

Monte Carlo simulacija protojata galaksija u Cosmos pregledu neba

Tomičić, Neven

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:152261>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Neven Tomičić

MONTE CARLO SIMULACIJA
PROTOJATA GALAKSIJA U
COSMOS PREGLEDU NEBA

Diplomski rad

Zagreb, 2015

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: ISTRAŽIVAČKI

Neven Tomičić

Diplomski rad

**MONTE CARLO SIMULACIJA PROTOJATA
GALAKSIJA U COSMOS PREGLEDU NEBA**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Vernesa Smolčić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2015

ZAHVALA

Zahvalio bih se mentorici doc. dr. sc. Vernesi Smolčić, na mentorstvu i vođenju kroz ovaj rad. Posebno bih se zahvalio asistentu dipl. ing. Nikoli Baranu za tehničku pomoć i savjetovanje pri izvedbi simulacija i rada u programskom jeziku IDL. Zahvalio bih se dr. sc. Oskariu Miettineni i kolegici Niki Jurlin, za pomoć i savjetovanje pri analizi protojata. Također se zahvaljujem dr. sc. Jacinti Delhaize, mag. phys. Mladenu Novaku i kolegi Krešimiru Tisaniću za savjetovanje i pomoć pri radu.

Zahvalio bih se svojim roditeljima na savjetima za život i za potporu koju mi cijeli život pružaju na mom putu u znanost. Također bih se zahvalio svim svojim profesorima, prijateljima i kolegama u mom osnovnoškolskom, srednjoškolskom i fakultetskom obrazovanju, a pogotovo prof. Ankici Benček, prof. Andreji Pehar, prof. Ana-Mariji Kukuruzović i prof. Josipu Matijeviću koji su me usmjeravali prema znanosti.

Sažetak

Jata tj. skupovi galaksija su veliki virializirani skupovi galaksija. Galaksije doprinose oko 5% mase jata, unutar-klasterski medij oko 10% mase i tamna tvar do 85% mase. Te strukture su nastale iz protojata galaksija. Protojato je rani oblik jata sa manje galaksija i sa uočenom većom gustoćom broja galaksija u odnosu na ostale dijelove promatranog neba. Cilj ovog rada jest simuliranje protojata galaksija na različitim crvenim pomacima ($z=2, 3, 4$ i 5), pomoću Monte Carlo simulacije, prateći unaprijed definirane površinske profile protojata i uzimajući u obzir pogreške fotometrijskih crvenih pomaka (naspram spektroskopskih crvenih pomaka) specifičnih za COSMOS pregled neba. Simuliranjem 1,000 protojata različitih tipova (prema jatima potomcima ukupnih masa $\geq 10^{15}M_{\odot}$, $3 - 10 \times 10^{14}M_{\odot}$ i $1.37 - 3 \times 10^{14}M_{\odot}$), kvantificirali smo karakteristike metode traženja protojata u COSMOS pregledu neba, poput kompletnosti (broj koji definira udio galaksija nakon izvedene metode traženja, naspram cijelog broja galaksija protojata), kontaminacije (broj koji definira udio galaksija na nebu koji ne pripada protojatu), gustoće broja (broj galaksija na površini neba) i efektivnog radijusa (radijus unutar kojeg se nalazi 68% mase protojata), te njihovo ponašanje za različite tipove protojata i crvene pomake. Također smo izveli metodu traženja protojata pomoću Voronoi dijagrama i metode određivanja ponašanja diferencijalnog viška gustoće (kojem je mjera δ_g) u ovisnosti o udaljenosti od središta protojata. Rezultati pokazuju da se kompletnost protojata ne mijenja u odnosu na crveni pomak, dok kontaminacija očekivano raste sa udaljenosti od središta protojata. Izračunati efektivni radijusi naših simuliranih protojata se slažu do na faktor 2 sa početnim efektivnim radijusima protojata, izračunatim u Chiang et al. (2013). Unatoč tom nepodudaranju, unutar naših efektivnih radijusa nalazi se 55-65% galaksija u protojatu, što je sukladno rezultatima Chiang et al. (2013). Objašnjenje za razlike među radijusima nalazimo u tome što u našim simulacijama nismo uzeli u obzir raspodjelu mase u protojatima. Pretpostavili smo da sve galaksije imaju istu masu, što može značajno utjecati na izračun efektivnog radijusa. Na kraju smo primijenili metode traženja protojata i metodu računanja efektivnog radijusa na postojeća protojata u COSMOS polju, na različitim crvenim pomacima.

Monte Carlo simulations of galaxy protoclusters in COSMOS sky survey

Abstract

Galaxy clusters are large virialized collections of galaxies. Galaxies contribute about 5% to the mass of the cluster, the intracluster medium about 10% and the dark matter up to 85%. These structures are formed from galaxy protoclusters. A protocluster is an early type of cluster with fewer galaxies and an observed higher number density of galaxies, compared to other parts of the observed sky. The goal of this paper is to simulate galaxy protoclusters at different redshifts ($z = 2, 3, 4$ and 5), using Monte Carlo simulations, following the predefined surface profiles of the protoclusters and taking into account the errors of photometric redshifts (versus spectroscopic redshifts) specifically for the COSMOS survey. By simulating 1,000 different types of protoclusters (by the descendant clusters of the total masses $\geq 10^{15}M_{\odot}$, $3 - 10 \times 10^{14}M_{\odot}$ and $1.37 - 3 \times 10^{14}M_{\odot}$), we quantified the characteristics of the search methods of protoclusters in the COSMOS sky survey, such as completeness (a number that defines the share of galaxies derived after search methods, compared to the total number of galaxies in the protocluster), contamination (a number that defines the share of galaxies in the sky that does not belong to the protocluster), number density (number of galaxies on the surface of the sky) and effective radius (radius within which there is 68% of the protocluster mass), and their behavior for different types of protoclusters and different redshifts. The results show that completeness of the protoclusters does not change compared to the redshift, while the contamination expectedly increases with distance from the centre of protoclusters. The calculated effective radii of our simulated protoclusters agree within a factor of 2 with the initial effective radii of protoclusters, calculated in Chiang et al. (2013). Despite this discrepancy within our effective radii, 55-65% of galaxies are in protoclusters, which is consistent with the results of Chiang et al. (2013). We believe that the differences between the radii are caused by the fact that our simulations do not take into account the distribution of the mass in the protoclusters. We assumed that all galaxies have the same mass, which can significantly affect the calculation of the effective radius. In the end we applied the search methods of protoclusters and the method of calculating the effective radius to existing protoclusters in COSMOS field, at different redshifts.

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Modeli kozmološkog razvoja svemira	1
1.2	Grupe, jata i protojata galaksija	3
1.3	Monte Carlo simulacija	7
1.4	Cilj rada	7
2	Podaci	9
2.1	COSMOS pregled neba	9
2.2	Podaci za simulaciju galaksija	11
3	Metoda traženja protojata u COSMOS polju	13
4	Simulacije i analiza simuliranih protojata u COSMOS polju	16
4.1	Simuliranje protojata	17
4.2	Određivanje kontaminacije, kompletnosti i efektivnih radijusa	18
5	Rezultati simulacija	20
6	Primjena rezultata simulacija na stvarna protojata	30
7	Rasprava i zaključak	37

1 Uvod

Nakon nastanka svemira Velikim Praskom (*engl. Big Bang*), svemir je evoluirao kroz različite bitne faze razvoja kao što su inflacijska faza (*engl. inflation era*; vrijeme naglog širenja svemira), bariogeneza (*engl. baryogenesis*; faza stvaranja bariona), nukleosinteza (*engl. nucleosynthesis*; faza stvaranja nukleona) i radijacijsko razdvajanje (*engl. radiation decoupling*; trenutak kad su se materija i elektromagnetsko zračenje razdvojili; Ryden 2006). Taj proces kulminira sa stvaranjem struktura materije i distribucijom galaksija u svemiru te stvaranjem struktura na velikim skalama (Ryden 2006; ¹). Strukture na velikim skalama (*engl. large scale structures, LSSs*) su strukture sazdane od galaksija, grupa i jata galaksija, filamenata (*engl. filaments*, niz većeg broja galaksija) i šupljina (*engl. voids*, prostor praznina). Postojanje LSS-a je uzrokovano postojanjem kvantnih fluktuacija gustoće u ranom stadiju svemira (Ryden 2006; ¹). Postoje dva različita modela kozmološkog razvoja svemira, koji objašnjavaju nastanak struktura poput grupa, jata i protojata galaksija. Jedan model se bazira na hladnoj tamnoj tvari (*engl. Dark Matter, DM*), dok se drugi bazira na vrućoj tamnoj tvari (Ryden 2006). Model vruće tamne tvari je potvrđen kao netočan, raznim promatranjima, simulacijama i teorijskim dokazima.

1.1 Modeli kozmološkog razvoja svemira

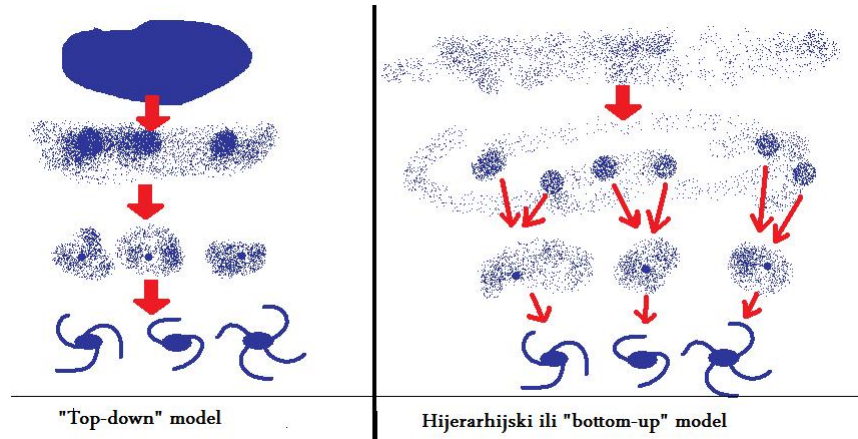
Tijekom radijacijske faze razvoja svemira (prvih 100,000 godina starosti svemira; Sparke & Gallagher 2007), materija se nije mogla zgusnuti (pomoću gravitacijskog djelovanja) zbog jake interakcije između materije i radijacije tj. elektromagnetskog zračenja. Zbog hlađenja svemira, formiraju se prvi vezani atomi (nakon milijun godina starosti svemira, Sparke & Gallagher 2007), te svemir postaje propusan za radijaciju. Ta faza svemira se naziva faza rekombinacije (*engl. recombination*). Nakon rekombinacije i inflatorne faze svemira, materija je bila u stanju sažimanja (povećanja gustoće) ili razdvajanja (disperzije gustoće). U slučaju da gravitacijsko djelovanje nadvlada širenje svemira, gustoća materije se u nekim područjima svemira povećava. Ukoliko širenje nadvlada gravitacijsko sažimanje, u tom slučaju se gustoća materije smanjuje (Ryden 2006; ¹). Stvaranje struktura na velikim skalama ovisi o vrsti tamne tvari (hladnoj ili vrućoj) koja je dominirala svemirom u ranoj fazi evolucije.

Hladna tamna tvar (*engl. cold dark matter, CDM*) se sastoji od masivnih čestica malih brzina (mnogo manjih od brzine svjetlosti, zbog čega se te čestice nazivaju nerelativističke čestice) u vremenu razdvajanja tamne tvari od ostalih komponenata svemira (Ryden 2006). Slabo interagirajuće masivne čestice (*engl. weakly interacting massive particles, WIMPs*)

¹<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec24.html>

su dobar kandidat za CDM. Također, primordijalne crne rupe (nastale u ranoj fazi svemira) i axioni (Peccei & Quinn 1977) su kandidati za CDM. CDM model predviđa nastajanje gravitacijski vezanih struktura malih gustoća i na malim skalama. Spajanjem, one se vežu u veće strukture, rezultirajući nastankom galaksija, zatim sve većih grupa galaksija, rezultirajući nastankom jata galaksija. Takav kozmološki model nastanka struktura u svemiru se naziva hijerarhijskim ili “*bottom-up*” model (Slika 1). Uračuna li se u taj model postojanje i dominacija tamne energije (*engl. dark energy*) u ranoj fazi razvoja svemira (tj. postojanje kozmološke konstante, obilježenom sa Λ), tada se taj kozmološki model naziva model lambda hladne tamne tvari (*engl. Lambda cold dark matter, Λ CDM*).

Vruća tamna tvar (*engl. hot dark matter, HDM*) se sastoji od čestica velikih brzina (usporedivo sa brzinom svjetlosti, koje se nazivaju i relativističkim česticama) u vremenu razdvajanja tamne tvari od ostalih komponenata svemira (Ryden 2006). Takve slabo interagirajuće čestice su ostale relativističke dok svemirom nije počela dominirati materija. Kandidati za takve čestice su neutrimi. U takvom modelu svemira, mase prvih stvorenih struktura su mnogo veće od masa pojedinih galaksija (do $10^{16} M_{\odot}$). Daljnom fragmentacijom tih objekata, nastaju jata i galaksije (Slika 1). Takav model se naziva “*top-down*” model. Opažanja su pokazala da se svemir razvijao po Λ CDM modelu (Ostriker & Steinhardt 1995; Bahcall et al. 1999; Ryden 2006) uz mali utjecaj vruće tamne tvari ukoliko bi neutrimi posjedovali masu, što nedavna istraživanja pokazuju (Fukuda 1998; Ryden 2006; Griffiths 2008; Nieuwenhuizen 2009).



Slika 1: Shematski prikaz “top-down” modela razvoja svemira (lijevo). Iz velikih struktura se fragmentacijom razvijaju manje strukture. U desnom dijelu je prikazan hijerarhijski model razvoja svemira, gdje se postepenim sažimanjem materije i spajanjima manjih struktura formiraju galaksije i jata galaksija.

1.2 Grupe, jata i protojata galaksija

Opazanja su pokazala da polovica svih galaksija u svemiru čine izolirane galaksije, dok je druga polovica nađena u grupama ili jatima (Sparke & Gallagher 2007). Grupe galaksija (*engl. galaxy groups*) su strukture od malog broja (ne više od 50) gravitacijski vezanih galaksija u promjeru do 2 Mpc (Megaparseka²), luminoziteta $L \sim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ ³, i mase do $10^{14} M_{\odot}$ ⁴ (Sparke & Gallagher 2007). Nasumična brzina galaksija u grupi, naspram brzine grupe je oko 150 km/s (Wilman et al. 2005; ⁵), te je samo nekoliko puta veća od rotacijskih brzina zvijezda u galaksijama. Najpoznatija grupa galaksija jest Lokalna Grupa (*engl. Local Group*), koja se sastoji od Mliječne Staze, Andromedine galaksije, Velikog i Malog Magellanovih oblaka i desetak satelitskih (većinom nepravilnih) galaksija (Sparke & Gallagher 2007). Zbog gravitacijskog djelovanja između galaksija u grupi, one imaju tendenciju približavanja i međusobnog spajanja (*engl. mergers*) što dovodi do nastanka plimnih struktura (*engl. tidal structures*) i povećanog stvaranja zvijezda (Barnes & Hernquist 1992). Samo polovica grupa galaksija sadrži plin dovoljno vruć da isijava u rendgenskom području (za što treba biti temperatura većih od 3×10^6 K). Takve grupe imaju veću populaciju i sadrže barem jednu eliptičnu galaksiju (Sparke & Gallagher 2007). Granica između takvih grupa i jata galaksija nije strogo određena.

