

Istraživanje korelacije između kinetičkog Sunyaev-Zel'dovich efekta i kozmološkog signala neutralnog vodika

Ivan Nikolić

Mentor: dr.sc. Vibor Jelić

26. siječnja 2020.

SAŽETAK

Kinetički Sunyaev-Zel'dovich (kSZ) efekt je efekt koji nastaje Thomsonovim raspršenjem fotona mikrovalnog kozmičkog zračenja na slobodnim elektronima u reioniziranom mediju. kSZ efekt se može koristiti kao proba ionizirane materije u astrofizičkim promatranjima. 21 centimetarski signal dolazi od hiperfinog prijelaza neutralnog vodika i proba je neutralne materije. Koristan način proučavanja reionizirane materije u epohi reionizacije je proučavanje korelacije između kSZ efekta i 21 centimetarskog signala. U ovom radu korištene su simulacije kSZ efekta i signala 21 centimetarske linije te je dobivena slaba korelacija u epohi reionizacije. Ta korelacija je veća za povijest reionizacije s velikim mjehurićima.

I. UVOD

Nastanak prvih zvijezda i galaksija u Svemiru označio je promjene u međugalaktičkom prostoru. Prvi izvori zračenja ionizirali su međugalaktičku materiju. Period u kojem se to dogodilo zove se epoha reionizacije [1]. Reionizacija se dešavala postepeno. Međugalaktička materija je u početku epohe bila neutralna, zatim su prvo ionizirana područja oko ionizirajućih izvora. S vremenom su se područja ionizirane materije povećavala sve dok cijeli Svemir nije postao ioniziran. Prije epohe reionizacije formacija i evolucija struktura su bili dominirani tamnom materijom, dok je barionska materija imala malen značaj. Nakon epohe reionizacije kozmički plin ima veću ulogu u formaciji i evoluciji struktura dok na malim skalama ima i dominantnu ulogu [2].

Iako je jasno da se reionizacija morala dogoditi, detalji epohe reionizacije su još uvijek nepoznati. Na primjer, još uvijek nije poznato koji objekti ioniziraju međugalaktičku materiju i kako ju ioniziraju. Problem epohe reionizacije jedno je od ključnih pitanja moderne kozmologije. Unatoč teorijskim istraživanjima malo je mjerenja koja bi mogla ograničiti modele reionizacije. Na primjer, mjerenja Gunn-Petersonovog jarka u spektrima kvazara [5] ograničavaju završetak reionizacije oko crvenog pomaka $z \sim 6$. Osim toga mjerenja ukupne optičke dubine pomoću mikrovalnog pozadinskog zračenja Svemira (*WMAP* i *Planck*) impliciraju početak reionizacije oko crvenog pomaka $z \sim 11$ [6].

Da bi se epoha reionizacije uistinu istražila potrebno je mapirati raspodjelu neutralnih atoma vodika kroz kozmološku povijest. To možemo napraviti pomoću hiperfine 21 cm linije neutralnog vodika. Trenutno se dizajniraju i grade brojni radioteleskopi kojima je primarni cilj istraživanja signal 21 cm linije vodika tijekom epohe reionizacije. Neki od tih teleskopa su LOFAR (Low Frequency Array)¹, MWA (Murchinson

Widefield Array)² i SKA (Square Kilometer Array)³.

Tijekom ionizacije međugalaktičkog prostora nastaju slobodni elektroni na kojima se fotoni pozadinskog zračenja mogu raspršiti. Taj proces Thomsonovog raspršenja stvara sekundarne anizotropije u mikrovalnom pozadinskom zračenju. Anizotropije povezane s termalnim gibanjem slobodnih elektrona zovu se termalni Sunyaev-Zel'dovich efekt (tSZ), dok u slučaju grupnog gibanja elektrona, riječ je o kinetičkom Sunyaev-Zel'dovich efektu (kSZ). Kinetički Sunyaev-Zel'dovich efekt bi trebao biti dominantniji tijekom reionizacije [3].

