

Ly- α prehod v spektrih oddaljenih kvazarjev

Vid Iršič

Mentor: dr. Anže Slosar

FMF, Astrodebata - 11. Maj, 2010

Pregled

- 1 Uvod
- 2 Goščava Lyman- α
- 3 Opazovanja
- 4 Kozmologija in Ly- α
 - Gunn-Peterson efekt
 - Numerične simulacije
 - Nevtrini
 - Reionizacija
 - Inflacij
 - BAO
- 5 Zaključek

Uvod

- kvazar: visoko energetska, oddaljena galaksija z aktivnimi galaktičnim jedrom ($10^{12} L_\odot$)

Uvod

- kvazar: visoko energetska, oddaljena galaksija z aktivnimi galaktičnim jedrom ($10^{12} L_\odot$)
- V vesolju absorbira medzvezdni plin

Uvod

- kvazar: visoko energetska, oddaljena galaksija z aktivnimi galaktičnim jedrom ($10^{12} L_{\odot}$)
- V vesolju absorbira medzvezdni plin
- vodikov atom: prehod iz $n = 1$ v višja stanja \rightarrow Lymanova serija

Uvod

- kvazar: visoko energetska, oddaljena galaksija z aktivnimi galaktičnim jedrom ($10^{12} L_\odot$)
- V vesolju absorbira medzvezdni plin
- vodikov atom: prehod iz $n = 1$ v višja stanja \rightarrow Lymanova serija
- Prehod iz $n = 1$ v $n = 2$: Lyman- α črta (121.6 nm) \leftarrow emisijska črta kvazarjev

Uvod

- kvazar: visoko energetska, oddaljena galaksija z aktivnimi galaktičnim jedrom ($10^{12} L_\odot$)
- V vesolju absorbira medzvezdni plin
- vodikov atom: prehod iz $n = 1$ v višja stanja \rightarrow Lymanova serija
- Prehod iz $n = 1$ v $n = 2$: Lyman- α črta (121.6 nm) \leftarrow emisijska črta kvazarjev
- količina absorbirane svetlobe = optična globina (τ) \propto število atomov vzdolž poti \times sipalni presek

Goščava Lyman- α

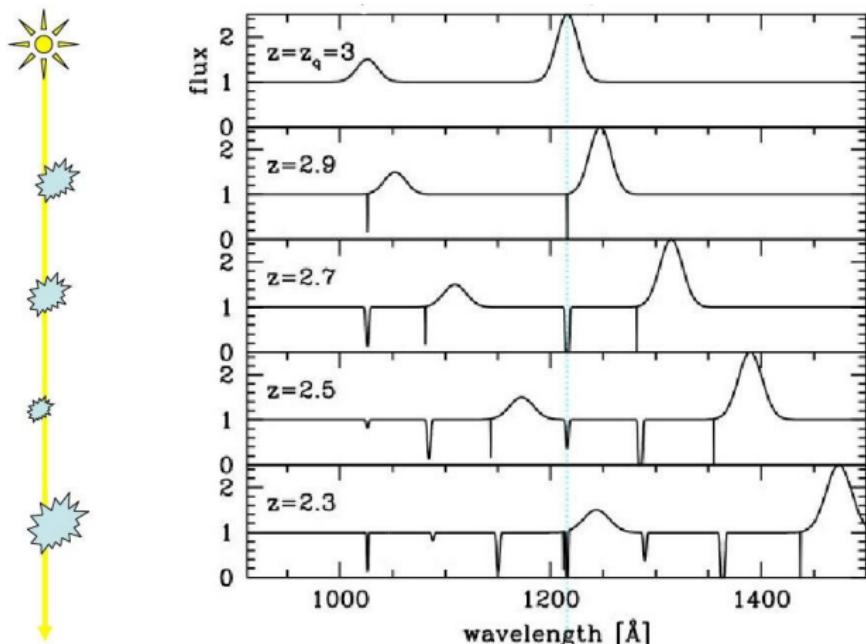
- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$

Goščava Lyman- α

- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$
- Oblaki plina imajo manjši z , kot kvazar. Absorbcijo zaradi oblaka plina pri z_{gas} opazimo v spektru pri

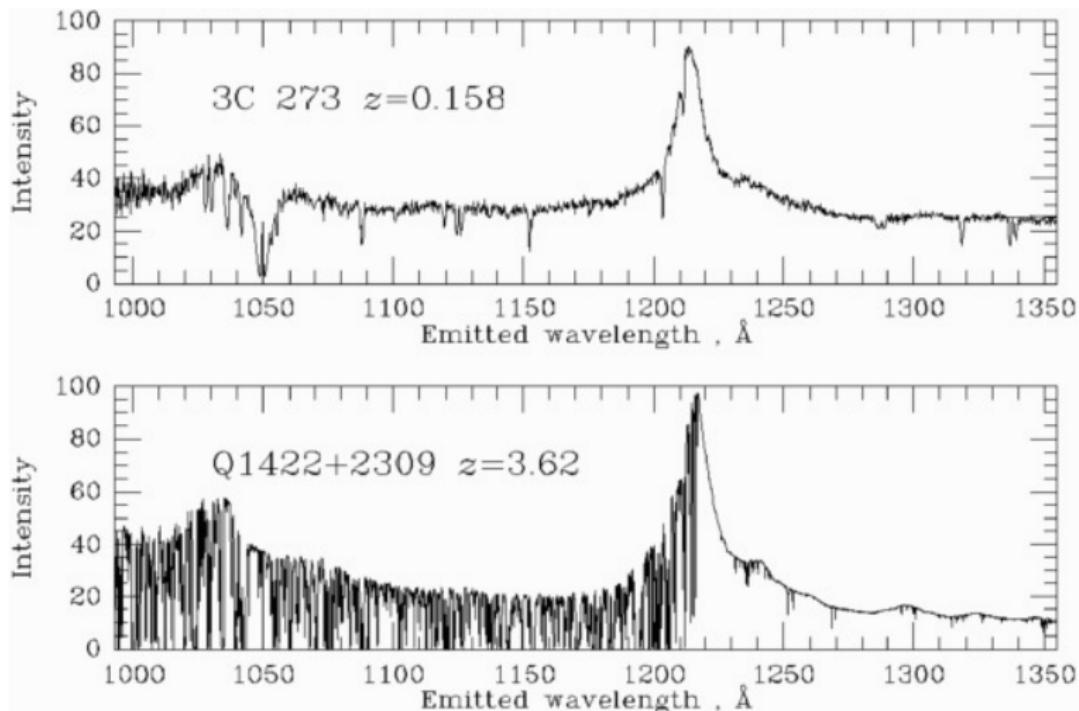
$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\alpha}(1 + z_{\text{gas}}), \quad \lambda_{\alpha} = 121.6 \text{ nm}$$

Goščava Lyman- α



Slika: http://cosmology.lbl.gov/talks/McDonald_09.pdf (21.3.2010)

Goščava Lyman- α



Slika: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/Lyman-alpha-forest.html> (19.3.2010)

Goščava Lyman- α

- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$
- Oblaki plina imajo manjši z , kot kvazar. Absorbcijo zaradi oblaka plina pri z_{gas} opazimo v spektru pri

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\alpha}(1 + z_{\text{gas}}), \quad \lambda_{\alpha} = 121.6 \text{ nm}$$

- Veliko število absorpcijskih črt (velika številska gostota nevtralnega vodika) \rightarrow goščava Ly- α