Jata ili skupovi galaksija (*engl. galaxy clusters*) su najveće poznate gravitacijski vezane skupine galaksija u svemiru (Voit 2005). Jata sadrže od 50 do više stotina i tisuća galaksija, te su virijalizirana (galaksije leže u gravitacijskom potencijalu, gdje se u središtu jata nalaze masivnije galaksije; Sparke & Gallagher 2007; Hatch et al. 2011a; Chiang et al. 2013; Rigby et al. 2013). Zbog velikih relativnih brzina naspram brzine jata (200-1000 km/s; Struble et al. 1999; Rigby et al. 2013), model galaktičkih jata nije moguće reproducirati ukoliko se ne doda još mase u sustav, koja bi gravitacijski jače vezala jato galaksija. Promatranjem ili simulacijama je otkriveno da većinu barionske mase u jatu čine zvijezde i unutar-klusterski plin u prostoru između galaksija unutar jata (tkz. unutar-klusterski medij, *engl. intracluster medium* ili ICM), čiji udio u ukupnoj masi jata može biti i do dva puta veći od galaktičkih (Sparke & Gallagher 2007). Unutar-klusterski plin je visokih temperatura (do 10^8 K, što je ekvivalentno energijama od 1 do 10 keV⁶) koji zrači elektromagnetsko zračenje u rendgenskom području putem lokalnog zakočnog zračenja (*engl. Bremsstrahlung*). Plin utječe na nove galaksije u jatu, na način da njegov tlak (tzv. udarni tlak, *engl. ram pressure*) raspršuje hladan atomski i molekularni plin galaksija

²1 Mpc = 3.09×10^{22} m, Sparke & Gallagher (2007)

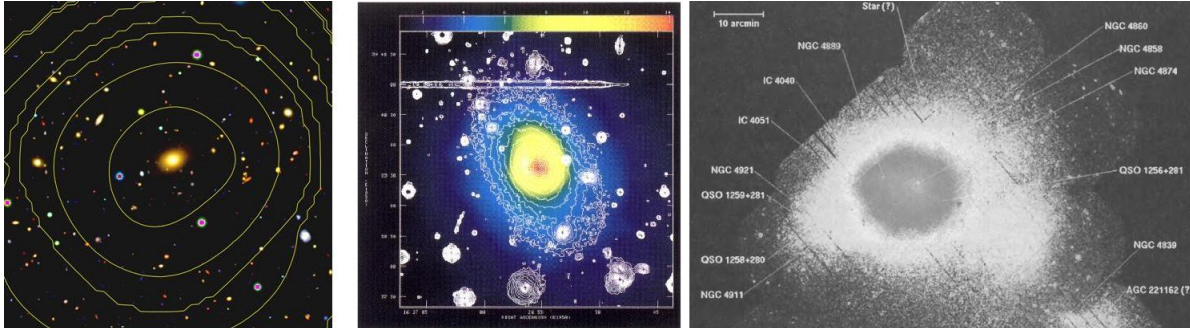
³ $L_{\odot} = 3.86 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ ili $3.86 \times 10^{26} \text{ W}$, Sparke & Gallagher (2007)

⁴ $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$, Sparke & Gallagher (2007)

⁵<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/gclusters/groups.html>

⁶1 eV = $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$, Sparke & Gallagher 2007

(Sparke & Gallagher 2007).



Slika 2: *Lijevo-* prikaz grupe galaksija u COSMOS polju, snimljenu XMM-Newton satelitskim teleskopom (slika je preuzeta sa <http://sci.esa.int/xmm-newton/46325-x-ray-emission-from-a-cosmos-group-of-galaxies/>). Konturama su prikazane rendgenske izofote (linije jednakog intenziteta zračenja), koje su indicacija postojanja vrućeg plina koji emitira rendgensko zračenje. Slika u boji (pozadina) je snimljena Subaru teleskopom u optičkom valnom području. *Sredina-* slika jata galaksija Abell 2199 u rendgenskom području (slika u boji) i vidljivom području (konture). Slika je preuzeta od Owen & Eilek (1998). *Desno-* Slika jata Coma u rendgenskom području, snimljena X-ray Multi-Mirror (XMM) teleskopom, Europske svemirske agencije (ESA) u XMM-Newton opservatoriju. Mozaična slika prikazuje rendgensko zračenje kojem intenzitet raste prema središtu jata. Pojedine galaksije su imenovane na slici. Nepravilan oblik emisije rendgenskog zračenja je indicacija nastanka jata Coma spajanjem manjih podjata galaksija (na način prikazanom na Slici 3, desno). Slika je preuzeta iz Carrol & Ostlie (2007).

Promatranja su pokazala da je zastupljenost željeza (Fe) u ICM oko trećine zastupljenosti u Suncu (Renzini 1997). Pošto se zvjezdana populacija koja je odgovorna za stvaranje Fe nalazi u masivnim, eliptičnim galaksijama i u galaktičkim središtima (koji su se formirali u ranoj fazi svemira, na crvenom pomaku⁷ $z \gtrsim 3$), pretpostavlja se da je većina Fe izbačena iz galaksija u ICM u razdoblju svemira na $z \gtrsim 3$ (Renzini 1997). Promatranja su pokazala da se omjer mase plina i luminoziteta između jata i grupa galaksija razlikuju (grupe imaju puno manju količinu ICM), što dokazuje da jata nisu nastala od grupa sličnih sadašnjim grupama galaksija (Renzini 1997). Postoje različiti modeli nastanka ICM i objašnjenja zastupljenosti metala u ICM. Pod pretpostavkom da su supernove tipa Ia glavni proizvođači Fe (Matteucci & Vettolani 1988), glavnina modela pretpostavlja da su galaktički vjetrovi (*engl. galactic winds*) iz eliptičnih galaksija (prilikom interakcije među galaksijama) uzrokovali porast metaliciteta⁸. Drugi modeli predviđaju nastanak ICM i

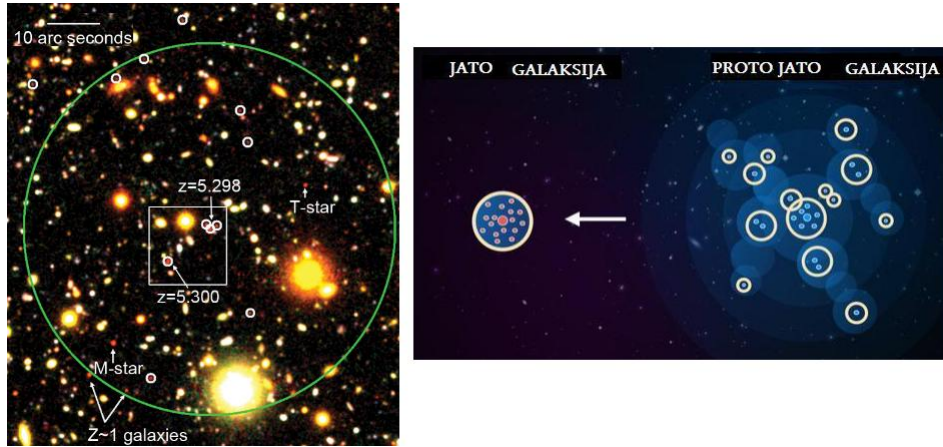
⁷ *engl. redshift, z*

⁸ metalicitet je mjera zastupljenosti metala (elemenata težih od helija) u svemiru (Sparke & Gallagher 2007).

porast metaliciteta zbog udarnog tlaka ICM koji raspršuje galaktički plin u međugalaktički prostor (Hinnes & Biermann 1980) ili nastanak ICM zbog zvijezda populacije III (Loewenstein 2001). Postojanje rendgenskog zračenja u području neba na kojem se traže jata i protojata je dobra indikacija za njihovo postojanje (Lidman 1996). Na Slici 2 su prikazane slike u vidljivom i rendgenskom području za grupu i jato galaksija. Uz ICM i galaksije, tamna tvar igra važnu ulogu u jatu jer čini i do 85% ukupne mase jata (Markovitch, Gonzalez et al. 2004; Giodini et al. 2009). Poznato je nekoliko bliskih jata (Coma, Virgo, Fornax, Perseus, Abell 1656, Abell 426 itd.) koja su nazvana prema zvijezdama u kojima su otkrivena ili prema znanstveniku koji ih je otkrio ili katalogizirao (kao na primjer Abelova jata). Za potrebe ovoga rada, korištene su samo karakteristike jata tipa Coma (ukupne mase $\geq 10^{15} M_{\odot}$), Virgo (ukupne mase $3 - 10 \times 10^{14} M_{\odot}$) i Fornax (ukupne mase $1.37 - 3 \times 10^{14} M_{\odot}$). Jato Virgo je prvi puta otkriveno od strane Williama Herschela u 17. stoljeću. Centar toga jata je od Zemlje udaljen oko 16 Mpc, te se to nepravilno jato sastoji od 250 velikih i 2000 malih galaksija, u prostoru radijusa od 3 Mpc (Carrol & Ostlie 2007). U središtu tog jata se nalaze tri masivne eliptične galaksije (Carrol & Ostlie 2007). Eliptične galaksije čine oko 19% svih galaksija tog jata, dok spiralne čine i do 65% broja svih galaksija (Carrol & Ostlie 2007). Jato Coma (u zvijezdu Coma Berenices) je veliko pravilno jato, veće dimenzije od jata Virgo (promjera oko 6 Mpc) i većeg broja galaksija (oko 10 000), udaljeno oko 15 Mpc od Zemlje (Carrol & Ostlie 2007). Većina eliptičnih galaksija (zajedno sa S0 galaksijama čine većinu galaksija u jatu) su patuljaste eliptične galaksije koje su slabog sjaja, dok spiralne i nepravilne galaksije čine oko 15% galaksija u jatu. Jato Fornax, u čijem središtu se nalazi masivna cD galaksija (divovska eliptična galaksija; Sparke & Gallagher 2007), ima pet puta manji broj sjajnih galaksija od Virgo jata, ali je kompaktnije, sa velikom koncentracijom galaksija u središtu. To je područje među najgušćim područjima otkrivenih u obližnjem svemiru (Sparke & Gallagher 2007). Disperzija brzina za jato Coma jest oko 1000 km/s, za Virgo oko 750 km/s, a Fornax oko 350 km/s (Sparke & Gallagher 2007). U Λ CDM modelu svemira se smatra da su jata nastala iz protojata galaksija.

Protojato (*engl. proto-cluster, PC*) jest predak (*engl. progenitor*) jata galaksija, tj. nevirijalizirani skup galaksija koji još nije postao jato, ali će se s vremenom razviti u njega zbog gravitacijskog djelovanja. Protojata većinom očekujemo na crvenom pomaku $2 \lesssim z \lesssim 7$, tj. u epohi svemira kada je svemir bio mlađi od 3 milijarde godina (Chiang et al. 2013). Te strukture su uočene zbog veće koncentracije galaksija u odnosu na okruženje, koja se mjeri pomoću broja gustoće (*engl. number density*). Disperzija brzine galaksija protojata varira između 100 i 1000 km/s (Toshikawa et al. 2012; Kubo et al. 2015; Kurk et al. 2004). Na Slici 3 se nalaze primjer protojata AzTEC 3 (Capak et al. 2011) i shematski prikaz

evolucije jata iz protojata⁹. Hijerarhijski rast protojata može potaknuti spajanje, pojačano stvaranje novih zvijezda unutar galaksija, što potiče stvaranje sjajnih i aktivnih galaksija. U središtima protojata je uočena prisutnost aktivnih galaktičkih jezgara (*engl. Active galactic nucleus, AGN*; Lehmer et al. 2009) i gustih, sjajnih galaksija, zvjezdorodnih galaksija (rađaonica mladih zvijezda, *engl. starburst galaxies*), koje se nazivaju pod-milimetarskim galaksijama (*engl. submillimeter galaxies, SMGs*; Digby-North et al. 2010; Capak et al. 2011; Smolcic et al. 2012; Riechers et al. 2014; Miettinen et al. *u pripremi*). Otkriveno je da masivni halo DM nisu predispozicija za stvaranje jata, te ključnu ulogu igra distribucija materije u protojatu (Angulo et al. 2012).



Slika 3: *Lijevo-* Prikaz protojata AzTEC 3 koje se nalazi na spektroskopskom crvenom pomaku $z=5.3$ (slika preuzeta iz Capak et al. 2011). Sa kružićima su prikazane galaksije protojata, a s velikom, zelenom kružnicom pretpostavljene granice protojata. *Desno-* shematski prikaz razvoja jata. Neviralizirano protojato galaksija (desno) se razvija u virializirano jato (lijevo) u čijem se središtu nalazi masivna galaksija. Slika preuzeta s web stranice <http://www.as.utexas.edu/~ykchiang/>.

Zbog malog broja otkrivenih protojata (što za posljedicu ima malu statistiku), potrebne su drugačije tehnike opažanja i istraživanja protojata. Jedan od načina jesu simulacije protojata ili njihovog razvoja, koristeći Monte Carlo metodu. Chiang i suradnici su proučavali razvoj protojata i jata u vremenu, pomoću simulacije koja je razapinjala velike fizikalne skale, mase i crvene pomake tj. dugi period vremena (Chiang et al. 2013). Chiang et al. su koristili *Millenium Run (MR)*¹⁰ *dark matter N-body simulation* (Springel et al. 2005) kako bi simulirali razvoj struktura tamne tvari u jatima i protojatima. Koristili su poluanalitički galaktički model (*engl. semi-analytic galaxy model, SAM*) gdje su galaktičke formacije simulirane na bazi pod-halo grana spajanja (*engl. subhalo merger trees*, Chiang

⁹<http://www.as.utexas.edu/~ykchiang/>

¹⁰<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

et al. 2013) tj. galaksije se razvijaju u pod-haloima tamne tvari i interagiraju hijerarhijski. MR simulacija je gravitacijski razvijala 2160^3 čestica tamne tvari (svaka mase oko $\sim 8 \times 10^8 M_\odot h^{-1}$) od crvenog pomaka $z=127$ do sadašnjeg vremena, tj. $z=0$ (Springel et al. 2005). Prateći tu simulaciju Chiang et al. su analizirali 2832 jata galaksija sa ukupnim masama $\geq 10^{15} M_\odot$ (tip 'Coma'), $3 - 10 \times 10^{14} M_\odot$ (tip 'Virgo') i $1.37 - 3 \times 10^{14} M_\odot$ (tip 'Fornax'), na $z=0$. Protojata koja su se razvila u ta jata, su nazvali prema svojim potomcima tj. protojata tipa 'Coma', 'Virgo' i 'Fornax'. Koristeći dane simulacije, Chiang et al. su odredili efektivne radijuse protojata i ponašanje broja viška gustoće galaksija (*engl. overdensity, δ_g*) u odnosu na udaljenost od središta protojata, na različitim crvenim pomacima. Ti podaci su nam služili kao polazne karakteristike po kojima smo u ovom radu simulirali protojata Monte Carlo metodom.

1.3 Monte Carlo simulacija

Monte Carlo metoda ili Monte Carlo simulacija je široka klasa računalnih algoritama koja ima važnu ulogu u svim područjima računalne fizike. Osnovica metode jest nasumično ponavljanje nekog događaja ili nasumično postavljanje ansambla velikog broja objekata ili događaja, sa ciljem dobivanja nekog numeričkog rezultata ili neke tražene raspodjele (Katzgraber 2011). Ime metode i sama metoda se razvila godine 1940. u Nacionalnom laboratoriju u Los Alamosu (*engl. Los Alamos National Laboratory*), gdje su je koristili S. Ulam, E. Fermi, J. von Neumann, and N. Metropolis (Anderson, Herbert L. 1986). Zbog upotrebe računala u korištenju velikog broja nasumičnih brojeva, vjerojatno je metoda dobila ime po Monte Carlo kockarnici u Monacu. Metoda se može koristiti u mnogim područjima fizike kao na primjer hidrodinamici (simulacija toka vode, plinova itd.), nuklearnoj fizici (simulacija teških jezgara), te u astronomiji. Monte Carlo metodom moguće je simulirati rotaciju galaksija (Karas & Matt G. 2006), različite utjecaje različitih raspodjela materijala u zvijezdama i galaksijama (Rocha M. et al. 2008), evoluciju skupova zvijezda i jata galaksija (Kriten et al. 2001).

1.4 Cilj rada

Cilj ovog rada jest Monte Carlo simulacijom generirati protojata na različitim crvenim pomacima i različitih tipova, kako bi se odredile karakteristike nedostataka metode traženja protojata na nebu. Koristili smo fotometrijska opažanja Cosmic Evolution Survey-a¹¹ (COSMOS) pankromatskog¹² pregleda neba (Scoville et al. 2007). Pankromatski pregledi

¹¹<http://cosmos.astro.caltech.edu/>

¹²pankromatski znači da analizira nebo po svim valnim duljinama svjetlosti.

neba su jaki alati za analizu fizikalnih procesa koji se odvijaju u i oko galaksija, na velikom skupu galaksija (različitih pozicija na nebu i različitih udaljenosti tj. crvenih pomaka). Time se može odrediti razvoj svemira i galaksija, zbog mogućnosti pregleda velikog broja galaksija u velikom rasponu crvenih pomaka, a samim time i u različitim periodima razvoja svemira.

Kada promatrač traži protojata na nebu, koristi razne metode kao što su Voronoi teselacija (dijagram koji pokazuje grupiranost galaksija na nebu) i metoda traženja δ_g (mjera viška gustoće galaksija na nebu). Najveći problem na kojeg promatrač nailazi (dok koristi fotometrijska opažanja) jest taj da ne može odrediti koje galaksije pripadaju traženom protojatu, a koje pripadaju galaksijama u polju (*engl. field galaxies*). Galaksije u polju su one koje ne pripadaju protojatima. Također, zbog promatračevog odabira raspona crvenih pomaka, nije moguće reći koliki broj galaksija protojata je vidljivo, a koliko galaksija protojata nije vidljivo (jer im je crveni pomak izvan odabranog raspona). Zbog nedostatka tih informacija, on nije u stanju odrediti npr. efektivni radijus protojata. S obzirom da poznajemo detalje simulacije protojata, tako možemo reći koji udio broja galaksija protojata leži unutar raspona crvenog pomaka (tj. znamo kvantificirati kompletnost protojata) te koje od simuliranih galaksija jesu članovi protojata, a koje su galaksije u polju (tj. znamo kolika je kontaminacija u prostoru protojata). Znajući kompletnost i kontaminaciju te primjenom metode traženja protojata (sa Voronoi teselacijom i δ_g analizom), moguće je odrediti efektivne radijuse protojata na nebu, na različitim crvenim pomacima ($z=2, 3, 4$ i 5) i za različite tipove protojata (Coma, Virgo i Fornax). Za simulaciju protojata smo koristili Monte Carlo metodu.