Uzimajući u obzir brojne izazove mjerenja 21 cm signala neutralnog vodika iz epohe reionizacije, kao što su dominantno zračenje iz prednjeg plana, ionosfera, kompleksni odgovor instrumenta i slično [1], korisno je istražiti korelaciju s drugim mjerenjima reionizacije kao što je sekundarna anizotropija pozadinskog zračenja. Prednost istraživanja pomoću korelacija je ta da je sama statistika manje osjetljiva na smetnje kao što je zračenje iz prednjeg plana i šum instrumenta. Različita mjerenja će imati drugačiji šum samog instrumenta te su karakteristike zračenja iz prednjeg plana drugačije na različitim frekvencijama.

Kroz rad ćemo koristiti Λ CDM kozmologiju sa WMAP5 parametrima: $H_0 = 71.9 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_b = 0.0441$, $\Omega_m = 0.258$ i $\Omega_\Lambda = 0.742$.

II. KSZ I EOR SIGNAL - TEORIJA

A. 21 cm signal

U Rayleigh-Jeans limesu malih energija Planckovu raspodjelu možemo predstaviti kao:

$$T_b(\nu) \approx I_\nu c^2 / 2k_B \nu^2. \quad (1)$$

¹ <http://www.lofar.org/>

² <http://www.mwatelescope.org/>

³ <https://www.skatelescope.org/>

$T_b(\nu)$ je temperatura sjaja, c je brzina svjetlosti i k_B je Boltzmannova konstanta. I_ν je specifični intenzitet, odnosno intenzitet po diferencijalnoj frekvenciji: $I_\nu = \frac{dI}{d\nu}$. Jednadžba prijenosa zračenja, koja govori o očuvanju zračenja, može se napisati kao $\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + B_\nu(T)$, gdje je B_ν Planckova funkcija na temperaturi T . Jednadžba prijenosa zračenja se može još napisati kao $\frac{dT_b}{dT_\nu} = -T_b + T_{CMB}$. Rješenje te jednadžbe se može pisati kao $T_b(\nu) = T_{spin}(1 - e^{-\tau_\nu}) + T_{CMB}(\nu)e^{-\tau_\nu}$. T_{spin} je ovdje temperatura spina.

Temperatura spina se definira na sljedeći način:

$$\frac{n_1}{n_0} = 3 \exp(-T_*/T_{spin}). \quad (2)$$

Ovdje su n_1 i n_0 koncentracije elektrona u tripletnom i singletnom stanju hiperfinog prijelaza i $T_* = 0.0681$ K je temperatura koja odgovara valnoj duljini od 21 cm. Temperatura spina određuje intenzitet zračenja koji izlazi iz oblaka neutralnog vodika. Tri procesa određuju temperaturu spina: apsorpcija mikrovalnog pozadinskog zračenja, sudari atoma vodika s drugim atomima i elektronima i raspršenje Lyman α fotona kroz pobuđenja. Spin temperatura se tada može napisati kao:

$$T_{spin} = \frac{T_{CMB} + y_{kin}T_{kin} + y_\alpha T_\alpha}{1 + y_{kin} + y_\alpha} \quad (3)$$

gdje su y_{kin} i y_α konstante vezanja.

Veličina koju mjerimo je $\delta T_b \equiv T_b - T_{CMB}$. Tu veličinu možemo dobiti kao [9]:

$$\delta T_b = 28mK(1 + \delta)x_{HI} \left(1 - \frac{T_{CMB}}{T_{spin}}\right) \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.0223}\right) \sqrt{\left(\frac{1+z}{10}\right) \left(\frac{0.24}{\Omega_m}\right)}. \quad (4)$$

Ovdje je h Hubbleova konstanta u jedinicama $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

B. kSZ efekt

Fluktuacije u temperaturi mikrovalnog pozadinskog zračenja nastale Thomsonovim raspršenjem fotona na slobodnim elektronima za danu doglednicu su dane sljedećim izrazom [3]:

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right)_{kSZ} = -\sigma_T \int_{t_r}^{t_0} e^{-\tau} n_e(\hat{r} \cdot \vec{v}) dt \quad (5)$$

gdje je $\sigma_t = 6.65 \times 10^{-29} \text{ m}^2$ Thomsonov udarni presjek za elektrone, τ optička dubina elektrona za Thomsonovo raspršenje, \vec{v} je grupna brzina elektrona i \hat{r} je jedinični vektor u smjeru doglednice. Integral se izvrsjednjuje od

vremena rekombinacije t_r do starosti Svemira sada t_0 . Član $e^{-\tau}$ dolazi zbog višestrukih raspršenja na doglednici koje će umanjiti fluktuacije temperature.

Gustoću elektrona n_e možemo napisati kao produkt gustoće neutralnih atoma n_n i faktora ionizacije x_e . I gustoća neutralnih atoma i faktor ionizacije fluktuiraju oko srednjih vrijednosti \bar{n}_n , \bar{x}_e . Te fluktuacije možemo definirati kao $\delta = n_n/\bar{n}_n - 1$ i $\delta_{x_e} = x_e/\bar{x}_e - 1$ pa možemo pisati gustoću elektrona kao:

$$n_e = \bar{n}_n \bar{x}_e (1 + \delta + \delta_{x_e} + \delta\delta_{x_e}) \quad (6)$$

Za homogene povijesti reionizacije δ_{x_e} možemo zanemariti. Srednja vrijednost koncentracije atoma vodika ovisi o crvenom pomaku kao $\bar{n}_{HI} = \bar{n}_{HI(0)}(1+z)^3$ gdje je $\bar{n}_{HI(0)}$ srednja koncentracija vodika danas: $\bar{n}_{HI(0)} = 1.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$ [3].

Integral rješavamo po crvenom pomaku uz transformaciju $dt = -\frac{dz}{H(z)(1+z)}$. Uvrštavajući u jednadžbu (5) dobivamo:

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right)_{kSZ} = -\sigma_T \bar{n}_{HI(0)} \int_{z_r}^{z_0} \frac{(1+z)^2}{H} e^{-\tau} \bar{x}_e (1 + \delta) v_r dz. \quad (7)$$

$H = H_0 \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 \Omega_\Lambda}$ je Hubbleova konstanta na crvenom pomaku z , H_0 je Hubbleova konstanta danas. v_r je komponenta brzine u smjeru doglednice.

C. Optička dubina

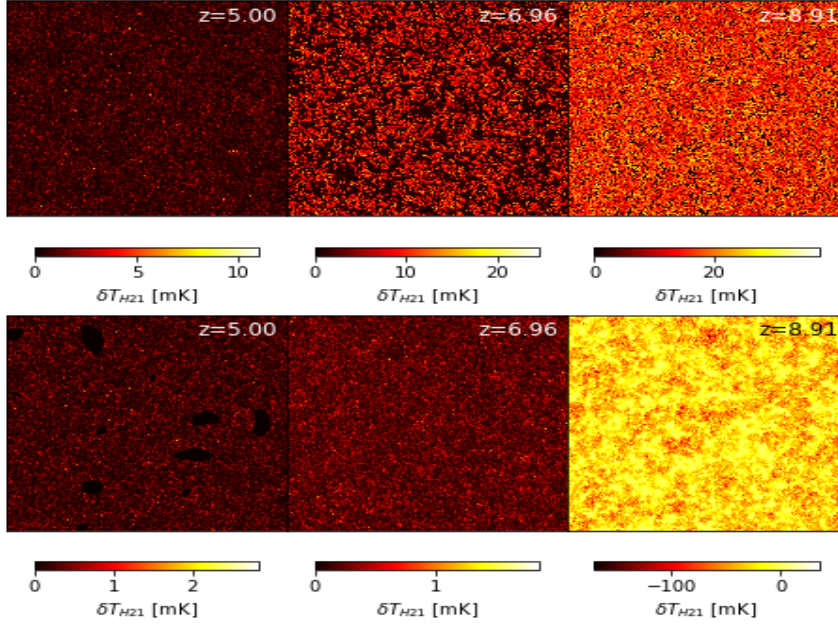
Thomsonova optička dubina τ na crvenom pomaku z je:

$$\tau = c\sigma_T \int_0^z n_e \frac{(1+z)^2}{H(z)} dz. \quad (8)$$

Mjerenja mikrovalnog pozadinskog zračenja su dala ograničenje na optičku dubinu: $\tau = 0.087 \pm 0.017$ [10]. Naše simulacije su namještene tako da im srednja Thomsonova optička dubina odgovora vrijednosti dobivenoj iz mikrovalnog pozadinskog zračenja.