Goščava Lyman- α

- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$
- Oblaki plina imajo manjši z , kot kvazar. Absorbcijo zaradi oblaka plina pri z_{gas} opazimo v spektru pri

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\alpha}(1 + z_{\text{gas}}), \quad \lambda_{\alpha} = 121.6 \text{ nm}$$

- Veliko število absorpcijskih črt (velika številska gostota nevtralnega vodika) \rightarrow goščava Ly- α
- Lymanova limita ($n_H \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, 91.2 nm, $n = 1 \rightarrow \infty$)

Goščava Lyman- α

- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$
- Oblaki plina imajo manjši z , kot kvazar. Absorbcijo zaradi oblaka plina pri z_{gas} opazimo v spektru pri

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\alpha}(1 + z_{\text{gas}}), \quad \lambda_{\alpha} = 121.6 \text{ nm}$$

- Veliko število absorpcijskih črt (velika številska gostota nevtralnega vodika) \rightarrow goščava Ly- α
- Lymanova limita ($n_H \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, 91.2 nm, $n = 1 \rightarrow \infty$)
- Dušena absorbcija ($n_H > 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, končen življenski čas Ly- α prehoda)

Goščava Lyman- α

- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$
- Oblaki plina imajo manjši z , kot kvazar. Absorbcijo zaradi oblaka plina pri z_{gas} opazimo v spektru pri

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\alpha}(1 + z_{\text{gas}}), \quad \lambda_{\alpha} = 121.6 \text{ nm}$$

- Veliko število absorpcijskih črt (velika številska gostota nevtralnega vodika) \rightarrow goščava Ly- α
- Lymanova limita ($n_H \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, 91.2 nm, $n = 1 \rightarrow \infty$)
- Dušena absorbcija ($n_H > 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, končen življenski čas Ly- α prehoda)
- Črte kovin ($n_H > 10^{14.5} \text{ cm}^{-2}$, trikrat ionizirana C in Si) \leftarrow kovinski sistemi (galaksije)

Goščava Lyman- α

- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$
- Oblaki plina imajo manjši z , kot kvazar. Absorbcijo zaradi oblaka plina pri z_{gas} opazimo v spektru pri

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\alpha}(1 + z_{\text{gas}}), \quad \lambda_{\alpha} = 121.6 \text{ nm}$$

- Veliko število absorpcijskih črt (velika številska gostota nevtralnega vodika) \rightarrow goščava Ly- α
- Lymanova limita ($n_H \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, 91.2 nm, $n = 1 \rightarrow \infty$)
- Dušena absorbcija ($n_H > 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, končen življenski čas Ly- α prehoda)
- Črte kovin ($n_H > 10^{14.5} \text{ cm}^{-2}$, trikrat ionizirana C in Si) \leftarrow kovinski sistemi (galaksije)
- Nesaturirani sistemi \rightarrow nov razred objektov: medgalaktični plin (IGM)

Goščava Lyman- α

- Dopplerjev rdeči premik zaradi širjenja vesolja: $1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}}$
- Oblaki plina imajo manjši z , kot kvazar. Absorbcijo zaradi oblaka plina pri z_{gas} opazimo v spektru pri

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\alpha}(1 + z_{\text{gas}}), \quad \lambda_{\alpha} = 121.6 \text{ nm}$$

- Veliko število absorpcijskih črt (velika številska gostota nevtralnega vodika) \rightarrow goščava Ly- α
- Lymanova limita ($n_H \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, 91.2 nm, $n = 1 \rightarrow \infty$)
- Dušena absorbcija ($n_H > 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, končen življenski čas Ly- α prehoda)
- Črte kovin ($n_H > 10^{14.5} \text{ cm}^{-2}$, trikrat ionizirana C in Si) \leftarrow kovinski sistemi (galaksije)
- Nesaturirani sistemi \rightarrow nov razred objektov: medgalaktični plin (IGM)
- Diskretni oblaki \rightarrow Danes: zvezno se spremenljajoča se gostota

Opazovanja

- Dva omejujoča faktorja: resolucija spektra in razmerje signala proti šumu

Opazovanja

- Dva omejujoča faktorja: resolucija spektra in razmerje signala proti šumu
- Z uporabo CCD in spektrografov tipa échelle (večkratna difrakcija) → večja resolucija

Opazovanja

- Dva omejujoča faktorja: resolucija spektra in razmerje signala proti šumu
- Z uporabo CCD in spektrografov tipa échelle (večkratna difrakcija) → večja resolucija
- Dolgi opazovalni časi → boljši signal proti šumu

Opazovanja

- Dva omejujoča faktorja: resolucija spektra in razmerje signala proti šumu
- Z uporabo CCD in spektrografov tipa échelle (večkratna difrakcija) → večja resolucija
- Dolgi opazovalni časi → boljši signal proti šumu
- Danes: najbolj omejujoč faktor ← število ljudi, ki obdeluje podatke

Opazovanja

- Dva omejujoča faktorja: resolucija spektra in razmerje signala proti šumu
- Z uporabo CCD in spektrografov tipa échelle (večkratna difrakcija) → večja resolucija
- Dolgi opazovalni časi → boljši signal proti šumu
- Danes: najbolj omejujoč faktor ← število ljudi, ki obdeluje podatke
- nizko ločljiva spektroskopija → povprečna absorbcijska linija

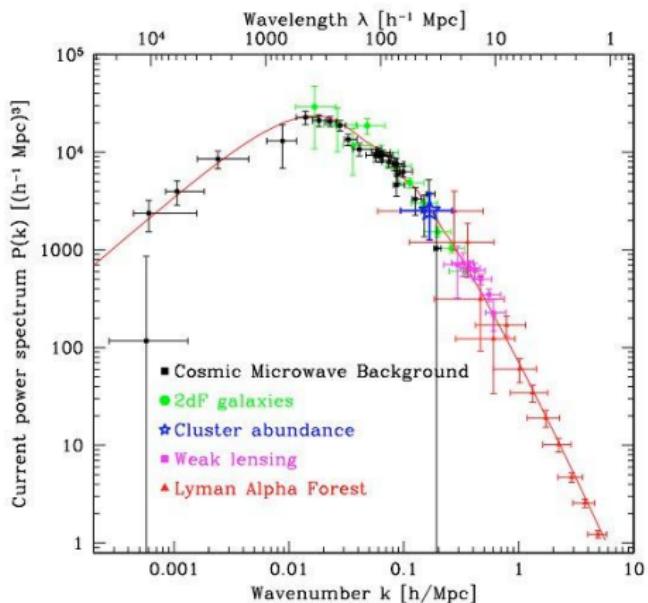
Opazovanja

- Dva omejujoča faktorja: resolucija spektra in razmerje signala proti šumu
- Z uporabo CCD in spektrografov tipa échelle (večkratna difrakcija) → večja resolucija
- Dolgi opazovalni časi → boljši signal proti šumu
- Danes: najbolj omejujoč faktor ← število ljudi, ki obdeluje podatke
- nizko ločljiva spektroskopija → povprečna absorbcijska linija
- visoko ločljiva spektroskopija → Voigtov profil črt

Kozmologija in Ly- α

- Statične lastnosti → spekter moči fluktuacij gostote $P(k)$ na majhnih skalah

Kozmologija in Ly- α



Slika: Max Tegmark, http://cosmology.lbl.gov/talks/McDonald_09.pdf (21.3.2010)

