku moguće je procijeniti njihovu današnju temperaturu (Gamow '40: 5-10 K)

Otkriće pozadinskog zračenja 1965.

- ◆ Usljed ekspanzije svemira fotoni su se s vremenom hladili.
- ◆ Poznavajući nuklearnu fiziku moguće je procijeniti njihovu današnju temperaturu (Gamow '40: 5-10 K)
- ◆ Penzias i Wilson 1965. otkrivaju pozadinsko zračenje temperature oko 3 K

Otkriće pozadinskog zračenja 1965.

- ◆ Usljed ekspanzije svemira fotoni su se s vremenom hladili.
- ◆ Poznavajući nuklearnu fiziku moguće je procijeniti njihovu današnju temperaturu (Gamow '40: 5-10 K)
- ◆ Penzias i Wilson 1965. otkrivaju pozadinsko zračenje temperature oko 3 K



Wilson i Penzias ispred antene kojom su otkrili kozmičko pozadinsko zračenje. Za svoje su otkriće podijelili Nobelovu nagradu 1978.

Otkriće pozadinskog zračenja 1965.

- ◆ Usljed ekspanzije svemira fotoni su se s vremenom hladili.
- ◆ Poznavajući nuklearnu fiziku moguće je procijeniti njihovu današnju temperaturu (Gamow '40: 5-10 K)
- ◆ Penzias i Wilson 1965. otkrivaju pozadinsko zračenje temperature oko 3 K



Wilson i Penzias ispred antene kojom su otkrili kozmičko pozadinsko zračenje. Za svoje su otkriće podijelili Nobelovu nagradu 1978.

- ◆ Današnje vrijednosti: $T=2.73\text{ K} \rightarrow 411\text{ fotona po cm}^3$.

Moderno proučavanje pozadinskog zračenja

Moderno proučavanje pozadinskog zračenja

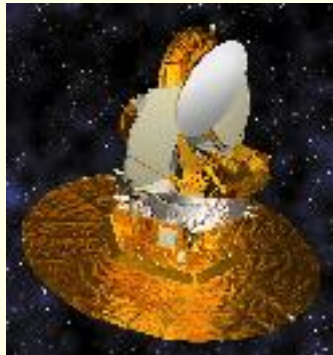
◆ COBE (*CO*smic *B*ackground *E*xplorer) satelit '90

Moderno proučavanje pozadinskog zračenja

- ◆ COBE (*COsmic Background Explorer*) satelit '90
- ◆ BOOMERANG (*Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics*) i MAXIMA atmosferski baloni 2000-2001.

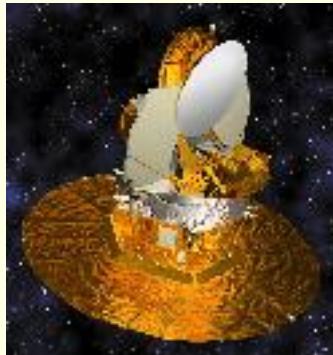
Moderno proučavanje pozadinskog zračenja

- ◆ COBE (*COsmic Background Explorer*) satelit '90
- ◆ BOOMERANG (*Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics*) i MAXIMA atmosferski baloni 2000-2001.
- ◆ MAP satelit (NASA) — lansiran 2001.



Moderno proučavanje pozadinskog zračenja

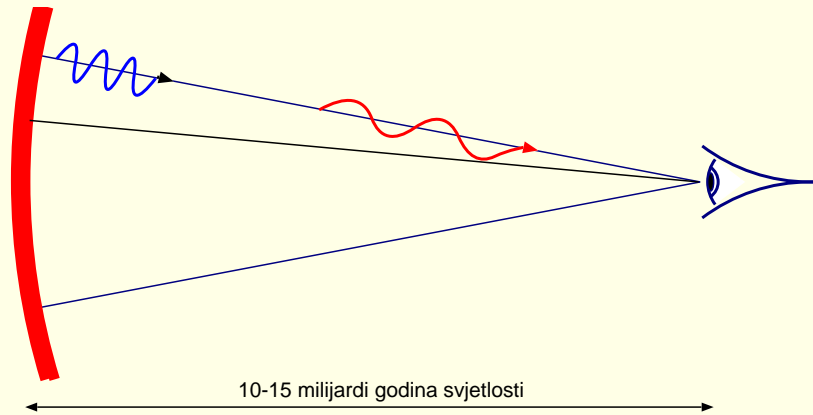
- ◆ COBE (*COsmic Background Explorer*) satelit '90
- ◆ BOOMERANG (*Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics*) i MAXIMA atmosferski baloni 2000-2001.
- ◆ MAP satelit (NASA) — lansiran 2001.



- ◆ Planck satelit (ESA) — lansiranje se očekuje 2007.