U Odjeljku 2, objašnjen je izvor podataka za generiranje protojata i simuliranje galaksija u polju, te ovisnost između spektroskopskog i fotometrijskog crvenog pomaka. Metoda traženja protojata na nebu (Voronoi teselacija i δ_g metoda) je objašnjena u Odjeljku 3. Simuliranje galaksija u polju i protojata je prikazano u Odjeljku 4. Znajući položaje galaksija u polju i protojata, odredili smo kontaminaciju i kompletnost protojata, te smo određivali statističko ponašanje broja galaksija i površinske gustoće galaksija kao funkciju udaljenosti od središta protojata. Tom spoznajom bili smo u mogućnosti odrediti efektivni radijus protojata. Za svaki tip protojata (Coma, Virgo, Fornax), na svakom crvenom pomaku ($z=2, 3, 4$ i 5) generirano je 1,000 protojata. Na njima smo u Odjeljku 5, promatrali ovisnost kontaminacije, kompletnosti i efektivnih radijusa o udaljenosti od središta protojata, o crvenim pomacima i o tipu protojata. Služeći se dobivenim rezultatima, primijenili smo metodu traženja efektivnih radijusa na postojećim opaženim protojatima u Odjeljku 6. Diskusija i zaključak slijede u Odjeljku 7.

2 Podaci

2.1 COSMOS pregled neba

Galaksije se u prošlosti često proučavalo tako da se koristio maleni heterogeni skup opaženih galaksija raspodjeljenih morfološki prema tipu galaksija (spiralne, lentikularne, eliptične, nepravilne i njihove podskupine; Boselli 2012). Pankromatski pregledi neba su omogućili promatranje statistički velikog broja galaksija (zbog velike površine neba koje promatraju) u različitim valnim duljinama (sa ciljem opažanja različitih fizikalnih procesa u galaksijama i njihovom okruženju) na različitim udaljenostima tj. različitim crvenim pomacima (Boselli 2012). Jedan od najpoznatijih pankromatskih pregleda neba je COSMOS (Scoville et al. 2007).

Cosmic Evolution Survey (COSMOS) je pankromatski, astronomski pregled neba napravljen sa ciljem ispitivanja stvaranja i evolucije galaksija, brzine stvaranja zvijezda (*engl. star formation rate*, SFR), AGN-ova, DM i LSS-a. COSMOS polje je veličine $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ kvadratna stupnja, smješteno ekvatorijalno (sa ciljem lakše dostupnosti za sve teleskope na objema hemisferama), centrirano u položaju: R.A. (rektascenzija) = $10^{\text{h}}00^{\text{m}}28.6^{\text{s}}$ i DEC. (deklinacija) = $+02^\circ12'21''$ (J2000) (Scoville et al. 2007; ¹³). Polje je promatrano većinom svemirskih teleskopa (Hubble¹⁴, Spitzer¹⁵, Chandra¹⁶, GALEX¹⁷, XMM-Newton¹⁸) te zemaljskim teleskopima (Subaru¹⁹, NOAO²⁰, CFHT²¹, UKIRT²², Magellan²³ i radio-interferometrijska mreža VLA²⁴). Detektirano je 2 milijuna galaksija koje pokrivaju do 75% starosti svemira (crveni pomaci se prostiru i do $z \sim 6$; Scoville et al. 2007). Na COSMOS polju su izvršena opsežna opažanja na različitim valnim duljinama tj. različitim područjima elektromagnetskog spektra: ultraljubičasto (*engl. ultraviolet, UV*), rendgenskog (X-ray), vidljivog, infracrvenog (*engl. infrared, IR*), podmilimetarskog (*engl. sub-millimetre*) i radio područja. Zbog korištenja velikog broja fotometrijskih pojaseva (više od 30; Whitaker et al. 2011), moguće je veoma precizno odrediti fotometrijske crvene pomake objektima. Također u COSMOS pregledu neba su određeni spektri za 10%

¹³<http://cosmos.astro.caltech.edu/>

¹⁴http://hubblesite.org/the_telescope/

¹⁵<http://www.spitzer.caltech.edu/>

¹⁶<http://chandra.harvard.edu/>

¹⁷<http://www.galex.caltech.edu/>

¹⁸<http://sci.esa.int/xmm-newton/>

¹⁹<http://subarutelescope.org/>

²⁰<http://www.noao.edu/>

²¹<http://www.cfht.hawaii.edu/>

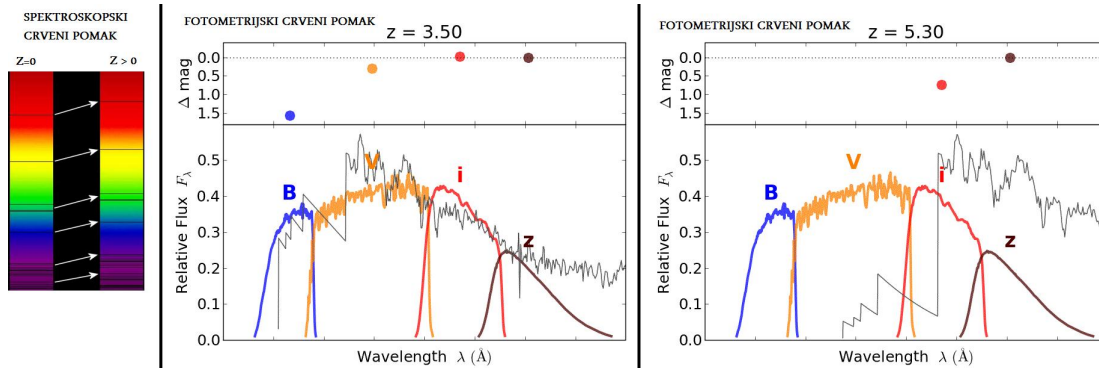
²²<http://www.jach.hawaii.edu/UKIRT/>

²³<http://www.gmto.org/>

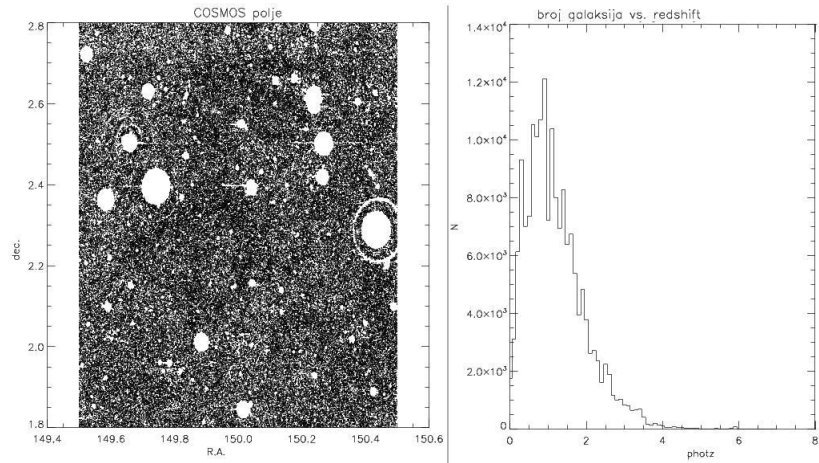
²⁴<http://www.vla.nrao.edu/>

objekata, te time određen i njihov spektroskopski crveni pomak. Usporedbom fotometrijskih i spektroskopskih crvenih pomaka istih objekata, moguće je odrediti preciznost fotometrijskih naspram spektroskopskih (Lilly et al. 2007; Smolčić, Karim et al. 2014).

Spektroskopski crveni pomak (z_{spec}) jest crveni pomak određen pomoću spektralnih linija (Slika 3, lijevo), te je precizniji od fotometrijskog crvenog pomaka. On se određuje mjereći pomake spektralnih linija galaksija koji su uzrok širenja svemira. Što su galaksije dalje od nas, to im je brzina udaljavanja veća, a pomak spektralnih linija prema crvenom veći (Ryden 2006). Fotometrijski crveni pomak (z_{phot}) se određuje pomoću magnituda sjaja galaksije u različitim valnim pojasevima (Slika 4, sredina i desno). Galaksije na različitim udaljenostima će u istim pojasevima imati različiti sjaj. Usporedbom magnituda u pojasevima moguće je odrediti pomak spektra galaksije tj. fotometrijski crveni pomak (Bolzonella et al. 2000). Iako je fotometrijska metoda određivanja crvenog pomaka manje precizna, ona je brža i jednostavnija u određivanju crvenog pomaka velikog broja galaksija.



Slika 4: Pomak spektralnih linija i određivanje spektroskopskog crvenog pomaka je prikazano u lijevom dijelu slike (slika je preuzeta s web stranice <http://lcogt.net/spacebook/redshift>). Određivanje fotometrijskog crvenog pomaka za galaksiju na $z=3.5$ i $z=5.3$ je prikazano u srednjem i desnom dijelu slike (slika je preuzeta s web stranice <http://www.stsci.edu/~dcoe/BPZ/intro.html>). U gornjem dijelu obje slike su prikazane magnitude sjaja galaksija u različitim pojasevima. U donjem dijelu slike su prikazane spektralne energetske distribucije (engl. spectral energy distribution, SED) tj. energetski spektar galaksije (linija sive boje), dok su drugim bojama i slovima (B, V, i, z) prikazani mogući prilagođeni spektri, koji služe za određivanje crvenog pomaka. Galaksije na različitim udaljenostima (različiti crveni pomak) će u različitim pojasevima imati različite vrijednosti magnituda sjaja.



Slika 5: Prikaz galaksija iz kataloga COSMOS pregleda neba (lijevo). Crnim točkama su označene galaksije, dok su neki dijelovi slike (kružni oblici koji predstavljaju zvijezde i sjajna područja neba) izbačeni zbog kontaminiranosti podataka. Raspodjela broja galaksija u odnosu na crveni pomak je prikazana desno.

2.2 Podaci za simulaciju galaksija

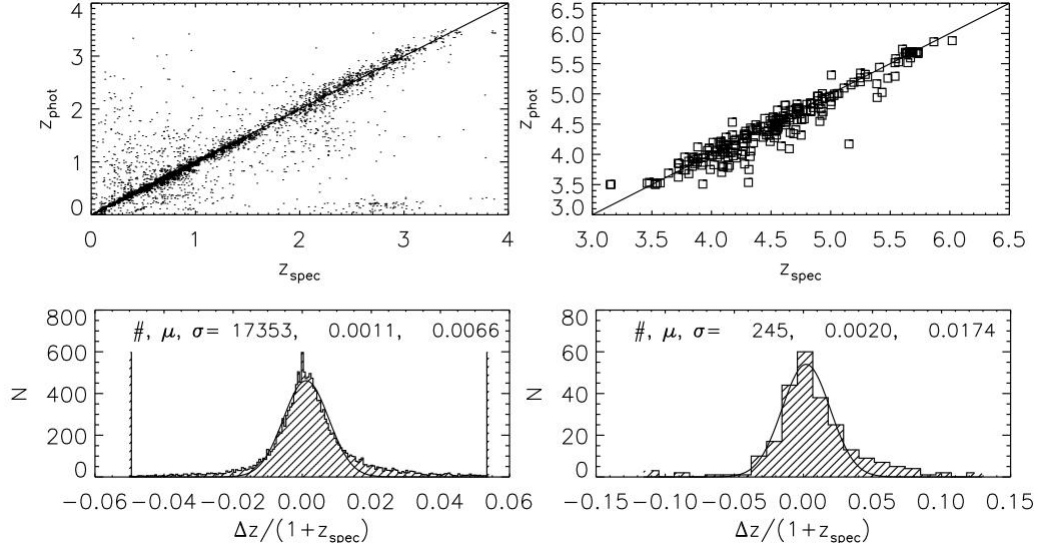
Metoda simuliranja protojata i galaksija u polju (opisana detaljno u Odjeljku 3) se bazira na pridruživanju triju vektora pozicija svakoj simuliranoj galaksiji (vektor deklinacije, vektor rektascenzije i vektor crvenog pomaka) sa nasumičnim vrijednostima. Da bi se te tri varijable precizno mogle simulirati, opisujući podatke u COSMOS polju, potrebno je poznavati:

1. raspodjelu površinske gustoće galaksija na danom crvenom pomaku
2. preciznost fotometrijskog crvenog pomaka (z_{phot}) u COSMOS polju
3. stvarne disperzije brzina galaksija u protojatima

Sve simulacije i obrade slika smo radili u programskom jeziku IDL²⁵.

Da bismo odredili distribuciju površinske gustoće na danom crvenom pomaku, u COSMOS polju, koristili smo COSMOS katalog fotometrijskih crvenih pomaka (Ilbert et al. 2013). U katalogu su dane vrijednosti položaja (rektascenzija i deklinacija) galaksija u polju i pripadajućih crvenih pomaka. Pomoću tih informacija, odredili smo broj površinske gustoće galaksija u polju na određenim crvenim pomacima (Slika 5), koje smo koristili kao osnovu za simulaciju.

²⁵<http://www.exelisvis.com/ProductsServices/IDL.aspx>



Slika 6: *Lijevo-* Usporedba spektroskopskog (z_{spec}) i fotometrijskog (z_{phot}) crvenog pomaka za $z < 3.5$ (u gornjem dijelu). Linija prikazuje omjer između dva crvena pomaka 1:1. U donjem dijelu je prikazana $\Delta z / (1 + z_{\text{spec}})$ raspodjela. Na raspodjeli je prilagođen Gaussian. Na donjem grafu su označeni: broj izvora (17 353), srednja vrijednost raspodjele i standardna devijacija $\sigma_{\Delta z / (1+z)}$. *Desno-* isto kao lijevo samo za galaksije sa crvenim pomacima $z > 3.5$. Na donjem grafu su označeni: broj izvora (245), srednja vrijednost raspodjele i standardna devijacija $\sigma_{\Delta z / (1+z)}$. Slika je preuzeta iz Smolčić, Miettinen, Tomičić et al. *u pripremi*.

Da bismo odredili preciznost fotometrijskog crvenog pomaka, usporedili smo fotometrijske crvene pomake iz gore navedenog kataloga sa dostupnim spektroskopskim crvenim pomacima u COSMOS polju (Salvato et al., *u pripremi*).

Uspoređeni su fotometrijski i spektroskopski crveni pomaci 17 353 galaksija za $z < 3.5$ i 245 galaksija za $z > 3.5$ (Slika 6; Smolčić, Miettinen, Tomičić et al. *u pripremi*; Ilbert et al. 2013) u COSMOS polju. Na Slici 6 je prikazana $\Delta z / (1 + z_{\text{spec}})$ raspodjela, gdje Δz predstavlja razliku spektroskopskih i fotometrijskih crvenih pomaka. Za standardnu devijaciju tih distribucija dobivene su: $\sigma_{\Delta z / (1+z)} = 0.0066$ (za $z < 3.5$), i $\sigma_{\Delta z / (1+z)} = 0.0174$ (za $z > 3.5$). Ove vrijednosti predstavljaju pogrešku u ovisnosti o $1+z$ fotometrijskog crvenog pomaka, u COSMOS polju. Za Monte Carlo simulaciju smo koristili sljedeće vrijednosti: $\sigma_{\Delta z / (1+z)} = 0.007$ (za $z < 3.5$) i $\sigma_{\Delta z / (1+z)} = 0.02$ (za $z > 3.5$). Ovo je glavni doprinos ukupnoj pogrešci koja može uzrokovati sistemske efekte pri traženju protojata u COSMOS polju (detaljnije opisano u sljedećem Odjeljku).