Kozmologija in Ly- α

- Statične lastnosti → spekter moči fluktuacij gostote $P(k)$ na majhnih skalah
- Diskretne črte v spektru → plin v medgalaktičnem prostoru ni povsod nevtralen

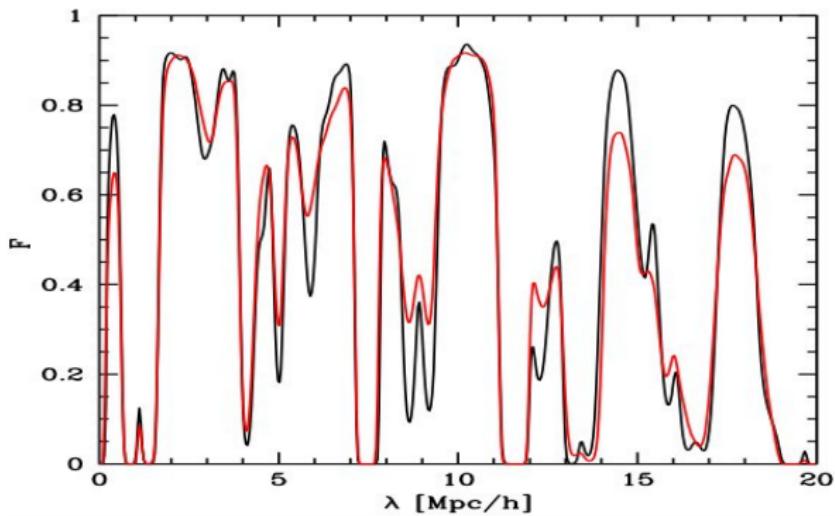
Kozmologija in Ly- α

- Statične lastnosti → spekter moči fluktacij gostote $P(k)$ na majhnih skalah
- Diskretne črte v spektru → plin v medgalaktičnem prostoru ni povsod nevtralen
- Formacija struktur na majhnih skalah v zgodnejšem vesolju (filamenti, zidovi in praznine)

Kozmologija in Ly- α

- Statične lastnosti → spekter moči fluktacij gostote $P(k)$ na majhnih skalah
- Diskretne črte v spektru → plin v medgalaktičnem prostoru ni povsod nevtralen
- Formacija struktur na majhnih skalah v zgodnejšem vesolju (filamenti, zidovi in praznine)
- Temna snov (vroča/hladna) → zabriše podrobnosti na majhnih skalah

Kozmologija in Ly- α



Slika: http://cosmology.lbl.gov/talks/McDonald_09.pdf (21.3.2010)

Kozmologija in Ly- α

- Statične lastnosti → spekter moči fluktacij gostote $P(k)$ na majhnih skalah
- Diskretne črte v spektru → plin v medgalaktičnem prostoru ni povsod nevtralen
- Formacija struktur na majhnih skalah v zgodnejšem vesolju (filamenti, zidovi in praznine)
- Temna snov (vroča/hladna) → zabriše podrobnosti na majhnih skalah
- Delež devterija v vesolju

Gunn-Peterson efekt

- Dlje nazaj v vesolje ko gremo → večji delež gostote barionov v obliki medgalaktičnega plina

Gunn-Peterson efekt

- Dlje nazaj v vesolje ko gremo → večji delež gostote barionov v obliki medgalaktičnega plina
- Absorpcijski sipalni presek Ly- α dovolj velik → popolna absorbacija vse svetlobe ozadja

Gunn-Peterson efekt

- Dlje nazaj v vesolje ko gremo → večji delež gostote barionov v obliki medgalaktičnega plina
- Absorpcijski sipalni presek Ly- α dovolj velik → popolna absorpcija vse svetlobe ozadja
- Ne bi imeli diskretne Ly- α goščave → konstatno znižan spekter ← Gunn-Peterson efekt

Gunn-Peterson efekt

- Dlje nazaj v vesolje ko gremo → večji delež gostote barionov v obliki medgalaktičnega plina
- Absorpcijski sipalni presek Ly- α dovolj velik → popolna absorpcija vse svetlobe ozadja
- Ne bi imeli diskretne Ly- α goščave → konstatno znižan spekter ← Gunn-Peterson efekt
- Tega ne opazimo: (a) ostalo le še malo vodika v medgalaktičnem prostoru ali (b) večina vodika je ioniziranega

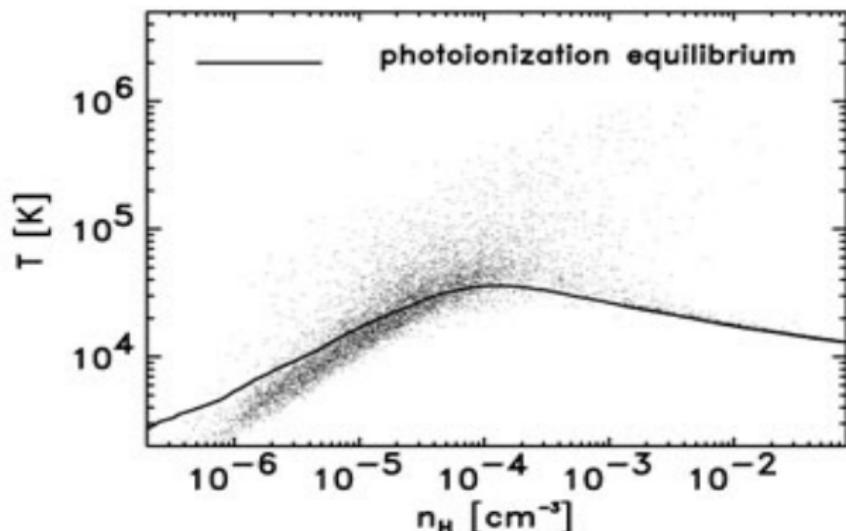
Gunn-Peterson efekt

- Dlje nazaj v vesolje ko gremo → večji delež gostote barionov v obliki medgalaktičnega plina
- Absorpcijski sipalni presek Ly- α dovolj velik → popolna absorpcija vse svetlobe ozadja
- Ne bi imeli diskretne Ly- α goščave → konstatno znižan spekter ← Gunn-Peterson efekt
- Tega ne opazimo: (a) ostalo le še malo vodika v medgalaktičnem prostoru ali (b) večina vodika je ioniziranega
- Fotoionizirajoče ravnovesje: rekombinacija p in e^- uravnoveša ionizacijo UV sevanja ozadja

Gunn-Peterson efekt

- Dlje nazaj v vesolje ko gremo → večji delež gostote barionov v obliki medgalaktičnega plina
- Absorpcijski sipalni presek Ly- α dovolj velik → popolna absorpcija vse svetlobe ozadja
- Ne bi imeli diskretne Ly- α goščave → konstatno znižan spekter ← Gunn-Peterson efekt
- Tega ne opazimo: (a) ostalo le še malo vodika v medgalaktičnem prostoru ali (b) večina vodika je ioniziranega
- Fotoionizirajoče ravnovesje: rekombinacija p in e^- uravnoveša ionizacijo UV sevanja ozadja
- Segrevanje zaradi fotoionizacije in adiabatno raztezanje → $T \propto \rho^\gamma$ in $n_H \propto \rho^2 T^{-0.7}$

Gunn-Peterson efekt



Slika: <http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Sept01/Rauch/frames.html> (21.3.2010)