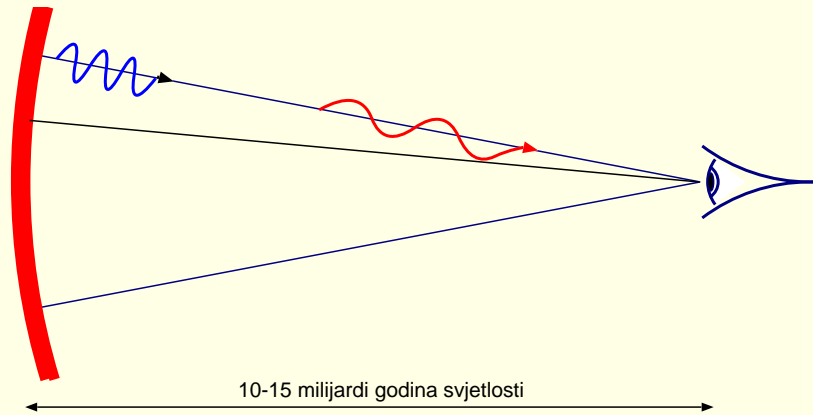
Što vidimo na prvoj fotografiji svemira?

Što vidimo na prvoj fotografiji svemira?



- ◆ “Boje” su pomaknute prema mikrovalnom dijelu spektra

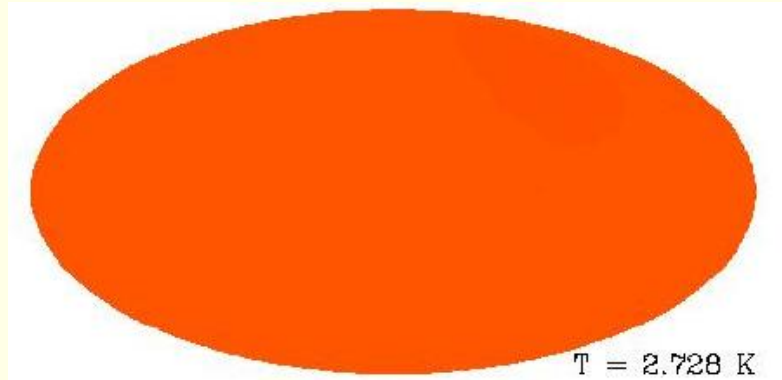
Što vidimo na prvoj fotografiji svemira?



- ◆ “Boje” su pomaknute prema **mikrovalnom** dijelu spektra
- ◆ Fotografija prikazuje izgled svemira kad je bio star svega 300 000 godina.

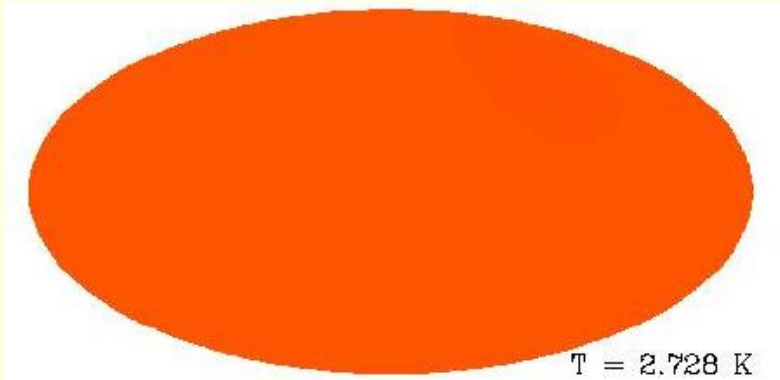
Informacije zapisane u pozadinskom zračenju

Informacije zapisane u pozadinskom zračenju



Fotografija u mikrovalnom dijelu spektra.
(Crvena boja je lažna!)

Informacije zapisane u pozadinskom zračenju

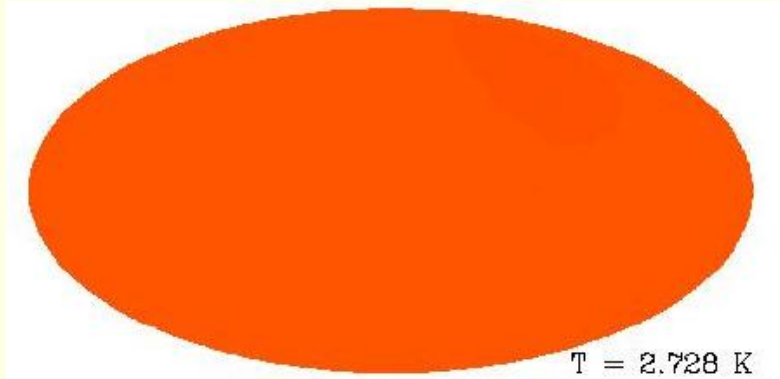


Fotografija u mikrovalnom dijelu spektra.
(Crvena boja je lažna!)



Fotografija u vidljivom dijelu spektra.
Današnji svemir je izrazito **nehomogen**.

Informacije zapisane u pozadinskom zračenju



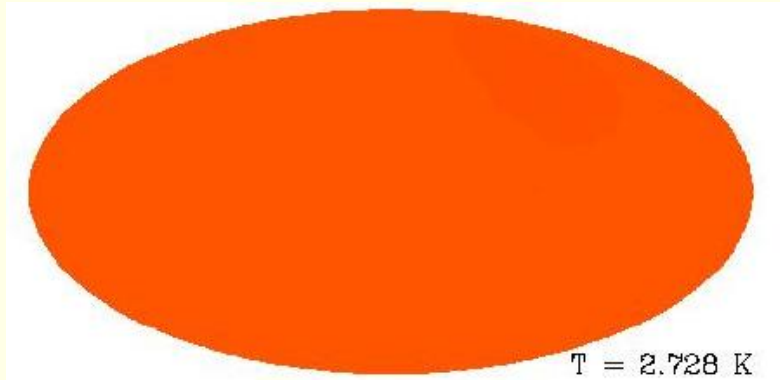
Fotografija u mikrovalnom dijelu spektra.
(Crvena boja je lažna!)