Naposljetku, kako je već navedeno u Odjeljku 1, disperzija brzine galaksija protojata ($\sigma_{v_{\text{los}}}$, gdje je v_{los} brzina u smjeru gledanja, *engl. velocity in line of sight*) je u rasponu od 100-1000 km/s. v_{los} je direktno vezana sa crvenim pomakom preko relacije:

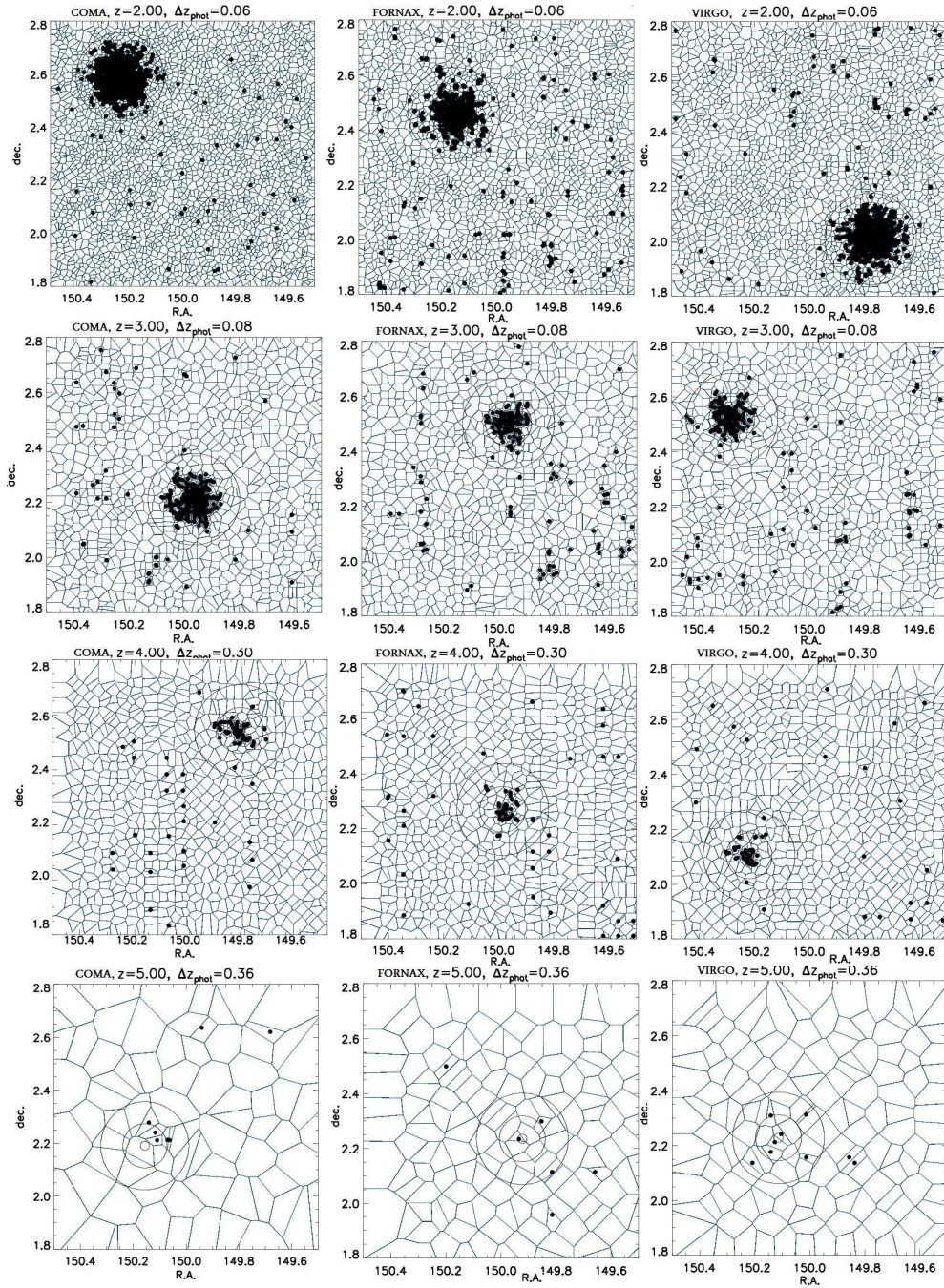
$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v_{los}}{c}}{1 - \frac{v_{los}}{c}}} \quad (1)$$

gdje je c brzina svjetlosti. Disperzija brzina, rasprši crvene pomake galaksija, što smo također uzeli u obzir u našoj simulaciji. Za v_{los} galaksija u protojatu, definirali smo vrijednosti između 200 km/s i 1000 km/s.

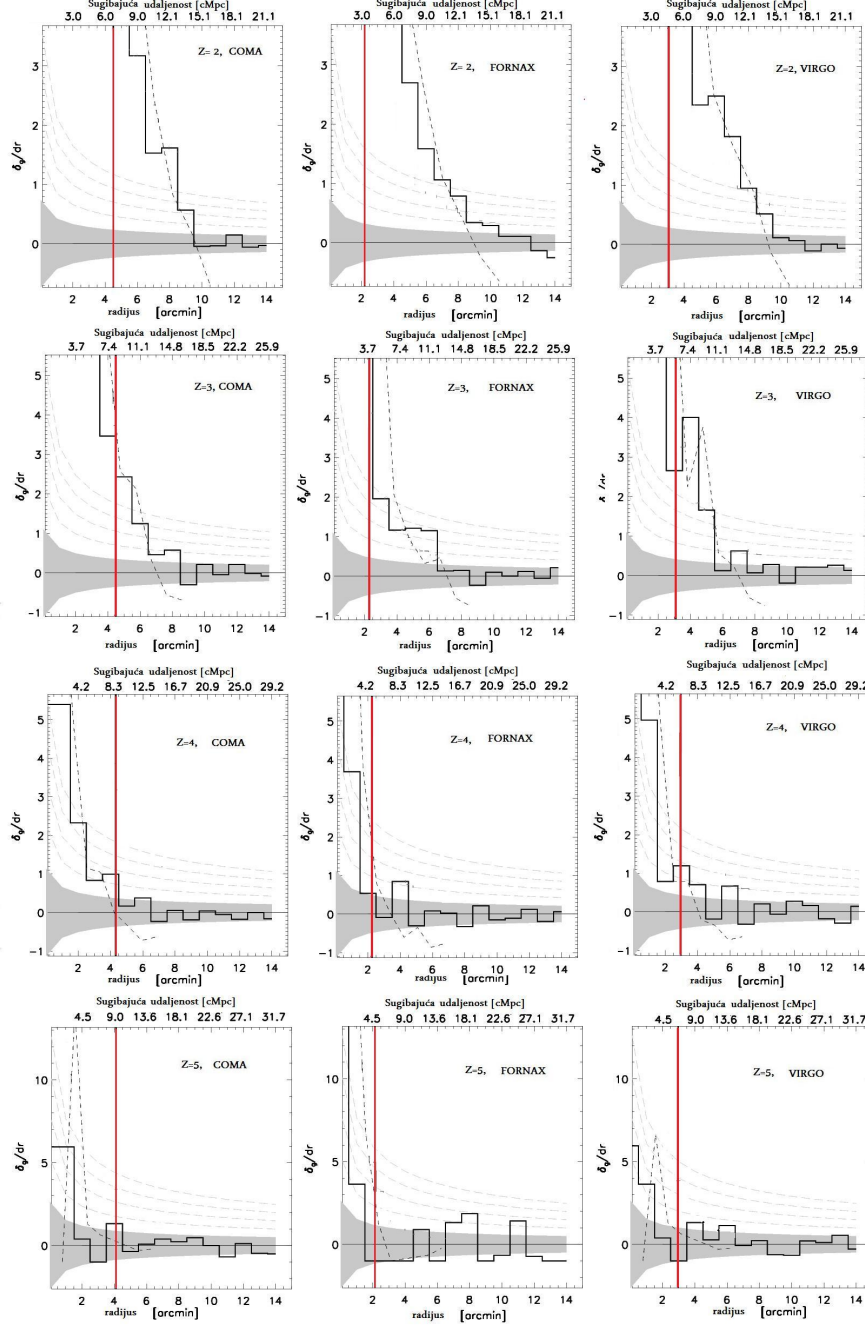
3 Metoda traženja protojata u COSMOS polju

Za detekciju jata i grupiranje galaksija, koriste se različite metode poput “*box count*” (tkz. “*cell count*”, Lidman & Peterson 1996), “*matched filter*” (Postman et al. 1996), Voronoi teselacije i druge. Metoda “*box count*” tj. metoda brojanja u kutiji (čeliji) koristi pomičući prozor (obično pravokutnog oblika) koji se pomiče po nebu i bilježi položaje gdje broj galaksija unutar središnjeg dijela prozora premašuje srednji broj galaksija okolnog područja. Time prozor označava područje viška gustoće galaksija tj. moguće postojanje jata i grupiranja galaksija. Nedostatak metode leži u njenoj ovisnosti o proizvoljnoj veličini, položaju i obliku prozora (Lidman & Peterson 1996; Ramella et al. 2001). Metoda “*matched filter*” koristi algoritam koji analizira neku distribuciju galaksija i pripadajućeg profila sjaja te prilagođava profile različitih modela jata njihovim profilima distribucija galaksija i profilima sjaja. Nedostatak ove metode leži u činjenici da metoda može izbjeći pronalazak onih jata čiji profili (oblika i sjaja) ne odgovaraju pretpostavljenim modelima (Postman et al. 1996; Ramella et al. 2001).

U ovom radu, za određivanje grupiranja galaksija i identificiranje područja sa povećanom gustoćom galaksija, koristili smo metodu koja se temelji na postupku Voronoi teselacije (*engl. Voronoi Tessellation*). Metoda teselacije je sljedeća: ploha (u slučaju ovog rada, radi se o dvodimenzionalnoj plohi), koja sadrži proizvoljno razmješten set točaka tkz. generatora (*engl. Voronoi generators* ili *seeds*), se podjeli u mnogokute tako da svaki mnogokut (tzv. Voronoi ćelija, *engl. Voronoi cell*) sadrži isključivo jednu definiranu točku. Pritom je svaka stranica mnogokuta jednako udaljena od dviju točaka koje razdvaja, a svaki čvor Voronoi mreže jednako je udaljen od tri najbliže točke. Sve točke u prostoru, unutar ćelija su najbliže definiranoj točki te ćelije nego ijednoj drugoj (Ramella et al. 2001; Oklopčić et al. 2010). U ovom radu definirane točke predstavljaju položaje galaksija na nebeskoj sferi. Time je svakoj galaksiji pridružena Voronoi ćelija određene površine, a inverz te površine jest broj površinske gustoće ćelije. To znači, što je ćelija manja, njena površinska gustoća je veća. Primjeri Voronoi dijagrama su dani na Slici 7.



Slika 7: Voronoi dijagrami simuliranih protojata za tri različite vrste (Coma u lijevom stupcu, Fornax u srednjem stupcu i Virgo u desnom stupcu) na crvenim pomacima $z=2, 3, 4$ i 5 (od gore, prema dolje, redom). Voronoi ćelije su identificirane plavim linijama. Crnim točkama su označene galaksije u ćelijama veće površinske gustoće od interkvartilnog raspona. Crnim kružnicama centriranim u središtu protojata su prikazana područja sa radijusima od $1'$, $5'$ i $10'$.



Slika 8: Diferencijalni profil viška gustoće ($\frac{\delta_g}{dr}$ u ovisnosti o r) za simulirana protojata prikazana na Slici 7 (sa istim redoslijedom tipa protojata i crvenih pomaka kao i na Slici 7). Crvenim linijama su označeni efektivni radijusi dani u Chiang et al. (2013). Sivo područje prikazuje $\pm\sigma_{\delta_g=0}(x)$ pogreške, dok isprekidane svijetlo-sive linije prikazuju vrijednosti 2, 3, 4 i 5 puta veće od $\sigma_{\delta_g=0}(x)$. Tamno-sivom isprekidanom linijom su prikazani profili viška gustoće ispravljani zbog nepotpunosti protojata (za detalje vidi Odjeljak 5).

Traženjem protojata, promatramo dio neba unutar zadanog raspona crvenih pomaka ($z_0 \pm \Delta z_{z_0}$). Granice tog raspona (Δz_{z_0}) su definirane prema Smolčić et al. (2014) kao $\Delta z_{z_0} = 1.5\sigma_{\Delta z/(1+z)} \cdot (1+z)$, gdje je σ definirana u Odjeljku 2. Voronoi teselacijom promatranog dijela neba dobivamo Voronoi dijagram kao na Slici 7, na kojem se može zasebno prikazati galaksije viška gustoće (*engl. overdense galaxy*). Kriterij za galaksije viška gustoće jest taj da te galaksije leže u ćelijama površinske gustoće veće od trećeg kvartila raspodjele²⁶. Nakon toga, moguće je odrediti središte područja sa viškom galaksija ("overdensity" područje tj. gušće grupirano područje na nebu).

Sljedeći korak je određivanje gustoće galaksija kao funkcije udaljenosti od središta područja s viškom galaksija ("overdensity" područje), nađenog gore opisanom Voronoi metodom. Vrijednost viška gustoće, dana veličinom δ_g (u nekom kružnom isječku definiranog sa x), se definira kao:

$$\delta_g(x) = \frac{n(x)}{\langle n \rangle} - 1 \quad (2)$$

gdje je sa δ_g definiran višak gustoće broja galaksija na kružnom isječku određene površine. Broj površinske gustoće kružnog isječka je $n(x)$, a $\langle n \rangle$ je srednja vrijednost površinske gustoće galaksija u nekom ansamblu (npr. nasumično odabranih dijelova neba ili jednog velikog dijela neba). Primjeri δ_g dijagrama su dani na Slikama 8 i 9.

4 Simulacije i analiza simuliranih protojata u COSMOS polju

Cilj ovog rada je simulacija protojata u COSMOS polju te kvantificiranje nedostataka metode traženja protojata u COSMOS polju (opisane u prošlom odjeljku) uzimajući u obzir pogreške mjerenja unutar COSMOS pregleda neba (npr. crveni pomaci). U Odjeljku 4.1 se opisuje postupak simulacije protojata u COSMOS polju, a u Odjeljku 4.2 je analiza simuliranih protojata, te određivanje kompletnosti i kontaminacije. Na kraju se opisuje način računanja efektivnog radijusa protojata.

²⁶Ukoliko imamo nekakav uzorak podataka (neku distribuciju mjerenja ili vrijednosti), medijan vrijednost je vrijednost koja dijeli prvu polovicu uzorka podataka (poredanih po vrijednostima) od druge polovice uzorka. Prvi kvartil je broj koji dijeli prvu četvrtinu uzorka podataka od ostatka uzorka, dok treći kvartil dijeli prve tri četvrtine uzorka od zadnje četvrtine uzorka podataka. Raspon između prvog i trećeg kvartila u sebi sadrži polovicu svih podataka. Medijan i kvartili se koriste u sistematici ukoliko neka raspodjela podataka nije simetrična ili nije Gaussova.

4.1 Simuliranje protojata

Prvi korak u simuliranju protojata u COSMOS polju jest stvoriti polje uniformno raspodijeljenih galaksija prateći površinsku gustoću galaksija u COSMOS polju, prikazanu na Slici 5. To smo učinili na sljedeći način: znajući broj galaksija na određenom crvenom pomaku (tj. u određenom segmentu crvenog pomaka), prostor jednog kvadratnog stupnja (koje zahvaća izabrani dio COSMOS polja, na tom crvenom pomaku) smo podijelili na jednak broj pravokutnih dijelova (tako da svaki sadrži samo jednu galaksiju) te unutar svakog tog dijela smo nasumično postavili galaksiju (Slika 10). Razlog korištenja te tehnike jest taj da se galaksije u polju ne grupiraju (detaljnije objašnjenje slijedi u Odjeljku 5). Unutar svakog razreda (*engl. bin*) crvenog pomaka, svim galaksijama smo nasumično dodijelili crveni pomak unutar tog razreda. Tako smo svim galaksijama dodijelili vektore deklinacije, rektascenzije i crvenog pomaka, koje smo koristili za daljnje simuliranje.

Sljedeći korak je simuliranje protojata. Pri tome smo koristili podatke o višku gustoće iz Chiang et al. (2013). Jata se opažački identificiraju pomoću “viška gustoće” (*engl. overdensity*) galaksija, tamne tvari i ICM na skali od 1 Mpc. Chiang et al. definiraju protojato kao strukturu koja se sastoji od galaksija, ICM i haloa DM, koji se sažmu u masivno, kompaktno jato na $z = 0$. Kako postoje jata različitih masa (najmasivniji je “Coma” tip sa $\geq 10^{15} M_{\odot}$, “Virgo” tip sa $3-10 \times 10^{14} M_{\odot}$ i “Fornax” tip sa $1.37-3 \times 10^{14} M_{\odot}$), tako su prema njima nazvani i njihovi preciznosti (protojata tipa Coma, Fornax i Virgo). Chiang et al. (2013) daju profile viška gustoće za svaki tip protojata i za crvene pomake $z=2, 3, 4$ i 5 , prikazane na Slici 9. Prateći te profile simulirali smo protojata.