III. PODACI I METODOLOGIJA

Simulacije kozmološkog 21 cm signala i kSZ signala povezanog s epohom reionizacije Svemira su napravljene pomoću programa 21cmFAST [7]. 21cmFAST radi simulacije seminumerički koristeći više aproksimacija od normalnih numeričkih metoda. Simulacije se sastoje od 1024^3 piksela koji u trećoj dimenziji imaju crveni pomak dajući ovisnost 21 cm signala o crvenom pomaku. Veličina kocki u prostornoj dimenziji je 1600 Mpc. Crveni pomaci idu od $z = 86.52$ do $z = 5.00$ dajući potpis epohe

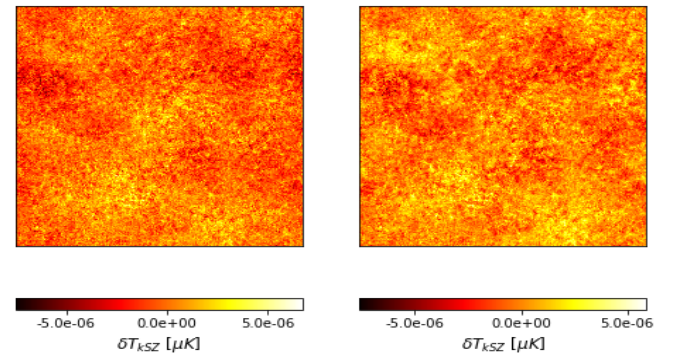


Slika 1: Simulacije 21 signala neutralnog vodika za različite crvene pomake. Na gornjim slikama je prikazana povijest reionizacije malim strukturama, a na donjim slikama je prikazana povijest reionizacije velikim strukturama.

reionizacije na kozmološki 21 cm signal. Simulacije su napravljene za dvije različite povijesti reionizacije, ovisno o izvorima ionizirajućeg zračenja. Na slici (1) se nalazi prikaz simulacija.

Kinetički Sunyaev-Zel'dovich efekt je integrirani efekt zbog čega u simulacijama dobivamo samo kumulativni efekt kroz sve crvene pomake. Za kinetički Sunyaev Zel'dovich efekt također imamo dvije simulacije zbog dvije različite povijesti reionizacije. Fluktuacije kSZ efekta mogu biti pozitivne i negativne zbog toga što brzina v_r može biti pozitivna i negativna (7), no za računanje korelacija nam je bitna samo apsolutna vrijednost kSZ fluktuacija.

Na slici (2) se nalaze simulacije kSZ efekta.