Optična globina in spekter moči

- Optična globina $\tau \rightarrow \tau \propto n_H \propto (\Omega_b h^2)^2 (1+z)^6 \rho^2 T^{-0.7}$

Optična globina in spekter moči

- Optična globina $\tau \rightarrow \tau \propto n_H \propto (\Omega_b h^2)^2 (1+z)^6 \rho^2 T^{-0.7}$
- Fluktuacije gostote $\rho = \rho_{mean}(1 + \delta)$

Optična globina in spekter moči

- Optična globina $\tau \rightarrow \tau \propto n_H \propto (\Omega_b h^2)^2 (1+z)^6 \rho^2 T^{-0.7}$
- Fluktuacije gostote $\rho = \rho_{mean}(1 + \delta)$
- Netrivialna, nelinearna zveza $F \propto \exp(-(1 + \delta)^{1.8})$

Optična globina in spekter moči

- Optična globina $\tau \rightarrow \tau \propto n_H \propto (\Omega_b h^2)^2 (1+z)^6 \rho^2 T^{-0.7}$
- Fluktuacije gostote $\rho = \rho_{mean}(1 + \delta)$
- Netrivialna, nelinearna zveza $F \propto \exp(-(1 + \delta)^{1.8})$
- Spekter moči fluktuacij gostote: $P(k) \longleftrightarrow \delta(\mathbf{r})$

Optična globina in spekter moči

- Optična globina $\tau \rightarrow \tau \propto n_H \propto (\Omega_b h^2)^2 (1+z)^6 \rho^2 T^{-0.7}$
- Fluktuacije gostote $\rho = \rho_{mean}(1 + \delta)$
- Netrivialna, nelinearna zveza $F \propto \exp(-(1 + \delta)^{1.8})$
- Spekter moči fluktuacij gostote: $P(k) \longleftrightarrow \delta(\mathbf{r})$
- Majhne skale (0.1 Mpc/h): efekti tople (=vroče + hladne) temne snovi, gravitini, sterilni neutrini, razpadi temne snovi, prvotne črne luknje

Optična globina in spekter moči

- Optična globina $\tau \rightarrow \tau \propto n_H \propto (\Omega_b h^2)^2 (1+z)^6 \rho^2 T^{-0.7}$
- Fluktuacije gostote $\rho = \rho_{mean}(1 + \delta)$
- Netrivialna, nelinearna zveza $F \propto \exp(-(1 + \delta)^{1.8})$
- Spekter moči fluktuacij gostote: $P(k) \longleftrightarrow \delta(\mathbf{r})$
- Majhne skale ($0.1 \text{ Mpc}/\text{h}$): efekti tople (=vroče + hladne) temne snovi, gravitini, sterilni nevtrini, razpadi temne snovi, prvočne črne luknje
- Srednje skale ($1 \text{ Mpc}/\text{h}$): inflacijski modeli, mase lahkih nevtrinov

Optična globina in spekter moči

- Optična globina $\tau \rightarrow \tau \propto n_H \propto (\Omega_b h^2)^2 (1+z)^6 \rho^2 T^{-0.7}$
- Fluktuacije gostote $\rho = \rho_{mean}(1 + \delta)$
- Netrivialna, nelinearna zveza $F \propto \exp(-(1 + \delta)^{1.8})$
- Spekter moči fluktuacij gostote: $P(k) \longleftrightarrow \delta(\mathbf{r})$
- Majhne skale (0.1 Mpc/h): efekti tople (=vroče + hladne) temne snovi, gravitini, sterilni nevtrini, razpadi temne snovi, prvočne črne luknje
- Srednje skale (1 Mpc/h): inflacijski modeli, mase lahkih nevtrinov
- Velike skale (10 Mpc/h): temna energija, ukrivljenost vesolja, barionske akustične oscilacije

Numerične simulacije

- kozmološki scenarij glede na neodvisna opazovanja (CMB, SNe Ia)

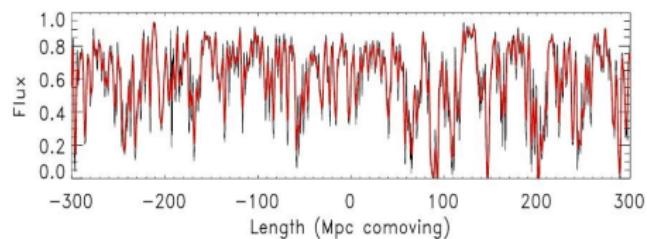
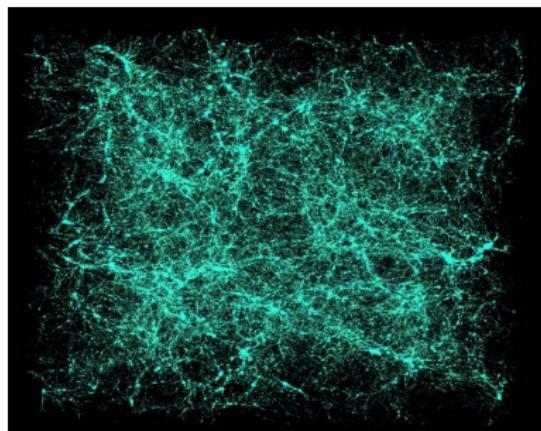
Numerične simulacije

- kozmološki scenarij glede na neodvisna opazovanja (CMB, SNe Ia)
- + 3D hidrodinamske simulacije

Numerične simulacije

- kozmološki scenarij glede na neodvisna opazovanja (CMB, SNe Ia)
- + 3D hidrodinamske simulacije
- + fotoionizacija UV sevanja

Numerične simulacije



Slika: http://iopscience.iop.org/1742-6596/180/1/012021/pdf/1742-6596_180_1_012021.pdf (21.3.2010)

Numerične simulacije

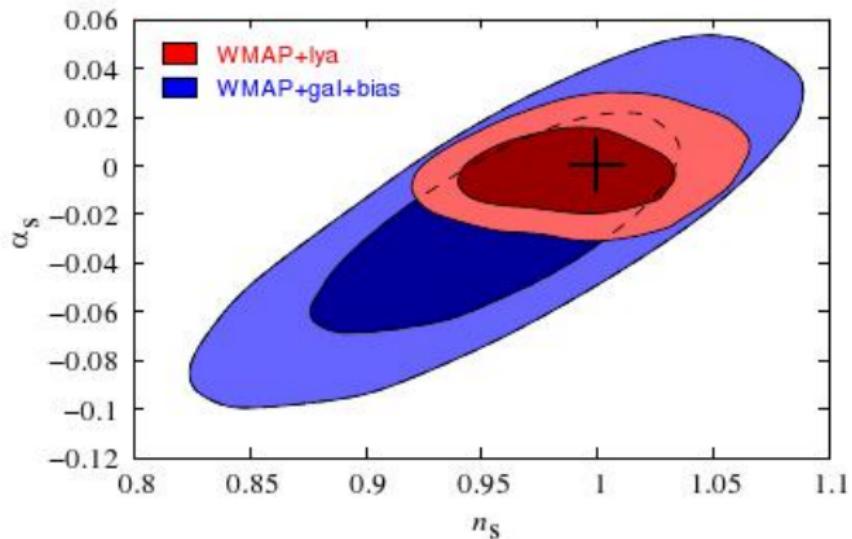
- kozmološki scenarij glede na neodvisna opazovanja (CMB, SNe Ia)
- + 3D hidrodinamske simulacije
- + fotoionizacija UV sevanja
- Lahko proučujemo medgalaktični plin