Svakom protojatu smo nasumično odredili središte u COSMOS polju, na način da protojato ne bude smješteno izvan polja. Kako bismo odredili raspodjelu galaksija protojata oko središta, bilo je potrebno znati površinsku gustoću galaksija protojata ($n(x)$) unutar kružnih isječaka (označenim sa x) oko središta protojata. Taj broj smo dobili koristeći relaciju 2, gdje je $\langle n \rangle$ broj površinske gustoće galaksija u polju. Vrijedi relacija: $\langle n \rangle = N_{bkg}/A_{bkg}$ (gdje je N_{bkg} broj galaksija u polju, na nekom prostoru površine A_{bkg}). U slučaju naše simulacije, N_{bkg} je broj galaksija u polju COSMOS pregleda neba na određenom crvenom pomaku, a površina A_{bkg} jest 1 stupanj kvadratni tj. površina odabranog dijela COSMOS polja. Tako se vrijednost broja površinske gustoće (*engl. number density*) galaksija protojata, $n(x)$ u određenom kružnom isječku (označenim sa x) računa na sljedeći način:

$$n(x) = \frac{N_g(x)}{A(x)} = \langle n \rangle \cdot (\delta_g + 1) = \frac{N_{bkg}}{A_{bkg}} (\delta_g + 1) \quad (3)$$

gdje $N_g(x)$ predstavlja broj galaksija protojata u kružnom isječku, sa površinom vrijednosti $A(x)$.

Tako, krenuvši od središta protojata i početnog kružnog isječka, unutar svakog isječka smo nasumično postavili onoliko galaksija kolika je bila cijelobrojna vrijednost broja $N_g(x)$. Pošto je većina vrijednosti $N_g(x)$ bila manja od jedan (te se time nisu mogle simulirati galaksije), umjesto računanja $N_g(x)$ kružnih isječaka, računali smo zbroj vrijednosti N_g unutar nekog radijusa oko središta. To smo radili sa ciljem određivanja broja simuliranih galaksija unutar zadanog radijusa. Ukoliko je zbroj N_g prešao neku cijelobrojnu vrijednost, tada smo unutar zadanog radijusa simulirali onoliko galaksija koliko iznosi ta cijelobrojna vrijednost. Zatim smo trenutnom zbroju N_g oduzeli iznos te cijelobrojne vrijednosti (kako ne bi simulirali višak galaksija). Nakon tog postupka, izmjerili smo $N_g(x)$ za sljedeći kružni isječak (sa većim radijusom), pridodali tu vrijednost trenutnom zbroju N_g i odredili broj novih galaksija koje je trebalo nasumično postaviti unutar novog radijusa. Time smo simulirali protojato, te svakoj galaksiji dodijelili vektore rektascenzije i deklinacije.

Kako bismo bili u mogućnosti galaksijama dodijeliti fotometrijski crveni pomak, koristili smo vezu između fotometrijskih i spektroskopskih crvenih pomaka danim u Odjeljku 2. Prvo, pretpostavili smo da sve galaksije protojata imaju crveni pomak protojata u kojem se nalaze tj. da su njihovi crveni pomaci $z_0 = 2, 3, 4$ i 5 . Zbog disperzije brzina galaksija (koje smo im nasumično odredili) unutar protojata, njihovi spektroskopski crveni pomaci prate određenu Gaussovu raspodjelu. Vrijednosti tih crvenih pomaka (z) smo odredili koristeći relaciju 1. Koristeći pogrešku fotometrijskog crvenog pomaka u ovisnosti o $z+1$ (Odjeljak 2) COSMOS polja, nasumično su se odredile vrijednosti fotometrijskog crvenog pomaka za sve galaksije protojata. Time smo galaksijama protojata i galaksijama u polju dodijelili sva tri vektora (rektascenzije, deklinacije i crvenog pomaka).

4.2 Određivanje kontaminacije, kompletnosti i efektivnih radijusa

Definirali smo dva karakteristična broja, koja nam služe pri određivanju nedostatka metode traženja protojata na simuliranom nebu, kompletnost i kontaminaciju. Kompletnost protojata (n_{komp}) smo definirali kao:

$$n_{komp} = \frac{N_{pc}^{out}}{N_{pc}^{in}} \quad (4)$$

gdje je N_{pc}^{in} broj galaksija simuliranog protojata, a N_{pc}^{out} je broj galaksija protojata nakon što je primijenjena metoda traženja protojata u COSMOS polju (opisana u Odjeljku 3).

Nadalje smo definirali kontaminaciju protojata (n_{kont}) koja opisuje udio galaksija koje metoda traženja protojata u COSMOS polju identificira, a koje ne pripadaju simuliranom protojatu. Promatrajući neku površinu neba (koju označimo sa x) unutar kruga protojata

(u slučaju ovog rada, ta površina jest kružni isječak oko središta protojata), vrijednost kontaminacije je određena kao:

$$n_{kont}(x) = \frac{N_{bkg}^{out}(x) + N_{pc}^{out}(x)}{N_{pc}^{out}(x)} = \frac{N_{bkg+pc}^{out}(x)}{N_{pc}^{out}(x)} \quad (5)$$

gdje je $N_{pc}^{out}(x)$ već prije definiran broj galaksija protojata nakon provedene metode traženja protojata, na površini x . $N_{bkg+pc}^{out}(x)$ je ukupan broj svih galaksija na površini x , nakon provedene metode traženja protojata. Taj broj je zbroj broja galaksija u polju N_{bkg}^{out} i broja galaksija protojata $N_{pc}^{out}(x)$.

Uzimajući u obzir kompletnost i kontaminaciju, naposljetku računamo efektivni radijus simuliranih protojata, identificiranih metodom traženja protojata u COSMOS polju na sljedeći način. Nakon provedene metode traženja protojata, u svakom kružnom isječku (x) oko središta protojata se odredi ukupan broj galaksija. Taj broj jest $N_{pc+bkg}^{out}(x)$. Znajući broj kontaminacije ($n_{kont}(x)$) u svakom isječku, te broj kompletnosti za protojato (n_{komp}), moguće je odrediti realan broj galaksija protojata (prije provedene metode traženja protojata) unutar danog isječka. Taj broj je diferencijalni broj galaksija protojata u kružnom isječku, $N_{real}(x)$, te se računa sljedećom relacijom:

$$N_{real}(x) = \frac{N_{pc+bkg}^{out}(x)}{n_{komp}} \cdot n_{kont}^{-1}(x) \quad (6)$$

Valja imati na umu da i dalje ne možemo odrediti, koje galaksije pripadaju protojatu, te gdje se nalaze sve galaksije protojata. Znajući diferencijalni broj galaksija po kružnim isječcima oko središta, izračunali smo površinsku gustoću ($n_{dens}(x)$) galaksija, svakog kružnog isječka, na način :

$$n_{dens}(x) = \frac{N_{real}(x)}{A_x} \quad (7)$$

gdje je površina isječka dana sa A_x .

Znajući diferencijalni broj galaksija protojata po kružnim isječcima i radijuse kružnih isječaka (r_i), mogli smo izračunati normirani, integralni broj galaksija ($N_{int}^{<r}$). Taj broj smo dobili tako da zbrojimo sve galaksije unutar nekog radijusa (r_i), te normiramo dani broj sa ukupnim brojem galaksija protojata (N_{uk}) :

$$N_{int}^{<r_i} = \frac{\sum_{j=1}^i N_{real}^j}{N_{uk}} \quad (8)$$

Po simulacijama koje su napravili Chiang et al., protojato se sastoji od nevirijalizira-

nog skupa razdvojenih haloa DM (Slika 3). Stoga su, za određivanje veličine protojata, definirali efektivni radijus kao standardnu devijaciju mase protojata (Chiang et al. 2013). Pošto u Chiang et al. (2013) simuliraju protojata sa određenom raspodjelom mase, što u ovom radu nije bilo moguće, modificirali smo jednadžbu efektivnog radijusa (danim u Chiang et al. 2013), pretpostavljajući da su sve galaksije iste mase. Stoga smo jednadžbu efektivnog radijusa (r_{eff}) izveli, znajući diferencijalni broj galaksija (N_{real}^j) protojata u ovisnosti o udaljenosti (r_j) od središta protojata:

$$r_{eff} = \sqrt{\frac{\sum_j (x_j - x_{cen}^{pc})^2}{N_{uk}}} = \sqrt{\frac{\sum_j N_{real}^j \cdot r_j^2}{N_{uk}}} \quad (9)$$

gdje je x_j položaj svake galaksije, x_{cen}^{pc} položaj središta protojata, r_j radijus kružnog isječka sa diferencijalnim brojem galaksija (N_{real}^j). Na taj način smo odredili efektivne radijuse protojata, nakon provedene metode traženja protojata.

5 Rezultati simulacija

Prema metodi opisanoj u prošlim odjeljcima, simulirali smo 1,000 protojata, za svaki tip (Coma, Virgo i Fornax) na crvenim pomacima $z=2, 3, 4$ i 5 (dakle, ukupno 12,000 simuliranih protojata).

Simulirano COSMOS polje sa galaksijama u polju prikazujemo na Slici 10, gdje smo prikazali primjere na crvenim pomacima $z=2$ i 3 . Važno je istaknuti da smo galaksije u polju namjerno postavili na način opisanim u Odjeljku 4.1, kako bi se galaksije što ravnomjernije rasporedile i kako se ne bi grupirale. Na takav način smo smanjili utjecaj grupiranosti tih galaksija na određivanje površinske gustoće viška galaksija, prilikom provedene metode traženja protojata.

Primjere simuliranih jata za svaki crveni pomak protojata prikazujemo na Slici 11 (lijevi stupac), a raspodjelu fotometrijskih crvenih pomaka galaksija prikazujemo u desnom stupcu Slike 11. U desnom stupcu su također dani broj galaksija protojata, srednja vrijednost raspodjele fotometrijskih crvenih pomaka i standardna devijacija dane raspodjele.

Voronoi dijagrami COSMOS polja sa primjerima simuliranih protojata, su prikazani na Slici 7, za svaki tip protojata i za sve crvene pomake ($z=2, 3, 4$ i 5). Crnim točkama smo označili galaksije koje leže u ćelijama površinske gustoće veće od interkvartilnog raspona (gustoće veće od trećeg kvartila raspodjele). Crnim kružnicama (centriranim u središtu protojata) su prikazana područja sa radijusima od $1', 5'$ i $10'$.

Na Slici 8 su prikazane površinske gustoće viška (diferencijalni δ_g) galaksija kao funkcija

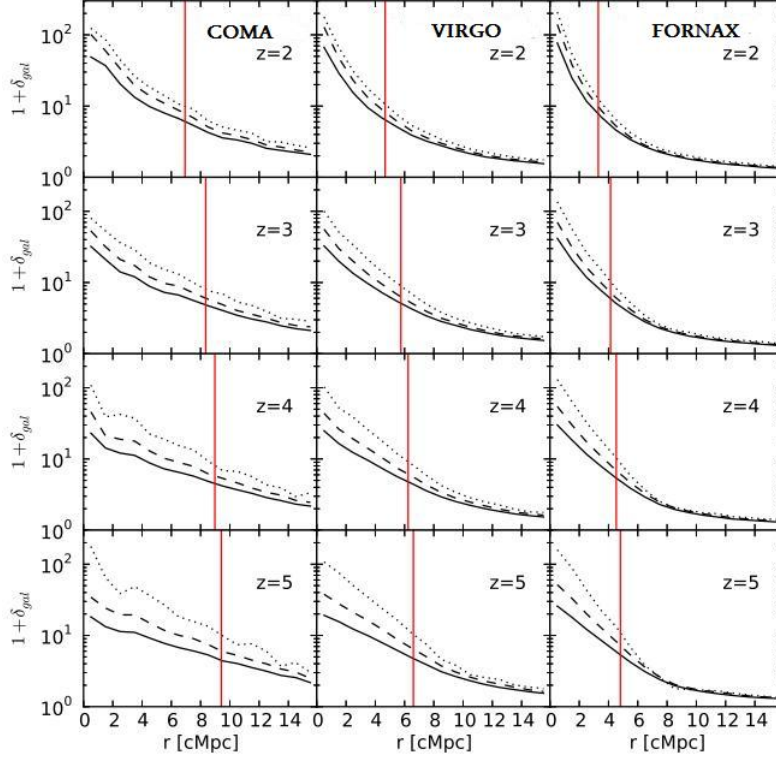
udaljenosti od središta protojata, za ista protojata koja se nalaze na Slici 7. Također su na slici označeni efektivni radijusi protojata, kojeg su izračunali Chiang et al. U slučaju kada je $\delta_g = 0$, tada vrijedi da nema viška gustoće u tom području, naspram okolnog područja. Ukoliko je vrijednost $\delta_g < 0$, tada se radi o manjku površinske gustoće (*engl. underdensity*) galaksija u odnosu na ostatak neba. Što je δ_g na nekom području neba veći, to je vjerojatnost pronalaska kandidata za protojato na tom području veća. Kako bi se odredila važnost δ_g te pouzdanost postojanja protojata, na grafovima Slike 8 su prikazane vrijednosti pogreške $\delta_g(x)$ tj. vrijednosti $\sigma_{\delta_g=0}(x)$. Dana standardna devijacija se računa (uzimajući oznake kao u Odjeljcima 3 i 4) kao:

$$\sigma_{\delta_g=0}(x) = \frac{1}{\langle n \rangle} [\sigma_n^2 + \sigma_{\langle n \rangle}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

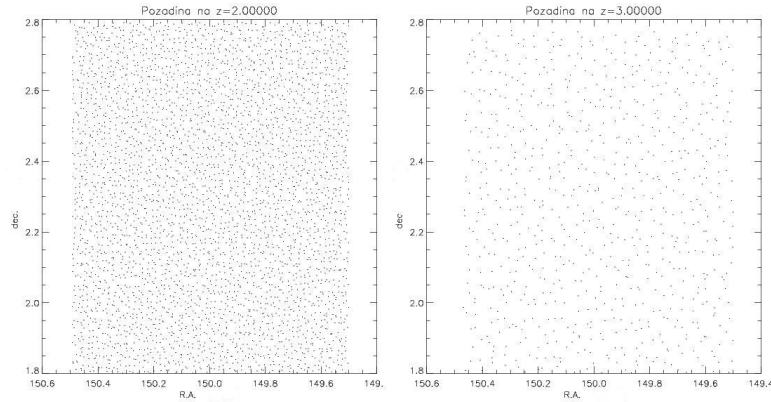
Vrijednost $\langle n \rangle$ je srednja vrijednost površinske gustoće galaksija u nekom ansamblu nasumično odabranih dijelova neba te se zbog statističnosti tog broja može odrediti standardna devijacija tog broja, tj. $\sigma_{\langle n \rangle}$. Pošto se $n(x)$ računa na maloj površini kružnog isječka $A(x)$, njegova fluktuacija u slučaju $\delta_g = 0$ (kada je $\langle n \rangle = n$), prati Poissonovu raspodjelu. Stoga se devijacija tog broja računa kao $\sigma_n = \sqrt{n/A(x)}$. Na grafovima Slike 8 su prikazane vrijednosti $\sigma_{\delta_g=0}(x)$ te vrijednosti 2, 3, 4 i 5 puta veće od $\sigma_{\delta_g=0}(x)$. Također smo prikazali ispravljene profile viška gustoće, uzimajući u obzir kontaminaciju i kompletnost.

U lijevom dijelu Slike 12 smo predstavili primjer ovisnosti diferencijalnog broja površinske gustoće ($n_{dens}(x)$ po kružnim isječcima) galaksija protojata o udaljenosti od središta za jedno simulirano protojato. Diferencijalni broj galaksija protojata (N_{real}/dr) je prikazan u desnom dijelu slike.