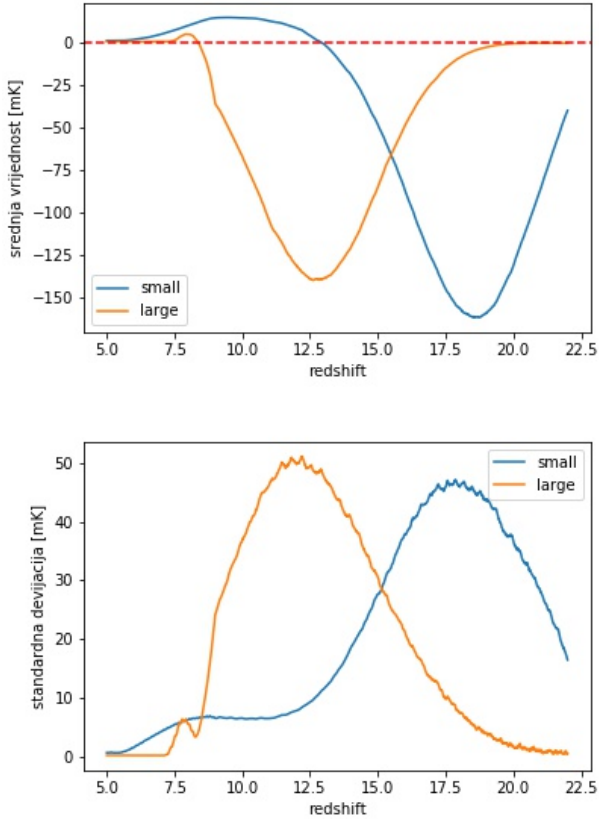


Slika 2: Simulacije kSZ anizotropije temperature za različite crvene pomake. Na lijevoj slici prikazana je povijest reionizacije malim strukturama, a na desnoj slici povijest reionizacije velikim strukturama.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

A. 21 cm signal

Na slici (3) se nalaze srednja vrijednost i standardna devijacija signala neutralnog vodika iz naših simulacija.



Slika 3: Na gornjoj slici se nalazi srednja vrijednost signala neutralnog vodika u ovisnosti o crvenom pomaku za dvije povijesti reionizacije. Na donjoj slici se nalazi standardna devijacija signala neutralnog vodika u ovisnosti o crvenom pomaku za dvije povijesti reionizacije.

Na slikama se vide dva područja signala: Ovisno o temperaturi spina (2) postoje dva efekta na signal. U slučaju da je temperatura pozadinskog zračenja viša od temperature spina dolazi do apsorpcije zračenja na neutralnom vodik u što dovodi do negativnog 21 cm signala. Kada je spin temperatura viša od temperature pozadinskog zračenja dolazi do emisije zračenja neutralnog vodika što dovodi do pozitivnog 21 cm signala. Ovisno o povijesti reionizacije dobivamo različitu ovisnost signala o crvenom pomaku.

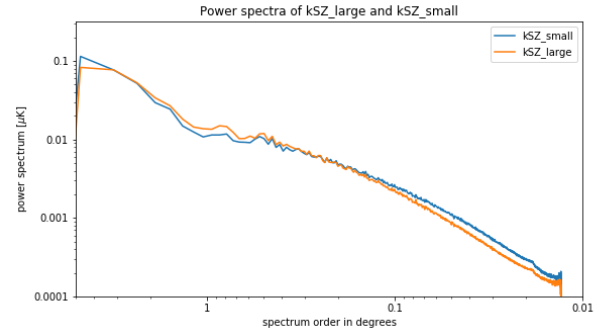
Temperatura plina prije stvaranja prvih struktura vezana je za temperaturu pozadinskog zračenja zbog Comptonovog raspršenja na elektronima koji su preostali nakon rekombinacije. Na nižim crvenim pomacima dolazi do odvezivanja te dvije temperature

te adijabatskog hlađenja. Temperatura spina vezana je u početku za temperaturu plina zbog sudaranja s preostalim elektronima no kako temperatura plina pada, spin temperatura se odvezuje i približava temperaturi pozadinskog zračenja. Prilikom stvaranja prvih struktura dolazi do reionizacije i vezanja spin temperature na temperaturu plina. To se vidi kao apsorpcija u grafu (3) no kako se temperatura plina radi zagrijavanja uslijed zračenja prvih zvijezda povećava dolazi do emisije. [2] navodi dva moguća scenarija evolucije spin temperature. U prvom scenariju vezanje dolazi tek nakon što se temperatura plina i temperatura pozadinskog zračenja izjednače. Tada očekujemo vidjeti emisiju. U drugom slučaju do vezanja dolazi ranije pa vidimo prvo apsorpciju pa emisiju.