Fotografija u vidljivom dijelu spektra.
Današnji svemir je izrazito **nehomogen**.

- ◆ Svemir je u vrijeme emisije pozadinskog zračenja bio izvanredno **homogen**

Informacije zapisane u pozadinskom zračenju



Fotografija u mikrovalnom dijelu spektra.
(Crvena boja je lažna!)



Fotografija u vidljivom dijelu spektra.
Današnji svemir je izrazito **nehomogen**.

- ◆ Svemir je u vrijeme emisije pozadinskog zračenja bio izvanredno **homogen**
- ◆ Kako je došlo do zgušnjavanja materije u današnje galaktike?

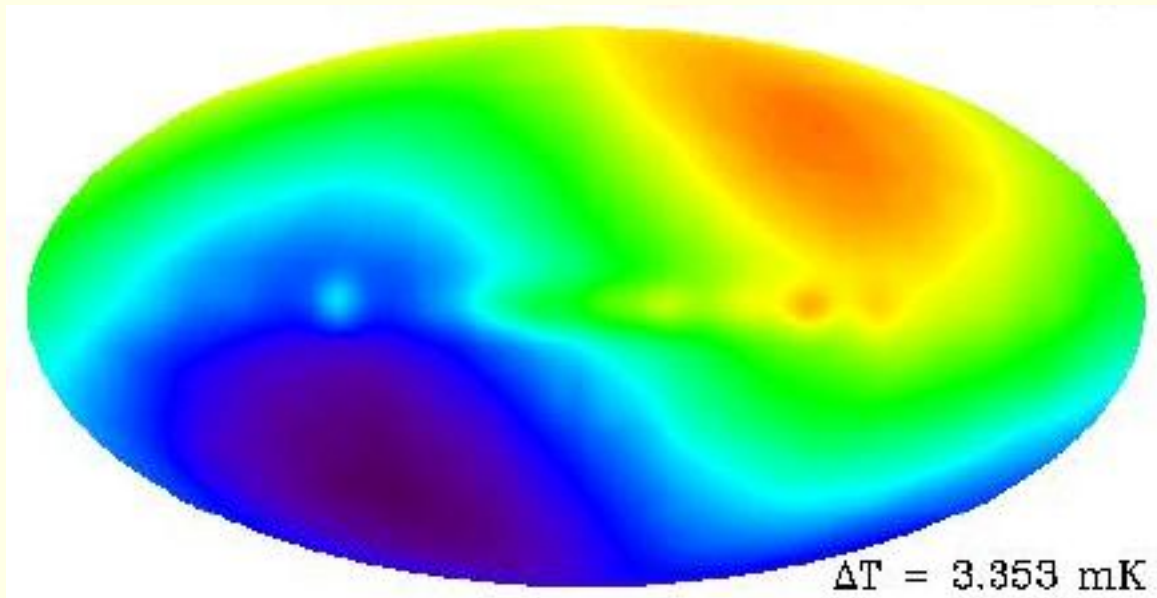
Brzina gibanja Zemlje kroz svemir

Brzina gibanja Zemlje kroz svemir

- ◆ Dopplerov učinak zbog gibanja Zemlje → valna duljina zračenja na kojeg naličemo se prividno smanjuje → temperatura zračenja se mijenja

Brzina gibanja Zemlje kroz svemir

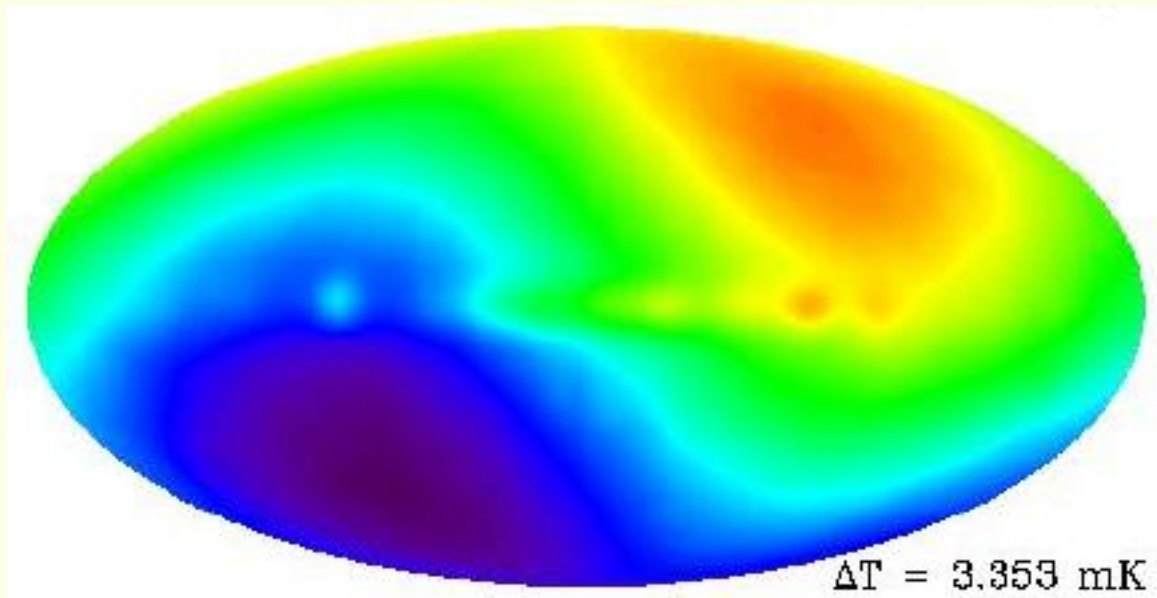
- ◆ **Dopplerov učinak** zbog gibanja Zemlje → valna duljina zračenja na kojeg naliječemo se prividno smanjuje → temperatura zračenja se mijenja