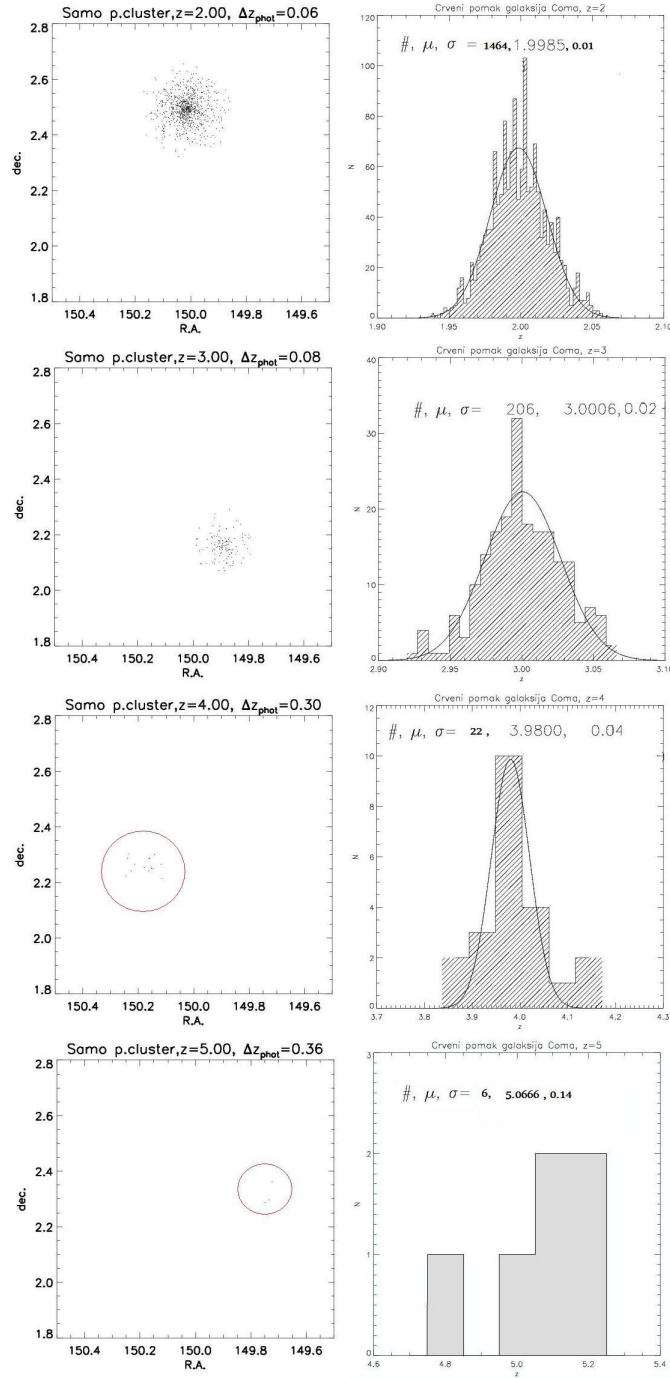
Na Slici 13 smo prikazali primjer ponašanja kontaminacije protojata, u ovisnosti o udaljenosti od središta protojata za tri tipa protojata (Coma, Virgo i Fornax) na $z=2$. Vrijednosti dane na grafu su vrijednosti medijan i interkvartilni rasponi za 1,000 simuliranih protojata po tipu. Radi lakše vizualizacije (kontaminacija raste na većim udaljenostima od središta protojata) prikazali smo vrijednosti $n_{kont}^{-1}(x)$ u odnosu na udaljenost od središta. Ta vrijednost pada na 0 izvan granica protojata.



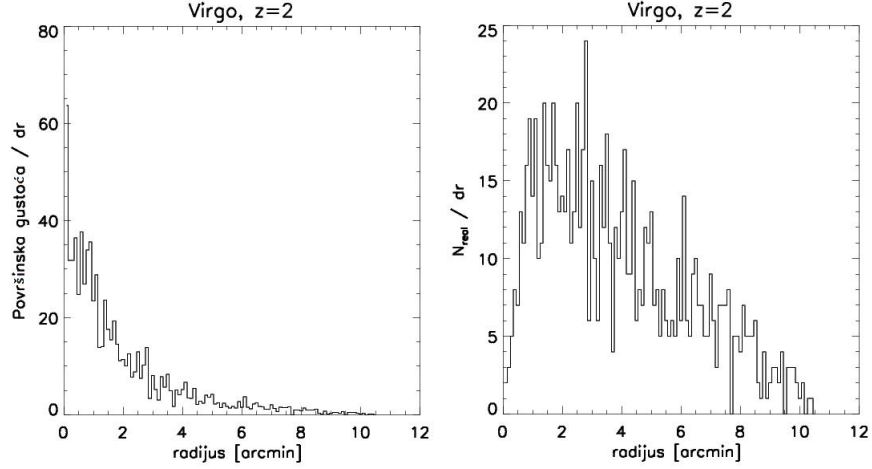
Slika 9: Prikaz diferencijalnog profila viška gustoće, za tri tipa protojata (Coma u lijevom stupcu, Virgo u srednjem stupcu i Fornax u desnom stupcu), za različite crvene pomake $z=2, 3, 4$ i 5 (od gore, prema dolje, redom). Protojata sa galaksijama sa brzinom zvjezdanoga formiranja (*engl. star formation rate*) većim od $>1 M_{\odot} \text{ god}^{-1}$ (kojeg smo mi koristili), $>10^9 M_{\odot} \text{ god}^{-1}$ i $>10^{10} M_{\odot} \text{ god}^{-1}$ su prikazani sa punom, isprekidanom i točkastom linojom. Crvenom linijom su označeni izračunati efektivni radijusi protojata u Chiang et al. (2013). Na apscisi su dane vrijednosti sugibajućih udaljenosti (cMpc), a na ordinati vrijednosti $\delta_g + 1$. Slika je preuzeta iz Chiang et al. (2013).



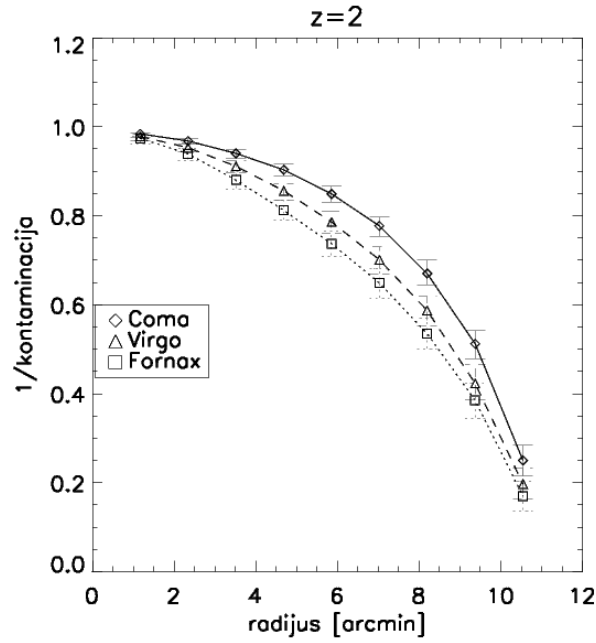
Slika 10: Prikaz simulacije galaksija u polju, za crveni pomak $z = 2$ (lijevo) i $z = 3$ (desno). Crne točke predstavljaju galaksije, dok su na osima prikazane rektascenzija i deklinacija (u stupnjevima).



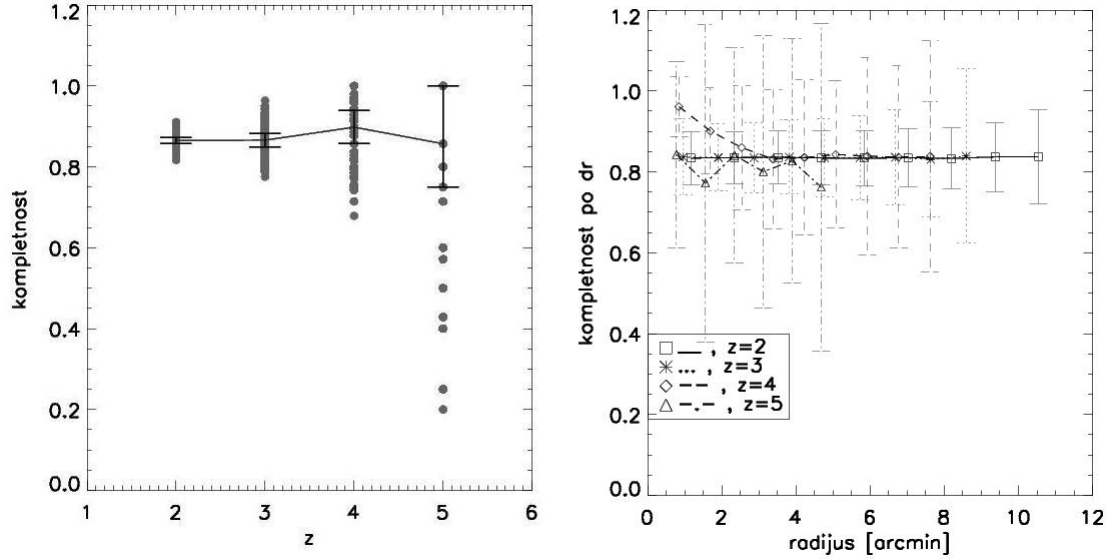
Slika 11: Prikaz simuliranih protojata (lijevi stupac) i raspodjele crvenih pomaka galaksija koji pripadaju protojatima (desni stupac), na crvenim pomacima $z=2, 3, 4$ i 5 (od gore, prema dolje, redom). U lijevom stupcu gdje su prikazana protojata, rektascenzija je prikazana na apcisi, deklinacija na ordinati, te su protojata na $z=4$ i 5 zaokružena. U desnom stupcu, na slikama su ispisane vrijednosti ukupnog broja galaksija protojata, srednje vrijednosti raspodjele crvenog pomaka i pripadajuće standardne devijacije ($\sigma_{z_{phot}}$) Gaussove raspodjele.



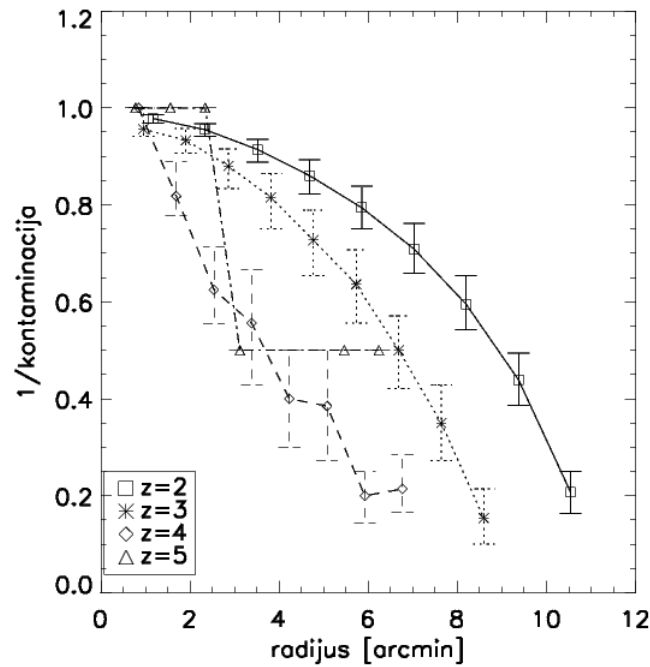
Slika 12: Prikaz diferencijalnog broja površinske gustoće galaksija (lijevo) i diferencijalnog statističkog broja galaksija (desno) u odnosu na udaljenost od središta protojata Virgo. Za detalje vidi tekst (Odjeljak 4).



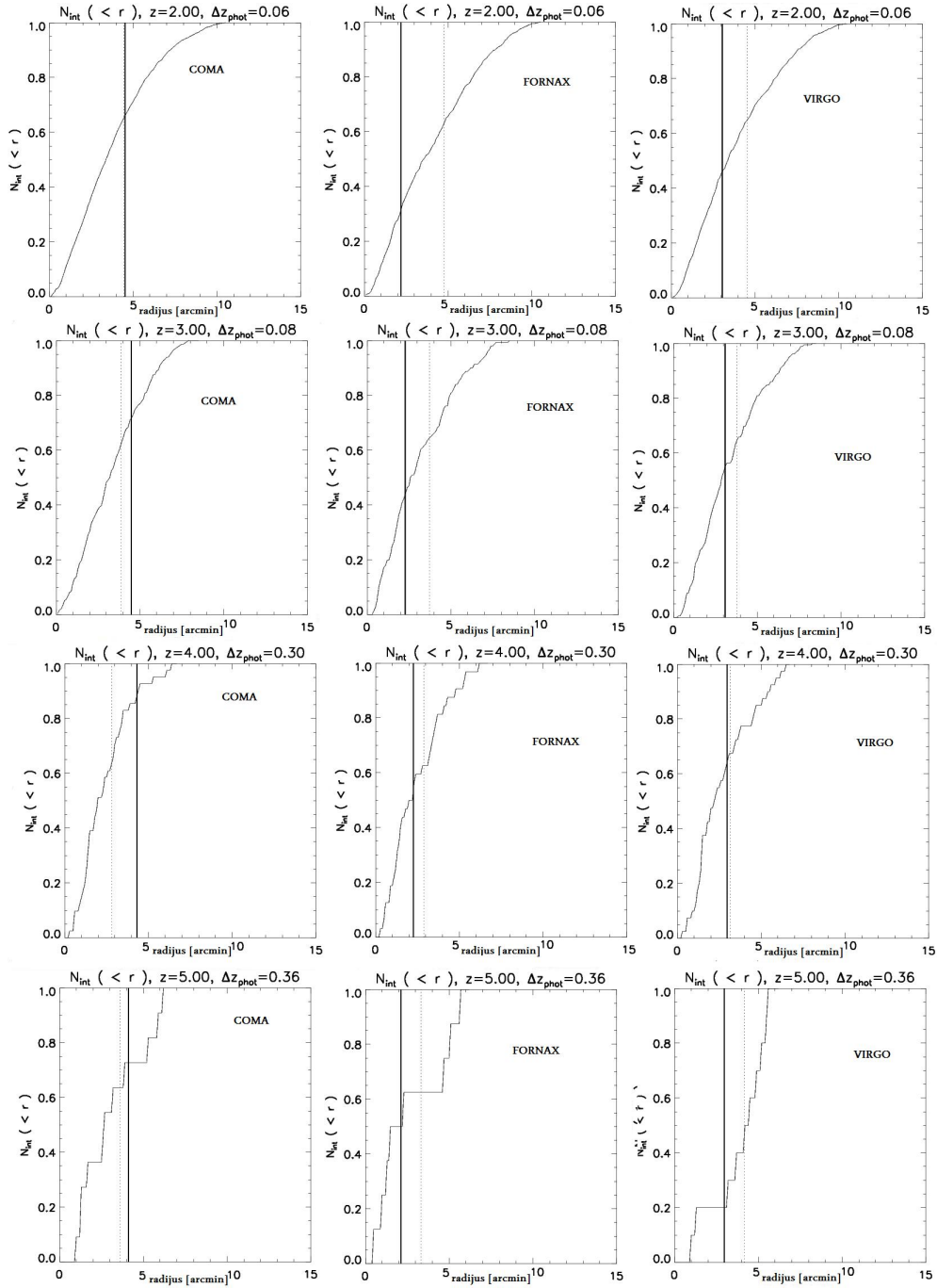
Slika 13: Primjer ponašanja kontaminacije za tri tipa protojata u ovisnosti o udaljenosti od središta, na crvenom pomaku $z=2$. Prikazane funkcije su vrijednosti medijana i interkvartilni rasponi kontaminacija za 1,000 generiranih protojata po tipu. Ponašanje funkcije kontaminacije je prikazano funkcijom n_{kont}^{-1} radi lakše vizualizacije. Za detalje vidi tekst (Odjeljak 4 i 5).