U našim simulacijama vidimo različito ponašanje signala u ovisnosti o crvenom pomaku. Mehanizam te svojstvo zračenja su drugačiji u oba modela. U jednom slučaju izvori brže zagrijavaju međugalaktički materijal, a u drugom slučaju sporije. No, zvijezde sporije ioniziraju međugalaktički prostor od kvazara zbog mehanizma njihovog zračenja.

B. kSZ simulacije

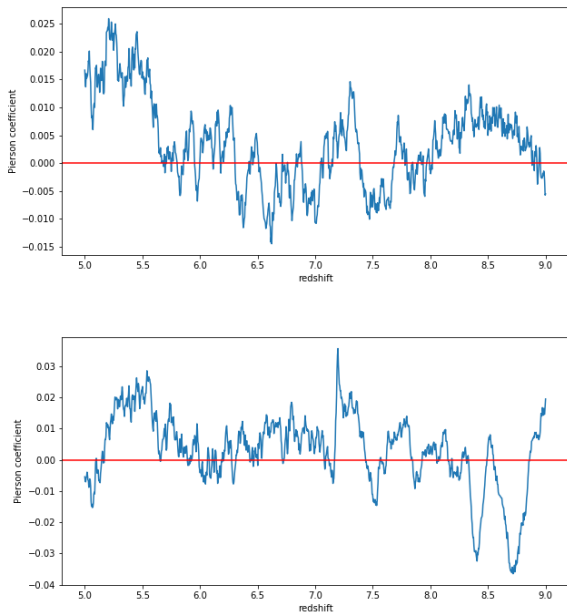
Na slici (4) se nalaze spektri snage temperaturne anizotropije kinetičkog Sunyaev-Zel'dovich efekta za dvije različite povijesti reionizacije.



Slika 4: spektar snage kSZ temperaturne anizotropije za dvije povijesti reionizacije

Za dobivanje spektara potrebno je prvo napraviti Fourierovu transformaciju slika kSZ efekta. Nakon toga računamo spektar snage računajući srednju vrijednost Fourierovog transformata unutar kružnog vijenca određene udaljenosti od centra slike. Skalu spektra snage određujemo uzimajući u obzir veličinu simulacije, 1600 Mpc, i udaljenost do epohe reionizacije. Pretpostavljajući da je epoha reionizacije počela na crvenom pomaku $z=10$ i kozmološke parametre Svemira, pomoću [8] dobijemo udaljenost do crvenog pomaka 9694 Mpc. Kutna veličina simulacije tada je oko 9.44°

Iako su dvije simulacije kSZ anizotropija bazirane na različitim povijestima reionizacije, njihovi spektri



Slika 5: Na gornjoj slici se nalazi ovisnost koeficijenta korelacije o crvenom pomaku za male izvore. Na donjoj slici se nalazi ovisnost koeficijenta korelacije o crvenom pomaku za velike izvore.

snage se ne razlikuju mnogo (4). To je zbog toga što su simulacije normalizirane na istu srednju vrijednost Thomsonove optičke dubine $\tau \approx 0.087$ koja je dobivena mjerenjima mikrovalnog pozadinskog zračenja. Kinetički Sunyaev Zel'dovich efekt je integrirani efekt, tako da iako simulacije pokazuju različite povijesti reionizacije, one su jednako noramlizirane pa simulacije imaju sličan spektar snage.

U kSZ small simulaciji ionizirani mjehurići su u prosjeku manji od mjehurića u kSZ large pa imamo nešto veći signal na manjim skalama za kSZ small dok obrnuto vrijedi za veće skale.

C. korelacija

Kao mjeru korelacije uzimamo Piersonov koeficijent:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (9)$$

Na slici (5) se nalazi ovisnost koeficijenta korelacije o crvenom pomaku za obje simulacije. Na slikama se

vidi da je koeficijent korelacije generalno malen i ovisan o metodi reionizacije.

Pošto je kSZ efekt integrirani efekt, više smisla ima promatrati korelaciju kSZ efekta sa integriranom slikom 21cm signala. To radimo tako da podijelimo 21cm signal na područje emisije i područje apsorpcije. Ta područja zasebno integriramo i promatramo koeficijent korelacije.