Boje označavaju razliku temperature prema srednjoj vrijednosti.

Brzina gibanja Zemlje kroz svemir

- ◆ Dopplerov učinak zbog gibanja Zemlje → valna duljina zračenja na kojeg naliječemo se prividno smanjuje → temperatura zračenja se mijenja

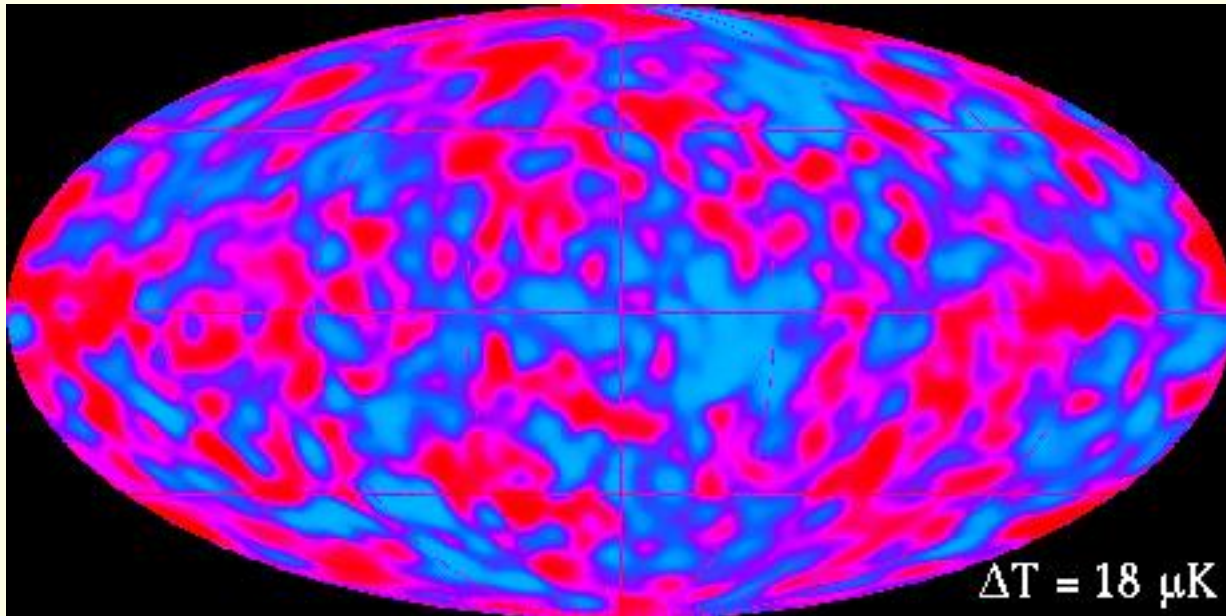


Boje označavaju razliku temperature prema srednjoj vrijednosti.