Numerične simulacije

- kozmološki scenarij glede na neodvisna opazovanja (CMB, SNe Ia)
- + 3D hidrodinamske simulacije
- + fotoionizacija UV sevanja
- Lahko proučujemo medgalaktični plin
- Preko statističnih lastnosti ($P(k)$) določamo spekter moči začetnih fluktuacij (n_s, α_s)

$$P_i(k) \propto \left(\frac{k}{k_p}\right)^{n_s + \alpha_s \log(k/k_p)/2}$$

Numerične simulacije



Slika: U. Seljak et al., Physical Review D 71, 103515 (2005)

Nevtrini

- lahki, interagirajo le z gravitacijo in šibko interakcijo

Nevtrini

- lahki, interagirajo le z gravitacijo in šibko interakcijo
- Nevtrinske oscilacije $\rightarrow \Delta m^2 +$ lastna masna stanja \neq lastna okusna stanja

Nevtrini

- lahki, interagirajo le z gravitacijo in šibko interakcijo
- Nevtrinske oscilacije $\rightarrow \Delta m^2 +$ lastna masna stanja \neq lastna okusna stanja
- Meritve Ly- α + CMB,SNe Ia $\rightarrow \sum m_\nu < 0.17$ eV (95% meja zaupanja)

Nevtrini

- lahki, interagirajo le z gravitacijo in šibko interakcijo
- Nevtrinske oscilacije $\rightarrow \Delta m^2 +$ lastna masna stanja \neq lastna okusna stanja
- Meritve Ly- α + CMB,SNe Ia $\rightarrow \sum m_\nu < 0.17$ eV (95% meja zaupanja)
- Efektivno število nevtrinskih družin:

$$\rho_{\text{rad}} = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left(1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_\nu^{\text{eff}} \right) \rho_\gamma$$

Nevtrini

- lahki, interagirajo le z gravitacijo in šibko interakcijo
- Nevtrinske oscilacije $\rightarrow \Delta m^2 +$ lastna masna stanja \neq lastna okusna stanja
- Meritve Ly- α + CMB,SNe Ia $\rightarrow \sum m_\nu < 0.17$ eV (95% meja zaupanja)
- Efektivno število nevtrinskih družin:

$$\rho_{\text{rad}} = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left(1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_\nu^{\text{eff}} \right) \rho_\gamma$$

- Standardni model ($m_\nu = 0$) napoveduje $N_\nu^{\text{eff}} = 3.04 \rightarrow$ Ly- α : $N_\nu^{\text{eff}} = 5.3^{+0.4}_{-0.6}$

Nevtrini

- lahki, interagirajo le z gravitacijo in šibko interakcijo
- Nevtrinske oscilacije $\rightarrow \Delta m^2 +$ lastna masna stanja \neq lastna okusna stanja
- Meritve Ly- α + CMB,SNe Ia $\rightarrow \sum m_\nu < 0.17$ eV (95% meja zaupanja)
- Efektivno število nevtrinskih družin:

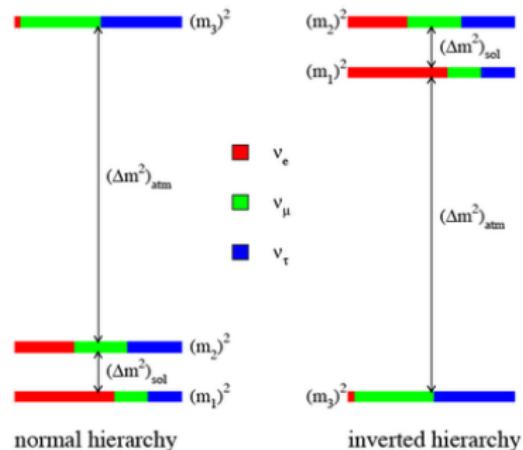
$$\rho_{\text{rad}} = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left(1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_\nu^{\text{eff}} \right) \rho_\gamma$$

- Standardni model ($m_\nu = 0$) napoveduje $N_\nu^{\text{eff}} = 3.04 \rightarrow$ Ly- α : $N_\nu^{\text{eff}} = 5.3^{+0.4}_{-0.6}$
- Omejitve na absolutne mase (masnih lastnih stanj) v normalni hierarhiji

$$m_1 < 0.05 \text{ eV}, \quad m_2 < 0.05 \text{ eV}, \quad m_3 < 0.07 \text{ eV}$$

Nevtrini

Normalna in obrnjena hierarhija



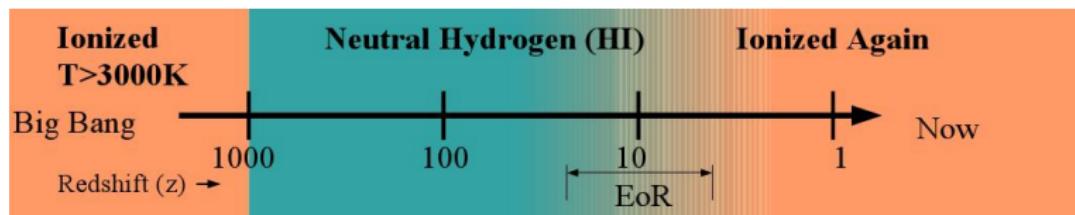
Reionizacija

- rekombinacija $p + e^- \rightarrow H$ pri $z = 1100 \leftarrow$ danes CMB

Reionizacija

- rekombinacija $p + e^- \rightarrow H$ pri $z = 1100 \leftarrow$ danes CMB
- Diskretne črte Ly $\alpha \rightarrow$ vodik je večinoma ioniziran ($n_H/n_{tot} = 10^{-5}$)
 \leftarrow nekje je prišlo do reionizacije

Reionizacija



Slika: http://setiathome.berkeley.edu/~aparsons/papers/2004-11-17_Ay228_EoR.pdf (26.3.2010)