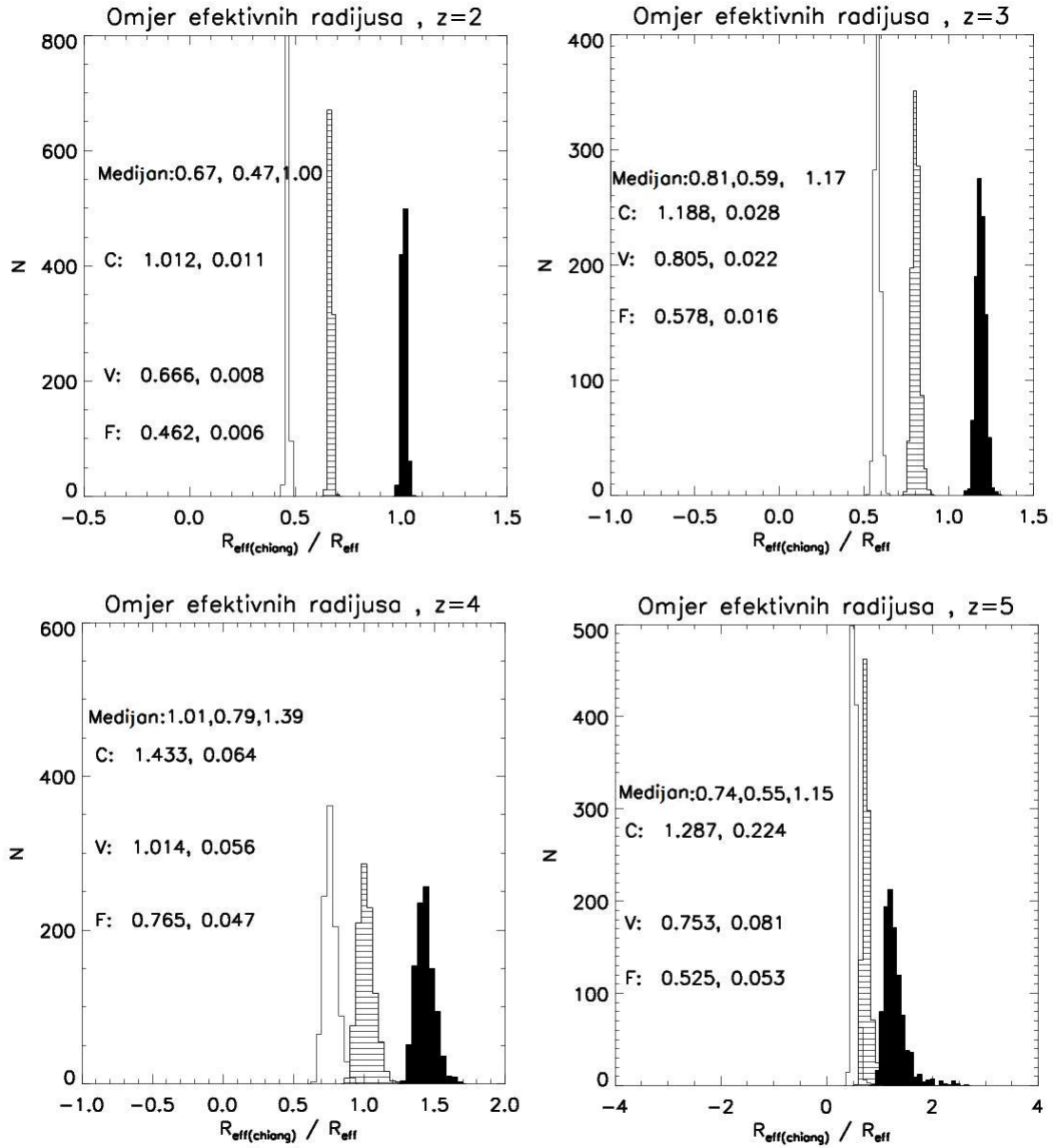
Slika 14: *Lijevo-* Prikaz kompletnosti u ovisnosti o crvenom pomaku. Popunjenim sivim kružnicama su označene vrijednosti kompletnosti svih generiranih protojata, za sve tipove, a s punom linijom je označena vrijednost medijana i interkvartilni raspon kompletnosti cijelog ansambla. *Desno-* Prikaz srednjih vrijednosti i standardnih devijacija vrijednosti kompletnosti u ovisnosti o udaljenosti od središta protojata, za $z=2, 3, 4$ i 5 .



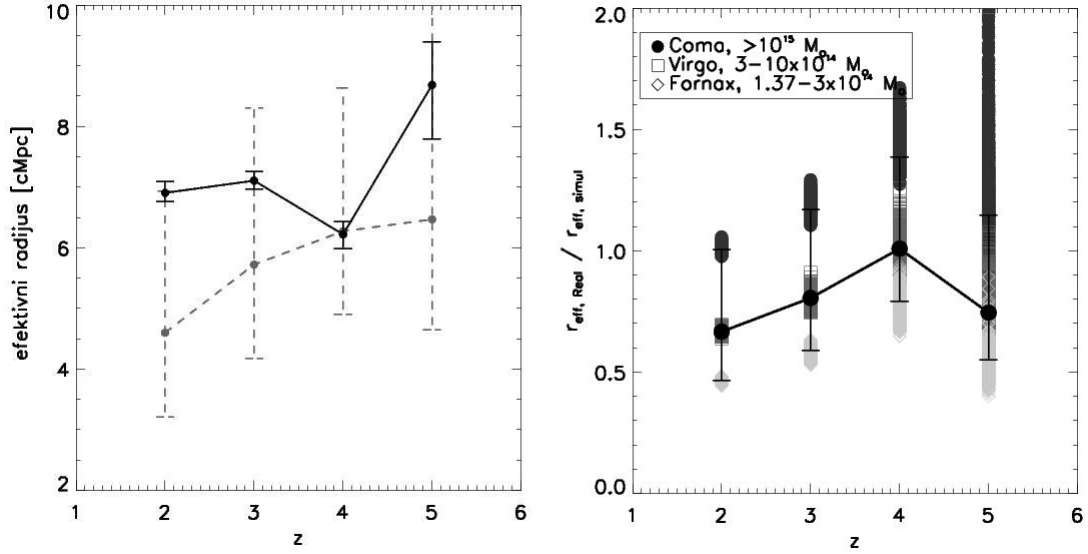
Slika 15: Ponašanje kontaminacije za protojata u ovisnosti o udaljenosti od središta, na crvenim pomacima $z=2, 3, 4$ i 5 . Prikazane funkcije su vrijednosti medijana i interkvartilni rasponi kontaminacija za 1000 simuliranih protojata (za svaki tip protojata na svakom crvenom pomaku). Ponašanje funkcija kontaminacije je prikazano funkcijom n_{kont}^{-1} radi lakše vizualizacije.



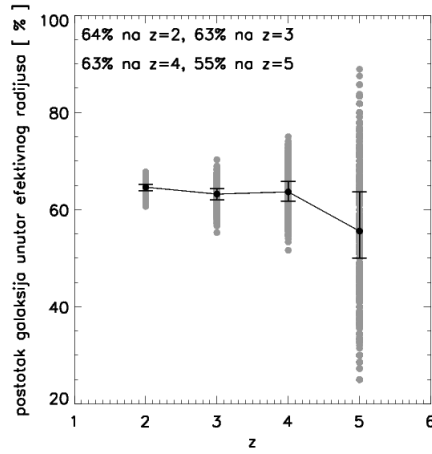
Slika 16: Prikaz ponašanja normiranog, integralnog broja galaksija ($N_{int}^{<r}$) za tri različite vrste (Coma u lijevom stupcu, Fornax u srednjem stupcu i Virgo u desnom stupcu) na crvenim pomacima $z = 2, 3, 4$ i 5 (od gore, prema dolje, redom). Isprekidanom linijom su prikazane vrijednosti izračunatog efektivnog radijusa, dok su sa debljom punom linijom prikazani efektivni radijusi iz Chiang et al. (2013).



Slika 17: Prikaz omjera efektivnih radijusa i radijusa iz Chiang et al. (2013) za različite crvene pomake $z=2$ (lijevo gore), 3 (desno gore), 4 (lijevo dolje) i 5 (desno dolje). Na svakoj slici su ispisane srednja vrijednost (prvi broj) i standardna devijacija (drugi broj) omjera radijusa za sva tri tipa protojata. Slovim, imenom i bojom su označeni različiti tipovi protojata : 'C' i crna boja predstavlja Comu, 'F' i bijela boja predstavlja Fornax, te 'V' i vodoravne linije predstavlja Virgo. U gornjem dijelu slika su prikazane vrijednosti medijana, te vrijednosti prvog i trećeg kvartila, redom.



Slika 18: *Lijevo*- Efektivni radijusi simuliranih protojata u ovisnosti o crvenom pomaku. Crnom linijom su prikazane vrijednosti medijana i interkvartilni rasponi. Sivom isprekidanom linijom je prikazana vrijednost medijan (sa interkvartilnim rasponom) nakon što vrijednosti efektivnih radijusa pomnožimo s omjerom danim u desnom dijelu slike. *Desno*- Omjer realnih efektivnih radijusa (izračunatih od Chiang et al.) i efektivnih radijusa simuliranih protojata u odnosu na crveni pomak. Različitim simbolima i bojama (crno za 'Coma', tamno sivo za 'Virgo' i svijetlo sivo za 'Fornax') su označene vrijednosti za različite tipove protojata.



Slika 19: Postotak galaksija (sivi krugovi) protojata unutar efektivnih radijusa u ovisnosti o crvenom pomaku. Crnim simbolima i linijama su označene vrijednosti medijana i interkvartilnih raspona. U lijevom gornjem dijelu slike su ispisane vrijednosti udijela galaksija koje se nalaze unutar efektivnog radijusa.

Na Slici 14 je prikazana ovisnost kompletnosti o crvenom pomaku (lijevi dio slike) i o udaljenosti od središta protojata (desni dio slike). Dane vrijednosti kompletnosti po crvenom pomaku su vrijednosti medijana i interkvartilni raspon za 1,000 simuliranih protojata po tipu, ne uzimajući u obzir različite tipove protojata (tj. jedna vrijednost medijan kompletnosti po crvenom pomaku pripada ansamblu od 3,000 generiranih protojata po crvenom pomaku). Uočljivo je da se kompletnost ne mijenja sa udaljenosti od središta protojata, stoga ta ovisnost nije uzeta u obzir prilikom računanja efektivnih radijusa.

Na Slici 15 smo prikazali ponašanje kontaminacije u odnosu na udaljenost od središta protojata, za crvene pomake $z=2, 3, 4$ i 5 . Prikazane su vrijednosti medijana i pripadajući interkvartilni rasponi. Radi lakše vizualizacije prikazali smo vrijednosti $n_{kont}^{-1}(x)$ u odnosu na udaljenost od središta.

Zbog toga što prilikom promatranja neba ne znamo kojem tipu protojata pripada promatrano protojato, vrijednosti kontaminacija i kompletnosti smo računali bez obzira na različite tipove protojata. Znajući ponašanje kontaminacije i kompletnosti za različite crvene pomake te rezultate smo koristili (vrijednosti medijana kompletnosti i vrijednosti medijana kontaminacija za pojedine crvene pomake) prilikom računanja efektivnih radijusa.

Na Slici 16 je prikazano ponašanje normiranog, integralnog broja galaksija ($N_{int}^{<r}$) za svaki tip i crveni pomak protojata. Također su označeni efektivni radijusi dani u Chiang et al. (2013) te efektivni radijusi koje smo mi izračunali. Naši efektivni radijusi i radijusi koje su Chiang et al. izračunali se razlikuju. Omjere tih dvaju radijusa smo prikazali na Slici 17.

Na Slici 17 su dani omjeri efektivnih radijusa simuliranih protojata i efektivnih radijusa koje su Chiang et al. izračunali. Za omjere su također ispisane srednje vrijednosti i standardne devijacije, za svaki tip protojata, na crvenim pomacima $z=2, 3, 4$ i 5 . Također su ispisane vrijednosti medijana omjera (vrijednost za cijeli ansambl protojata, ne uzimajući u obzir različite tipove protojata), te pripadajuće vrijednosti prvog i trećeg kvartila.

Na Slici 18 smo prikazali ovisnost efektivnih radijusa o crvenom pomaku protojata (lijevi dio slike) i omjere efektivnih radijusa u ovisnosti o crvenom pomaku (desni dio slike).

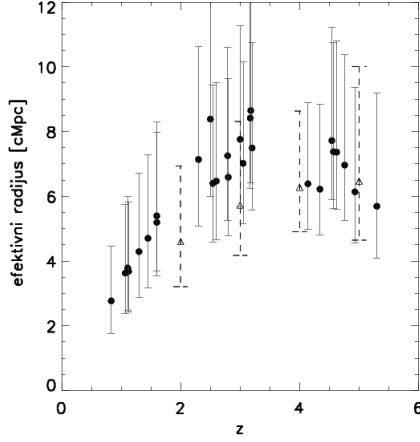
Udio galaksija koje obuhvaća prostor unutar izračunatih efektivnih radijusa u odnosu na crveni pomak, smo prikazali na Slici 19.

6 Primjena rezultata simulacija na stvarna protojata

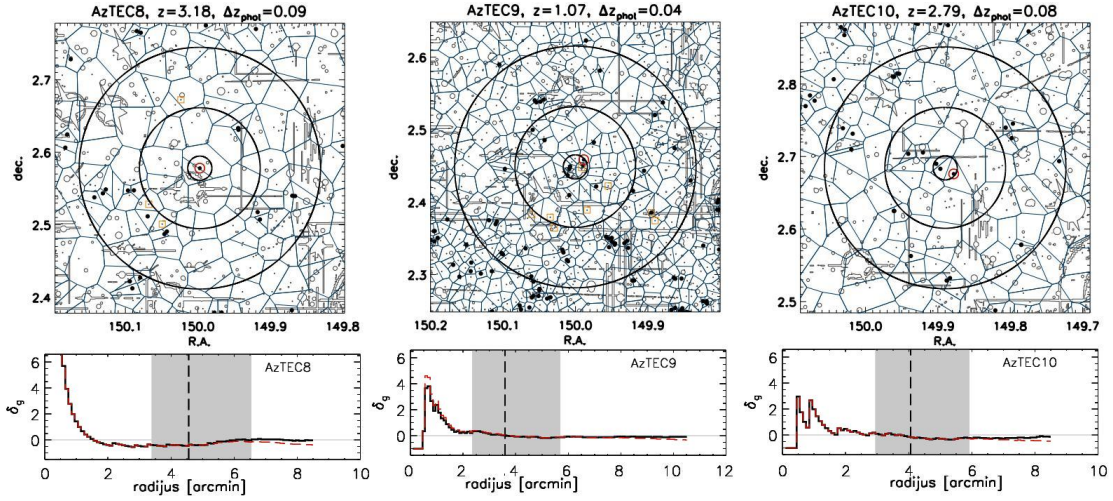
Našu metodu računanja efektivnih radijusa smo primjenili na realnim, opaženim kandidatima za protojata oko SMG (preuzetih iz rada Smolčić, Miettinen, Tomičić, *u pripremi*), galaksija bogatih prašinom koje stvaraju zvijezde velikim brzinama ($>100 \text{ M}_\odot \text{ god}^{-1}$). Većina protojata, na koje smo primjenili našu metodu pripadaju AzTEC protojatima (vidi Tablicu 1). Na Slici 20 se nalaze izračunati efektivni radijusi promatranih protojata u sugibajućoj skali (u sugibajućim Mpc) u odnosu na crveni pomak. Dane su i vrijednosti raspona pogreške.

Slike pojedinih protojata (preuzetih iz rada Smolčić, Miettinen, Tomičić, *u pripremi*) i izračunatih pripadajućih integralnih funkcija δ_g u odnosu na udaljenost od središta područja sa viškom galaksija (drugi i treći stupac Tablice 1) se nalaze na Slici 21. Središte viška gustoće (drugi i treći stupac Tablice 1) je određeno odokativno, te ne leži u promatranom SMG za sva protojata. Crveni pomak SMG u svakom protojatu (Smolčić, Miettinen, Tomičić, *u pripremi*) je prikazan u četvrtom stupcu Tablice 1. Ponašanje stvarnog broja protojata se odredilo koristeći interpolirane vrijednosti za kompletnosti i za kontaminacije (u odnosu na udaljenost od središta protojata). Za kontaminaciju se uzela interpolirana vrijednost krivulje (krivulje prikazanima na Slici 15) za $z=2$ ukoliko je crveni pomak protojata $z \leq 2.5$, krivulje za $z=3$ ukoliko je crveni pomak protojata $2.5 < z \leq 3.5$, krivulje za $z=4$ ukoliko je crveni pomak protojata $3.5 < z \leq 4.5$ te krivulje za $z=5$ ukoliko je crveni pomak protojata $4.5 < z$. Nakon izračunatog broja galaksija, odredio se efektivni radijus, koji se pomnožio sa vrijednostima medijana omjera, izračunatog kao omjer realnog efektivnog radijusa i efektivnog radijusa simuliranih protojata (Slika 18, desno). Tako smo ispravili vrijednosti efektivnih radijusa promatranih protojata (šesti stupac Tablice 1) koje smo prikazali na Slici 21. Zbog interkvartilnog intervala izračunatih omjera, dobiveni efektivni radijusi imaju raspon pogrešaka (prikazanim na Slici 21) čiji smo minimalan i maksimalan iznos prikazali u petom i sedmom stupcu Tablice 1.