- ◆ → brzina kretanja Zemlje kroz svemir $v = 371 \pm 1 \text{ km/s}$

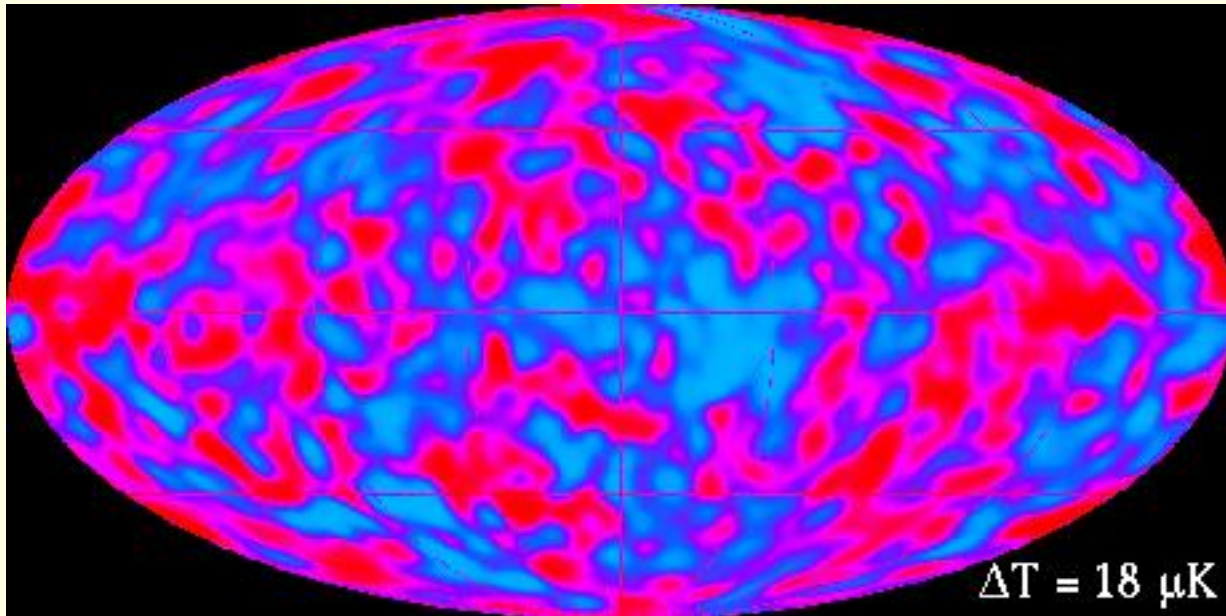
Klice stvaranja galaktika

Klice stvaranja galaktika



Slika nakon eliminiranja učinaka zbog gibanja zemlje

Klice stvaranja galaktika



Slika nakon eliminiranja učinaka zbog gibanja zemlje

- ◆ Iz ovih nejednolikosti razvile su se u slijedećih nekoliko milijardi godina galaktike i nakupine galaktika

Svemir kao povećalo

Svemir kao povećalo

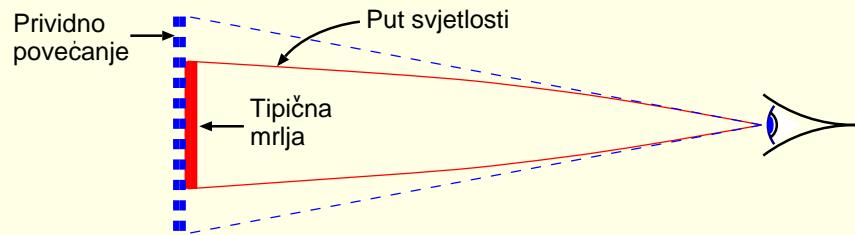
◆ Einstein: masa zakrivljuje prostor → gravitacija

Svemir kao povećalo

- ◆ Einstein: masa zakrivljuje prostor → gravitacija
- ◆ Zakrivljeni prostor deformira fotografiju:

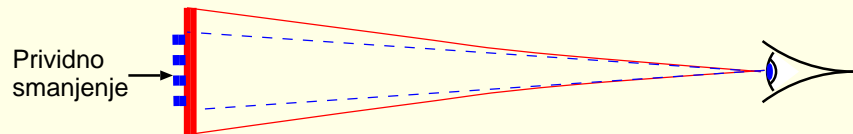
Svemir kao povećalo

- ◆ Einstein: masa **zakrivljuje** prostor → gravitacija
- ◆ Zakrivljeni prostor deformira fotografiju:



(a) pozitivno zakrivljeni svemir

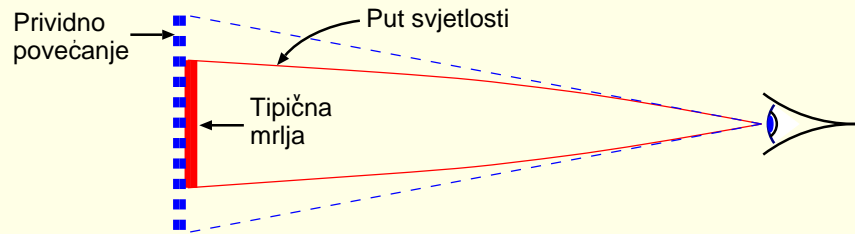
= realno = prividno



(b) negativno zakrivljeni svemir

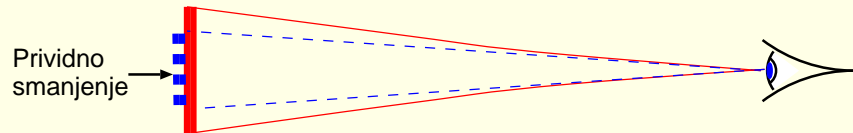
Svemir kao povećalo

- ◆ Einstein: masa **zakrivljuje** prostor → gravitacija
- ◆ Zakrivljeni prostor deformira fotografiju:



(a) pozitivno zakrivljeni svemir

= realno = prividno



(b) negativno zakrivljeni svemir

- ◆ Čitav svemir djeluje kao povećalo/smanjivalo

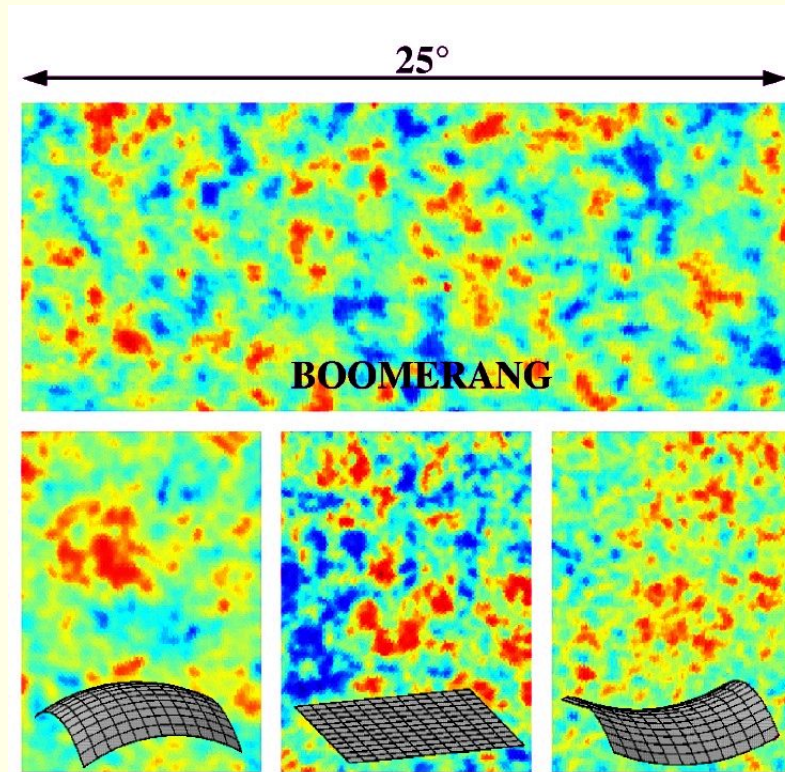
Određivanje geometrije svemira

Određivanje geometrije svemira

- ◆ Mjerenjem veličine “mrlji” moguće je odrediti zakrivljenost svemira.

Određivanje geometrije svemira

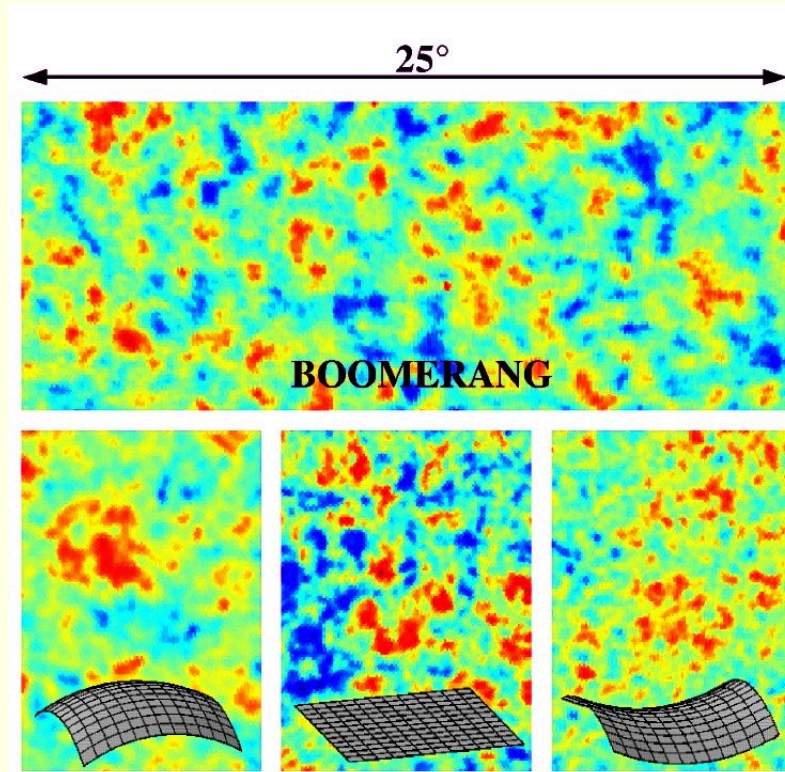
- ◆ Mjerenjem veličine “mrlji” moguće je odrediti zakrivljenost svemira.



Realna slika i simulacije za različite zakrivljenosti svemira.

Određivanje geometrije svemira

- ◆ Mjerenjem veličine “mrlji” moguće je odrediti zakrivljenost svemira.



Realna slika i simulacije za različite zakrivljenosti svemira.

- ◆ → Svemir je približno **ravne** geometrije.

Tamna tvar

Tamna tvar

- ◆ Ravna geometrija znači da je gustoća mase u svemiru približno jednaka kritičnoj gustoći od $\approx 1 \text{ proton/m}^3$

Tamna tvar

- ◆ Ravna geometrija znači da je gustoća mase u svemiru približno jednaka kritičnoj gustoći od $\approx 1 \text{ proton/m}^3$
- ◆ Vidjeli smo da je gustoća obične materije maksimalno 10-ak posto ove kritične
⇒ preostalo je tamna tvar

Tamna tvar

- ◆ Ravna geometrija znači da je gustoća mase u svemiru približno jednaka kritičnoj gustoći od ≈ 1 proton/m³
- ◆ Vidjeli smo da je gustoća obične materije maksimalno 10-ak posto ove kritične
⇒ preostalo je tamna tvar
- ◆ Veći dio tamne tvari je egzotične naravi: WIMPovi, axioni, ...