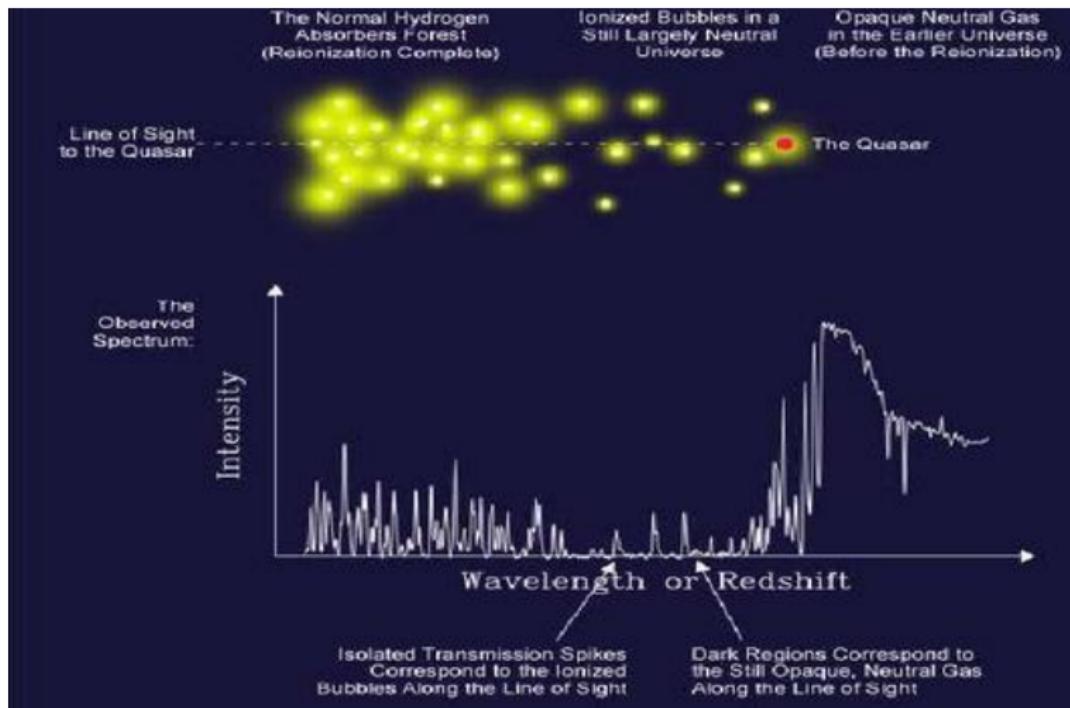
Reionizacija

- rekombinacija $p + e^- \rightarrow H$ pri $z = 1100 \leftarrow$ danes CMB
- Diskretne črte Ly $\alpha \rightarrow$ vodik je večinoma ioniziran ($n_H/n_{tot} = 10^{-5}$)
 \leftarrow nekje je prišlo do reionizacije
- Spremeni statistične lastnosti CMB in Ly $\alpha \rightarrow$ omogoča določanje parametrov reionizacije

Reionizacija

- rekombinacija $p + e^- \rightarrow H$ pri $z = 1100 \leftarrow$ danes CMB
- Diskretne črte Ly $\alpha \rightarrow$ vodik je večinoma ioniziran ($n_H/n_{tot} = 10^{-5}$)
 \leftarrow nekje je prišlo do reionizacije
- Spremeni statistične lastnosti CMB in Ly $\alpha \rightarrow$ omogoča določanje parametrov reionizacije
- Optična globina zaradi reionizacije (iz CMB) $\tau_{re} \approx 0.09$

Reionizacija



Slika: http://setiathome.berkeley.edu/~aparsons/papers/2004-11-17_Ay228_EoR.pdf (26.3.2010)

Inflacija

- Najpreprostejši model enega skalarnega polja: $V(\phi)$ minimum pri $\phi = 0 \leftarrow$ to smo po koncu inflacije

Inflacija

- Najpreprostejši model enega skalarnega polja: $V(\phi)$ minimum pri $\phi = 0 \leftarrow$ to smo po koncu inflacije
- Polje ϕ vpliva na Hubblov zakon $H(t)$

Inflacija

- Najpreprostejši model enega skalarnega polja: $V(\phi)$ minimum pri $\phi = 0 \leftarrow$ to smo po koncu inflacije
- Polje ϕ vpliva na Hubblov zakon $H(t)$
- Eksponentno širjenje vesolja (opiše $a(t)$, skalirni faktor)

$$N_e = \ln \left(\frac{a}{a_{end}} \right) = \int_{t_0}^{t_{end}} H(t) dt$$

Inflacija

- Najpreprostejši model enega skalarnega polja: $V(\phi)$ minimum pri $\phi = 0 \leftarrow$ to smo po koncu inflacije
- Polje ϕ vpliva na Hubblov zakon $H(t)$
- Eksponentno širjenje vesolja (opiše $a(t)$, skalirni faktor)

$$N_e = \ln \left(\frac{a}{a_{end}} \right) = \int_{t_0}^{t_{end}} H(t) dt$$

- Inflacija napove gravitacijske valove $\rightarrow r = \frac{T}{S} = \frac{\text{tenzor}}{\text{skalar}}$: $r < 0.36$ (95%) iz Ly α

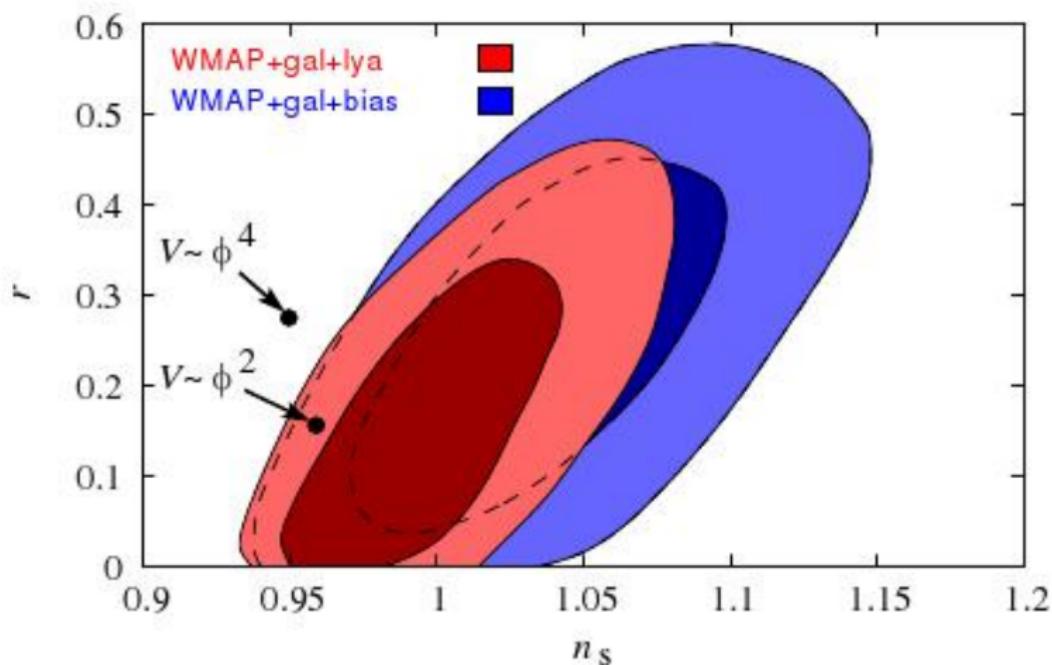
Inflacija

- Najpreprostejši model enega skalarnega polja: $V(\phi)$ minimum pri $\phi = 0 \leftarrow$ to smo po koncu inflacije
- Polje ϕ vpliva na Hubblov zakon $H(t)$
- Eksponentno širjenje vesolja (opiše $a(t)$, skalirni faktor)

$$N_e = \ln \left(\frac{a}{a_{end}} \right) = \int_{t_0}^{t_{end}} H(t) dt$$

- Inflacija napove gravitacijske valove $\rightarrow r = \frac{T}{S} = \frac{\text{tenzor}}{\text{skalar}}$: $r < 0.36$ (95%) iz Ly α
- Ly α zavrne kaotični model z $V(\phi) \sim \phi^4$