Crveni pomak na kojem 21 cm signal mijenja predznak u slučaju reionizacije malim izvorima je $z=12.90$. Što se tiče reionizacije malim izvorima dobivamo koeficijent korelacije $\rho_{kSZ,21cm} = 0.01817$ u slučaju emisije i $\rho_{kSZ,21cm} = 0.01867$ u slučaju apsorpcije.

Povijest reionizacije velikim izvorima smo podijelili na tri dijela pošto srednja vrijednost prolazi kroz tri karakteristična područja. Na velikim crvenim pomacima imamo apsorpciju, na crvenim pomacima oko $z=7$ imamo emisiju dok na još manjim crvenim pomacima imamo jako slab signal. Na crvenom pomaku $z=8.36$ 21 cm signal mijenja predznak, a na crvenim pomacima manjim od $z=7.38$ signal je relativno slab. Koeficijent korelacije računamo za ta tri područja. Na prvom području koeficijent korelacije iznosi $\rho_{kSZ,21cm}=0.04961$, na drugom području koeficijent korelacije iznosi $\rho_{kSZ,21cm}=0.00537$, a u području apsorpcije $\rho_{kSZ,21cm}=0.08178$.

Iz slike (5) vidljivo je da veći dio kSZ signala dolazi iz kraja reionizacije kada su ionizirana područja najveća. Također vidimo da je korelacija izraženija za povijest reionizacije velikim mjehurićima kao što je i za očekivati.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu smo predstavili simulacije temperaturne anizotropije mikrovalnog pozadinskog zračenja nastale kinetičkim Sunyaev-Zel'dovich efektom i 21 cm signala neutralnog vodika. Iz tih simulacija smo dobili evoluciju 21 cm signala u ovisnosti o crvenom pomaku. Također odredili smo spektar snage kSZ efekta. Istražili smo i korelaciju te dvije simulacije za dva scenarija povijesti reionizacije. Rezultat se razlikuje ovisno o mehanizmu kojim dolazi do reionizacije, korelacija je izraženija za povijest reionizacije velikim mjehurićima. Također, primjećeno je da kSZ signal dolazi s kraja reionizacije kada su ionizirana područja najveća.

Koeficijent korelacije je u svim slučajevima bio malen, sve su vrijednosti bile različite od nule tek na drugoj decimali. Za daljnje istraživanje korelacija potrebno je učiniti Monte Carlo statistiku simulacija da bismo dobili statističku pogrešku mjerenja.

-
- [1] Ed. Andrei Mesinger, Cosmic 21cm Revolution: Charting first billion years of the universe, IOP Science
 - [2] S. Zaroubi, 2012, Epoch of Reionization, Springer
 - [3] V. Jelic, S. Zaroubi, N. Aghanim, M. Douspis, L. V.

- E. Koopmans, M. Langer, G. Mellema, H. Tashiro, and R. M. Thomas, 2010, A cross-correlation study between the cosmological 21 cm signal and the kinetic Sunyaev-Zel'dovich effect, MNRAS, 402:2279–2290

- [4] P. J. Adshead, S.R. Furlanetto, 2008, Reionization and the large-scale 21-cm cosmic microwave background cross-correlation, MNRAS, 384, 291
- [5] Becker et al., 2001, Evidence for reionization at $Z \sim 6$: detection of a Gunn-Peterson trough in a $Z=6.28$ quasar, AJ 122 2850
- [6] D. N. Spergel et al., 2007, Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology, ApJS, 170, 377
- [7] A. Mesinger, S. Furlanetto, R. Cen, 2010, 21cmFAST: A Fast, Semi-Numerical Simulation of the High-Redshift 21-cm Signal, MNRAS, 411:955-972
- [8] <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>, Wright (2006, PASP, 118, 1711)
- [9] B. Ciardi and P. Madau, 2003, Probing beyond the Epoch of Hydrogen Reionization with 21 Centimeter Radiation, ApJ, 596:1-8
- [10] E. Komatsu et al., 2009, Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological interpretaion, ApJS, 180:330-376