Tamna tvar

- ◆ Ravna geometrija znači da je gustoća mase u svemiru približno jednaka kritičnoj gustoći od $\approx 1 \text{ proton/m}^3$
- ◆ Vidjeli smo da je gustoća obične materije maksimalno 10-ak posto ove kritične \Rightarrow preostalo je **tamna tvar**
- ◆ Veći dio tamne tvari je egzotične naravi: **WIMPovi, axioni, ...**
- ◆ 70% **tamne energije** \Rightarrow svemir će se zauvijek širiti

Tamna tvar

- ◆ Ravna geometrija znači da je gustoća mase u svemiru približno jednaka kritičnoj gustoći od $\approx 1 \text{ proton/m}^3$
- ◆ Vidjeli smo da je gustoća obične materije maksimalno 10-ak posto ove kritične \Rightarrow preostalo je **tamna tvar**
- ◆ Veći dio tamne tvari je egzotične naravi: **WIMPovi, axioni, ...**
- ◆ 70% **tamne energije** \Rightarrow svemir će se zauvijek širiti
- ◆ Buduća mjerenja pozadinskog zračenja će omogućiti precizno određivanje:
 - udjela obične tvari, tamne tvari i tamne energije u ukupnom sastavu svemira
 - geometrije i starosti svemira
 - budućnosti svemira

Tamna tvar

- ◆ Ravna geometrija znači da je gustoća mase u svemiru približno jednaka kritičnoj gustoći od $\approx 1 \text{ proton/m}^3$
- ◆ Vidjeli smo da je gustoća obične materije maksimalno 10-ak posto ove kritične \Rightarrow preostalo je **tamna tvar**
- ◆ Veći dio tamne tvari je egzotične naravi: **WIMPovi, axioni, ...**
- ◆ 70% **tamne energije** \Rightarrow svemir će se zauvijek širiti
- ◆ Buduća mjerenja pozadinskog zračenja će omogućiti precizno određivanje:
 - udjela obične tvari, tamne tvari i tamne energije u ukupnom sastavu svemira
 - geometrije i starosti svemira
 - budućnosti svemira