Inflacija



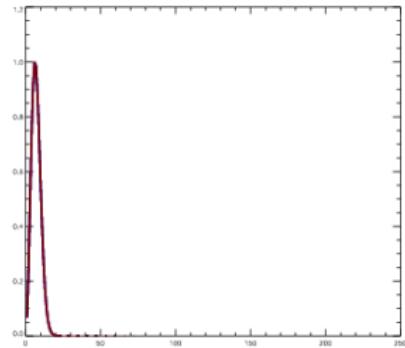
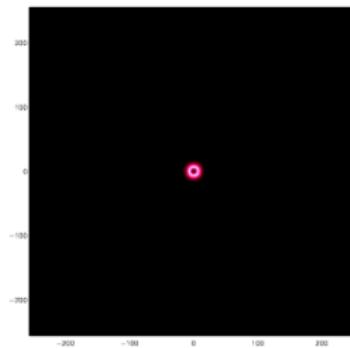
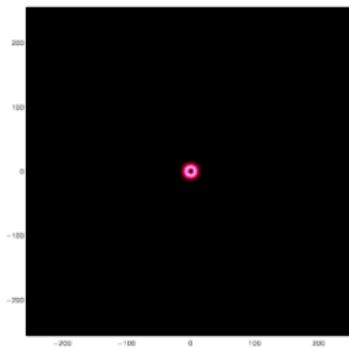
Slika: U. Seljak et al., Physical Review D 71, 103515 (2005)

Barionske akustične oscilacije

- Barionske akustične oscilacije - BAO: oscilacije v plazmi fotonov in barionov v zgodnjem vesolju

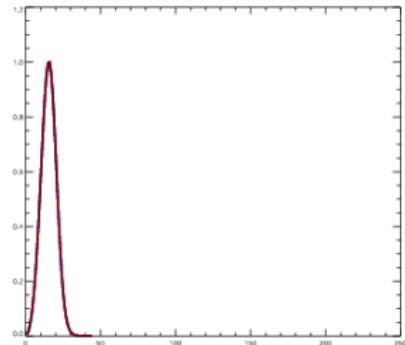
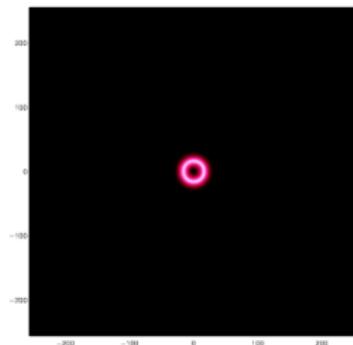
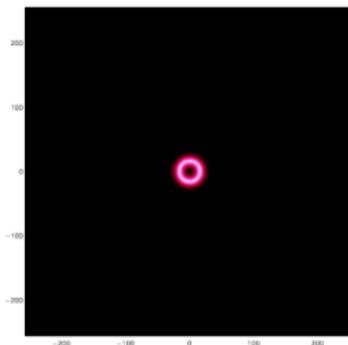
Barionske akustične oscilacije

Začetek, po inflaciji



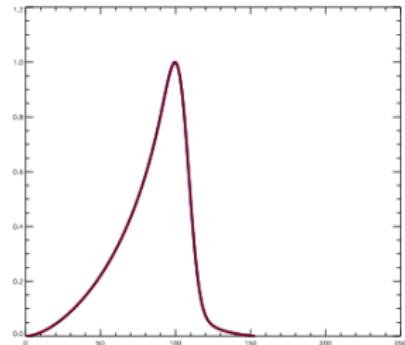
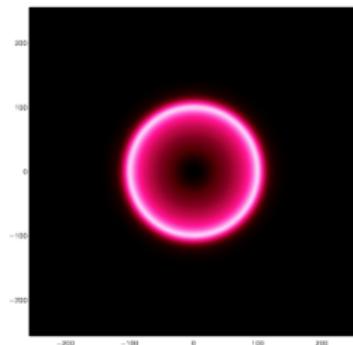
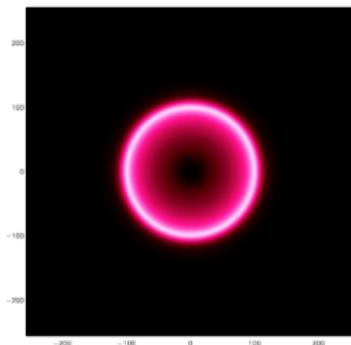
Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

Barionske akustične oscilacije



Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

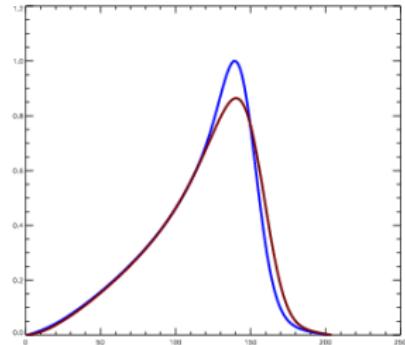
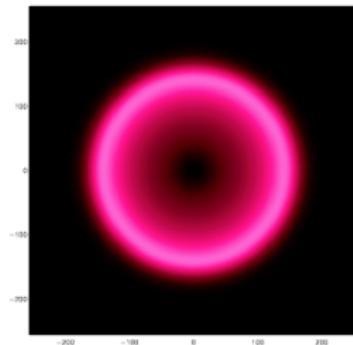
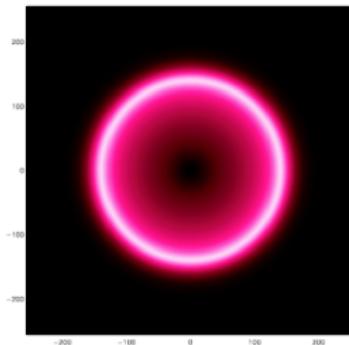
Barionske akustične oscilacije



Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

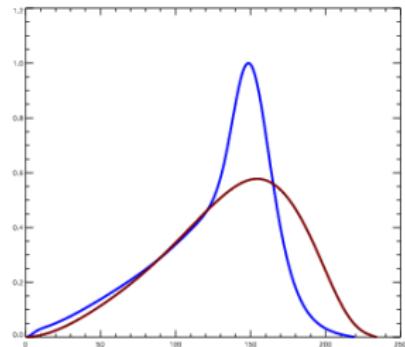
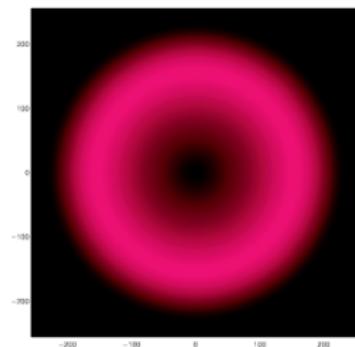
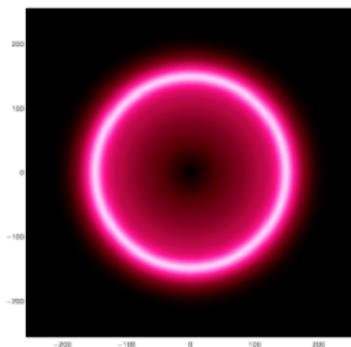
Barionske akustične oscilacije

Rekombinacija $z = 1100$, $t = 10^5$ let



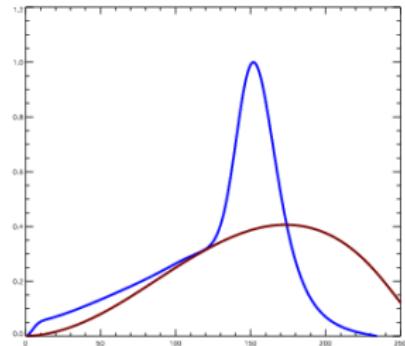
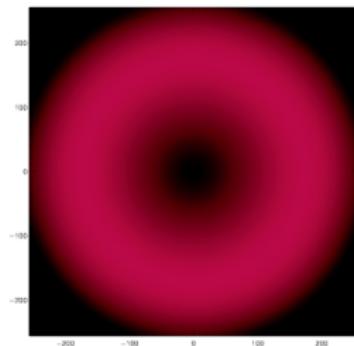
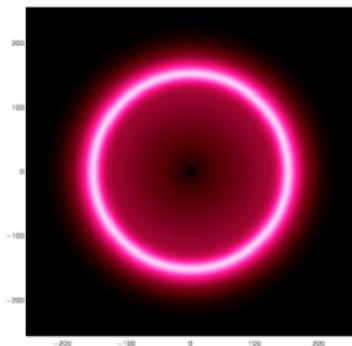
Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