Dodatak: Dopplerov učinak

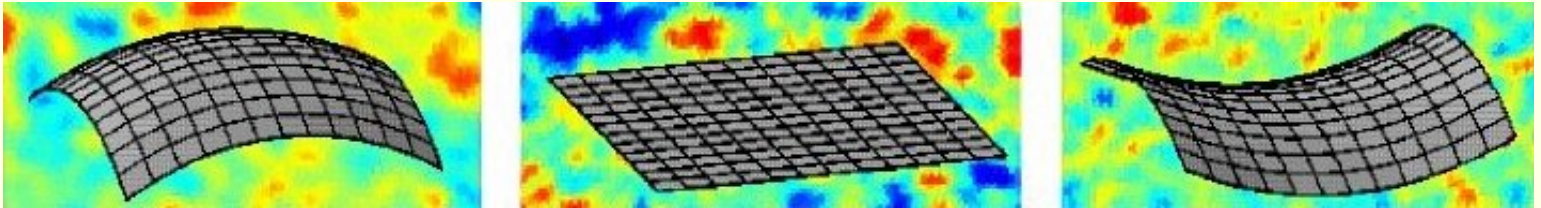
Zvučni Dopplerov učinak



Svjetlosni Dopplerov učinak



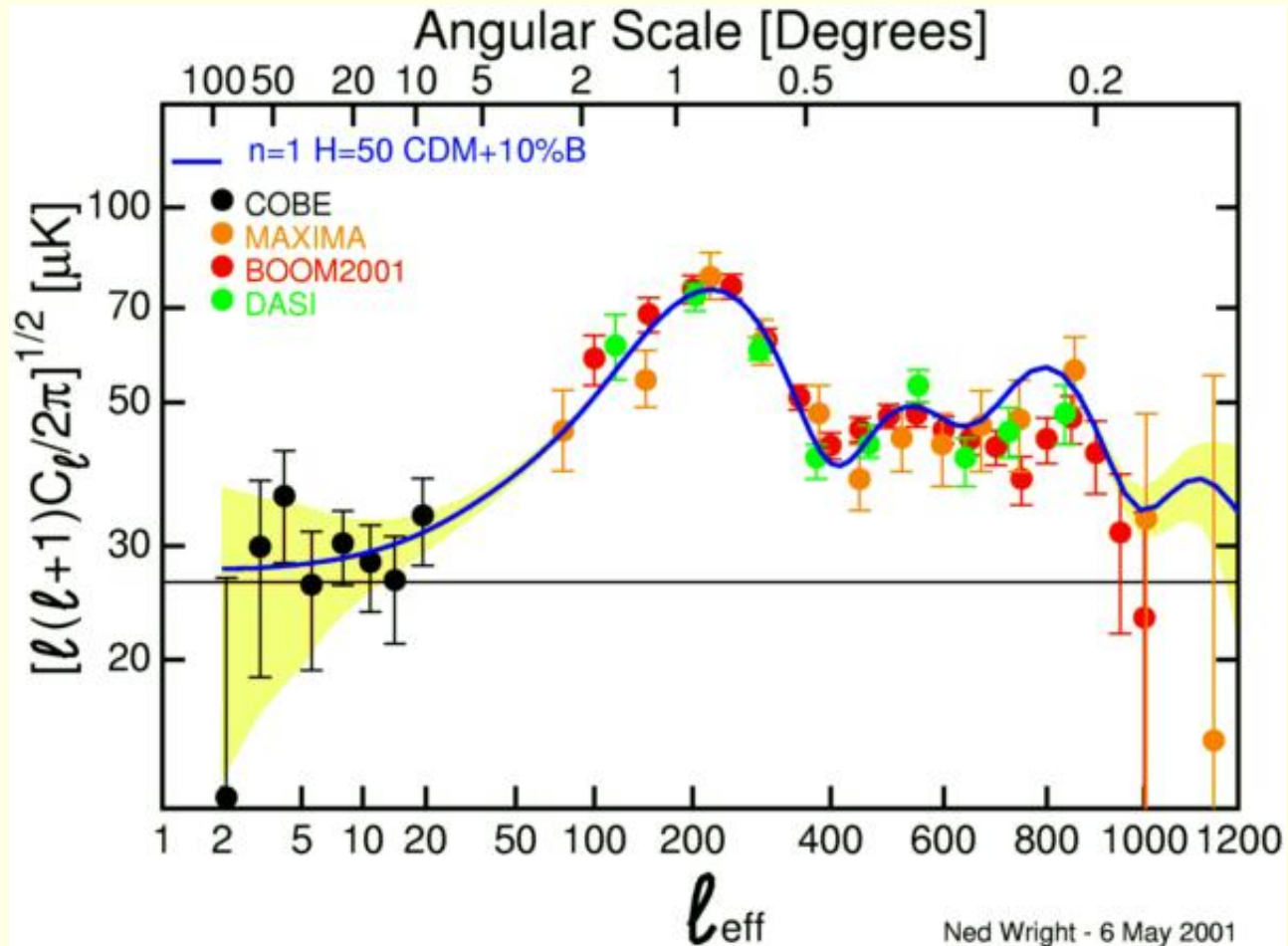
Dodatak: Zakrivljene geometrije



Pozitivno zakrivljeni, ravni i negativno zakrivljeni prostor (Za gustoću mase veću, jednaku ili manju od kritične)

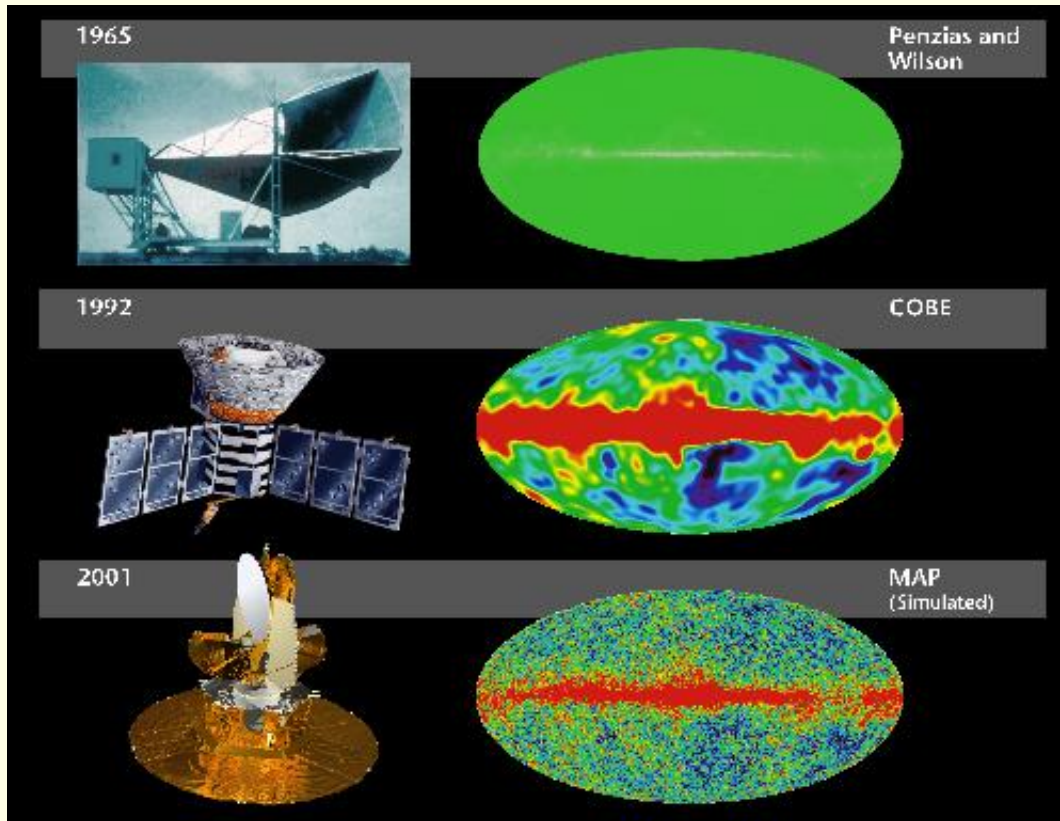
[\[Natrag na BBN\]](#) [\[Natrag na povećalo\]](#)

Dodatak: Spektar anizotropija



Rezultati dosadašnjih eksperimenata

Dodatak: Usporedba eksperimenata



Usporedba mogućnosti eksperimenata

[Natrag na eksperimente]

Hiperindex

- Pregled
- Povijest ranog svemira
- Ujedinjavanje sila
- Događaji u ranom svemiru
- Prvotna nukleosinteza
- Rekombinacija
- Otkriće CMBR-a
- CMBR eksperimenti
- Pogled na last-scattering surface
- COBE1 — $T=2.73$ K
- COBE2 — dipolna anizotropija
- COBE3 — anizotropije
- Svemir kao povećalo
- BOOMERANG - zakrivljenost
- Tamna tvar - zaključak

Dodaci: Doplerov efekt, Geometrije, Eksperimentalni spektar, Usporedba CMBR eksperimenata