Barionske akustične oscilacije



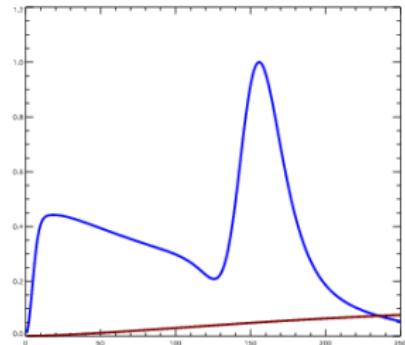
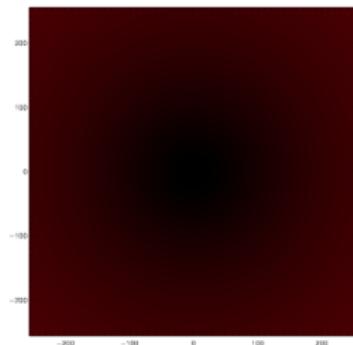
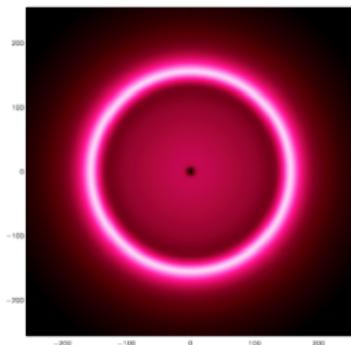
Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

Barionske akustične oscilacije



Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

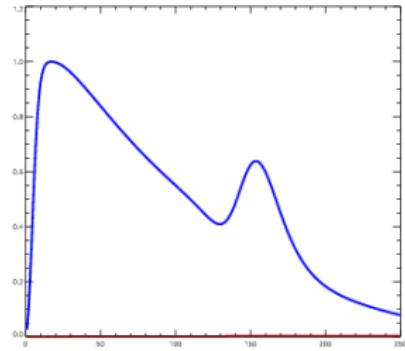
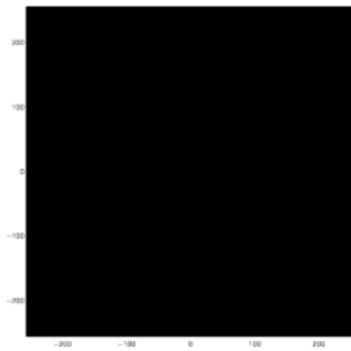
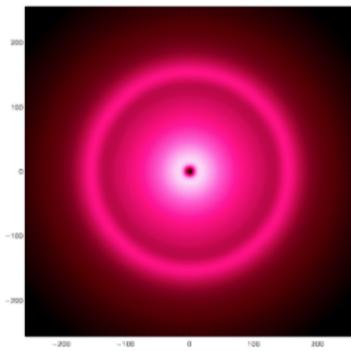
Barionske akustične oscilacije



Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

Barionske akustične oscilacije

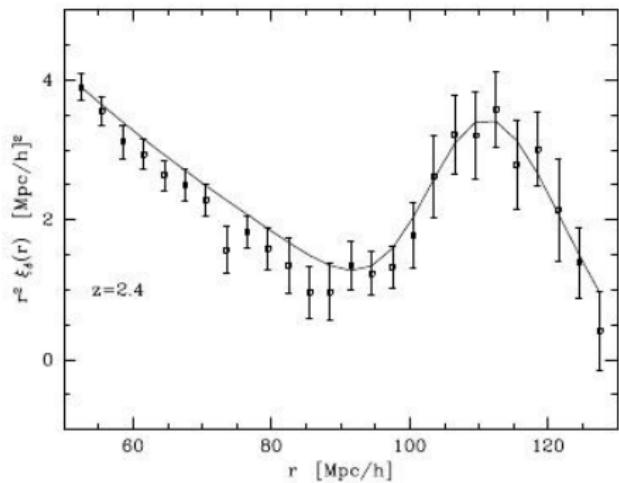
Danes



Slika: <http://astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/>

Barionske akustične oscilacije

- Barionske akustične oscilacije - BAO: oscilacije v plazmi fotonov in barionov v zgodnjem vesolju
- Opazimo značilno BAO skalo (~ 105 Mpc/h) tako pri galaksijah, kot pri Ly α \leftarrow standard ruler



Zaključek

- Absorbcija Ly α črte v medgalaktičnem mediju z zvezno spremenljajočo se gostoto

Zaključek

- Absorbcija Ly α črte v medgalaktičnem mediju z zvezno spremenljajočo se gostoto
- Diskretne črte → le majhen delež vodika je v nevtralnem stanju

Zaključek

- Absorbcija Ly α črte v medgalaktičnem mediju z zvezno spremenljajočo se gostoto
- Diskretne črte \rightarrow le majhen delež vodika je v nevtralnem stanju
- Statistične lastnosti Ly α spektra $\rightarrow P(k)$

Zaključek

- Absorbcija Ly α črte v medgalaktičnem mediju z zvezno spremenljajočo se gostoto
- Diskretne črte → le majhen delež vodika je v nevtralnem stanju
- Statistične lastnosti Ly α spektra → $P(k)$
- Meri majhne skale (~ 1 Mpc/h) na velikih oddaljenostih

Zaključek

- Absorbcija Ly α črte v medgalaktičnem mediju z zvezno spremenljajočo se gostoto
- Diskretne črte → le majhen delež vodika je v nevtralnem stanju
- Statistične lastnosti Ly α spektra → $P(k)$
- Meri majhne skale ($\sim 1 \text{ Mpc/h}$) na velikih oddaljenostih
- Bolje od galaksij omejuje inflacijo, mase lahkih nevtrinov in toplo temno snov

Zaključek

- Absorbcija Ly α črte v medgalaktičnem mediju z zvezno spremenljajočo se gostoto
- Diskretne črte → le majhen delež vodika je v nevtralnem stanju
- Statistične lastnosti Ly α spektra → $P(k)$
- Meri majhne skale ($\sim 1 \text{ Mpc/h}$) na velikih oddaljenostih
- Bolje od galaksij omejuje inflacijo, mase lahkih nevtrinov in toplo temno snov
- Meritve kažejo na reionizacijo medgalaktičnega plina zaradi UV sevanja oddaljenih kvazarjev in galaksijah

Zaključek

- Absorbcija Ly α črte v medgalaktičnem mediju z zvezno spremenljajočo se gostoto
- Diskretne črte → le majhen delež vodika je v nevtralnem stanju
- Statistične lastnosti Ly α spektra → $P(k)$
- Meri majhne skale ($\sim 1 \text{ Mpc/h}$) na velikih oddaljenostih
- Bolje od galaksij omejuje inflacijo, mase lahkih nevtrinov in toplo temno snov
- Meritve kažejo na reionizacijo medgalaktičnega plina zaradi UV sevanja oddaljenih kvazarjev in galaksijah
- Meri naravno BAO skalo → standardno merilo