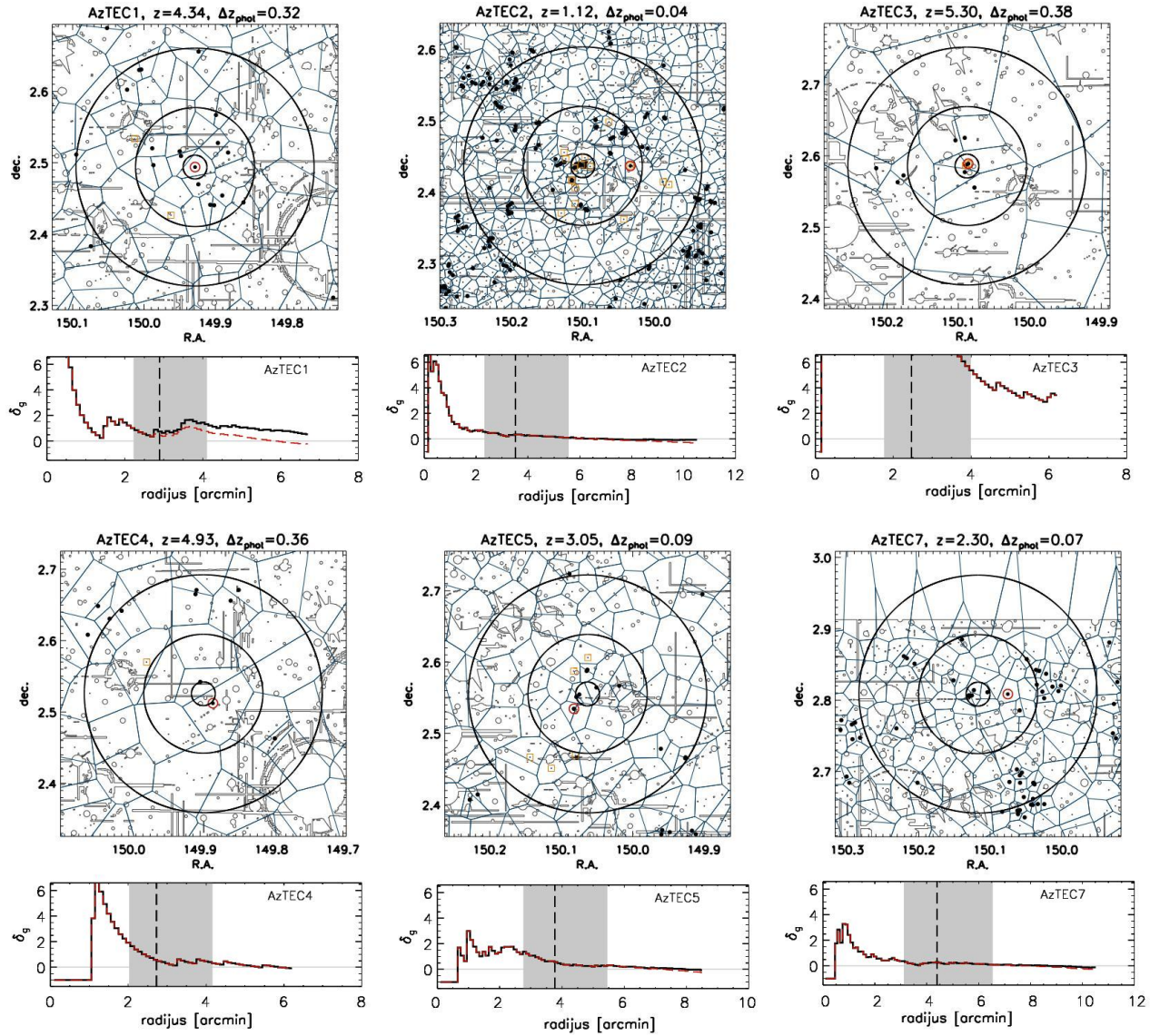
Tražeći δ_g na temelju ponašanja pravog broja galaksija protojata oko središta (znajući kontaminaciju i kompletnost), na Slici 21 smo prikazali integralne δ_g funkcije ispravljene zbog nepotpunosti protojata.



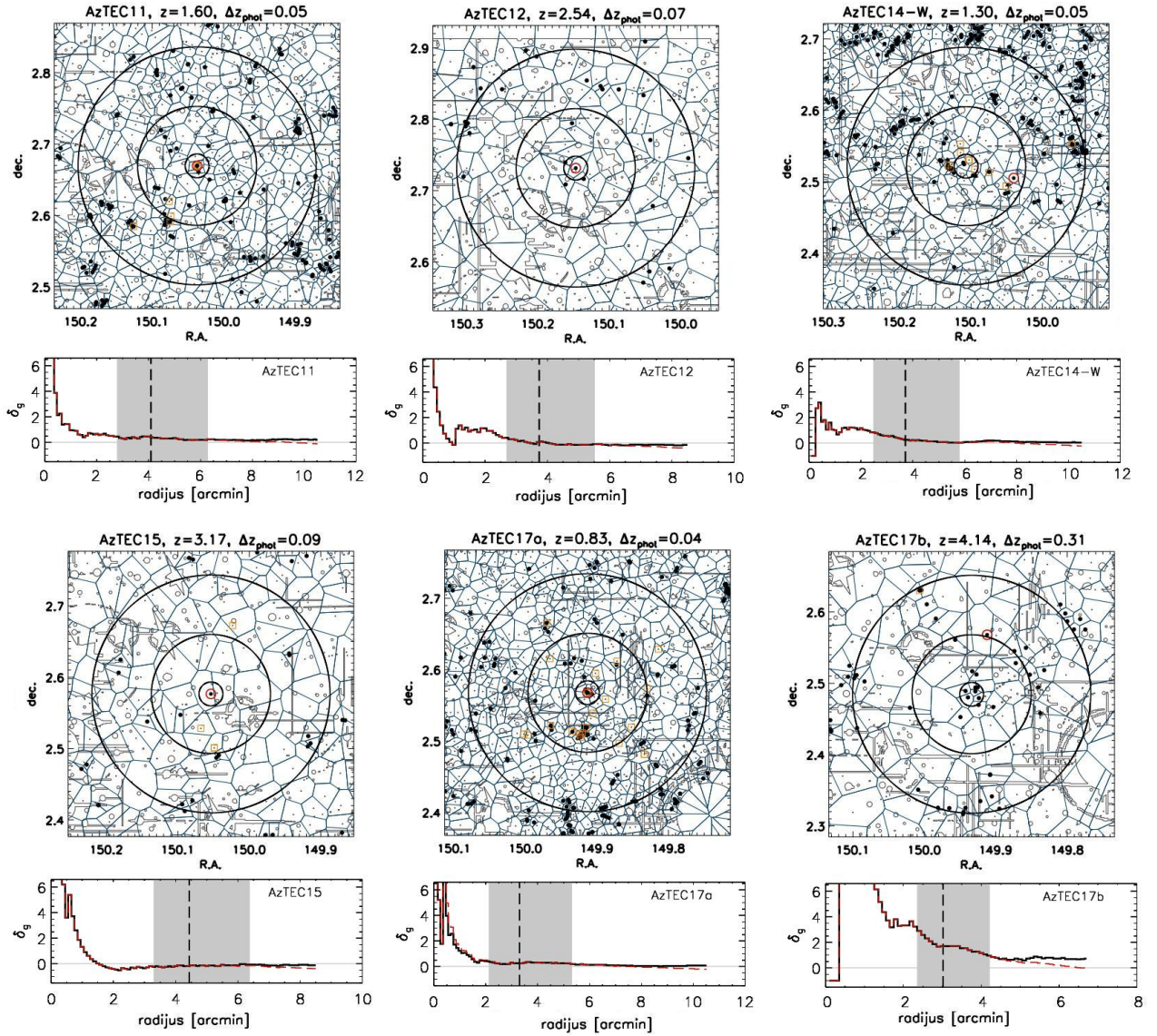
Slika 20: Prikaz vrijednosti i raspon pogrešaka (na sugibajućoj skali cMpc) efektivnih radijusa promatranih protojata u ovisnosti o crvenom pomaku. Sa trokutima i isprekidanim linijama su označene vrijednosti korigiranih efektivnih radijusa simuliranih protojata (označeni sivom isprekidanom linijom na Slici 18, lijevo).



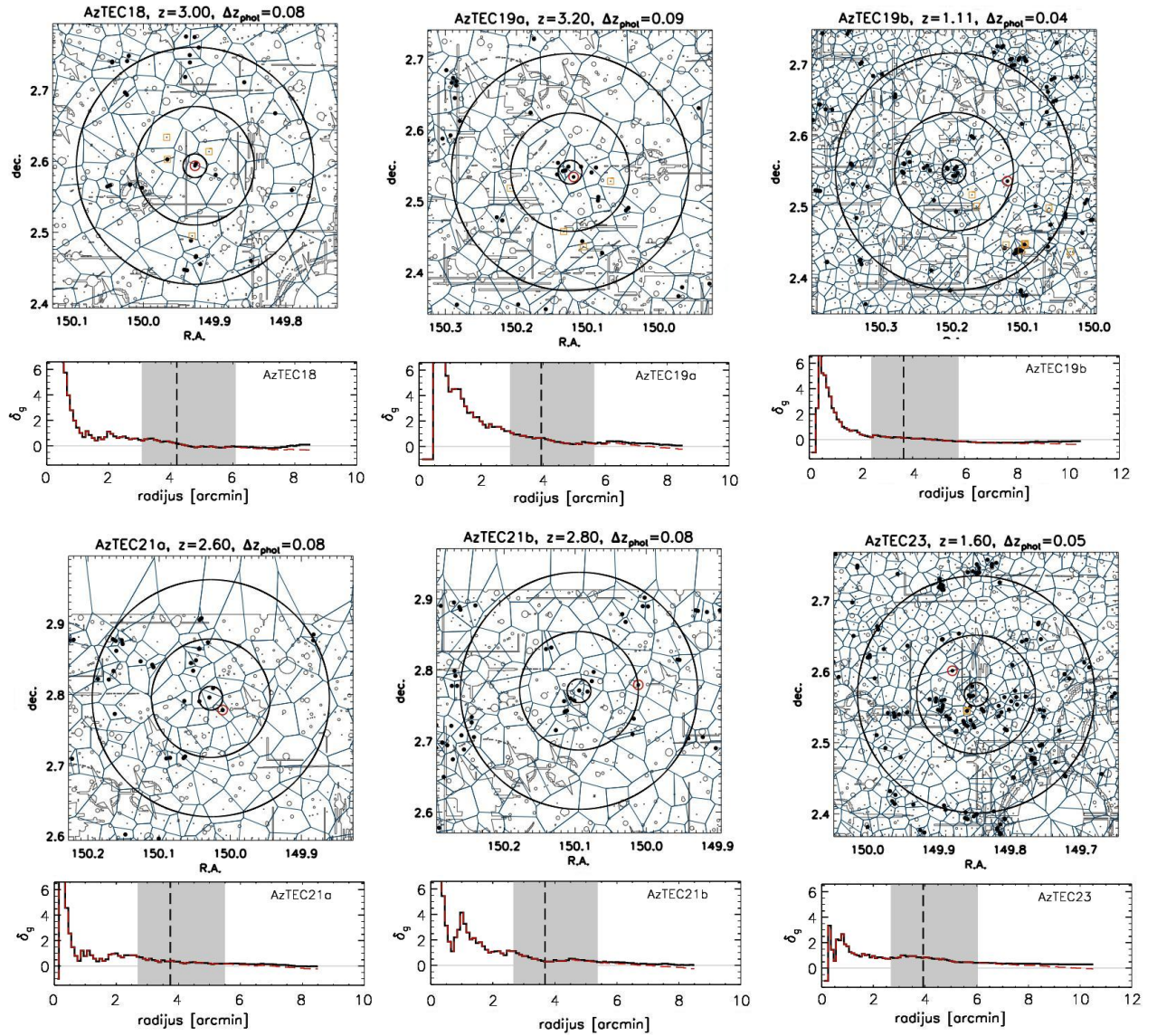
Slika 21: Slike protojata prikazuju rezultat Voronoi teselacije i analize viška gustoće (integralni δ_g). *Gornje slike-* Voronoi dijagrami pojedinih protojata (plavim linijama su prikazani rubovi Voronoi čelija) prikazanim u $25' \times 25'$ području oko promatranih SMG (označenim sa crvenim kružićem). Popunjeni crni kružići predstavljaju galaksije sa fotometrijskim crvenim pomakom unutar raspona $\Delta z = 1.5\sigma_{\Delta z/(1+z)} \cdot (1+z)$ (gdje je z crveni pomak SMG), dok narančasti kvadratići predstavljaju galaksije čiji spektroskopski crveni pomak leži unutar raspona $\pm 0.05 \times z$. Crnim kružnicama centriranim u središtu protojata su prikazana područja sa radijusima od $1'$, $5'$ i $10'$. Područja označena tankim sivim linijama su maskirana područja u COSMOS fotometrijskom katalogu. Slike protojata su preuzete iz Smolčić, Miettinen, Tomićić, *u pripremi*. *Donje slike-* Prikaz integralnog δ_g u odnosu na udaljenost od središta protojata. Prikazani su efektivni radijusi (isprekidana linija) i pogreške (sivo ispunjeno područje). Crvenom isprekidanom linijom su prikazane integralne δ_g funkcije ispravljene zbog nepotpunosti protojata (za detalje vidi Odjeljak 6).



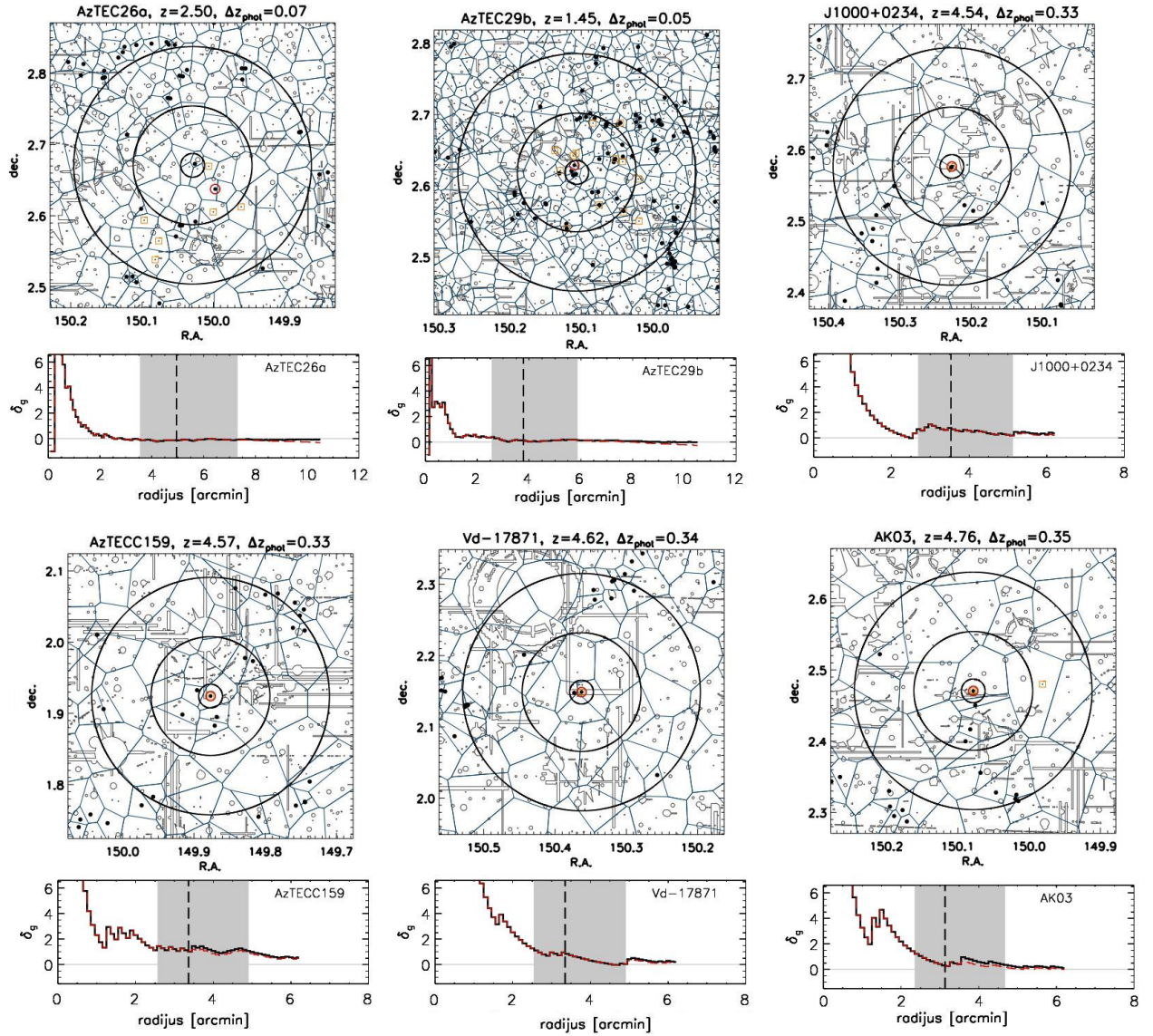
Slika 21: Nastavak.



Slika 21: Nastavak.



Slika 21: Nastavak.



Slika 21: Nastavak.

Tablica 1: Ime protojata, položaj središta (ra i dec, u stupnjevima) i crveni pomak promatranih SMG protojata, te izračunati efektivni radijusi (r) i pripadajuće minimalne i maksimalne vrijednosti (u lučnim minutama).

ime	RA [°]	DEC [°]	z	r_{min} [arcmin]	r [arcmin]	r_{max} [arcmin]
AzTEC1	149.928	2.493	4.34	2.233	2.891	4.109
AzTEC2	150.1	2.436	1.13	2.315	3.517	5.555
AzTEC3	150.087	2.586	5.29	1.769	2.468	3.989
AzTEC4	149.896	2.526	4.93	2.024	2.726	4.159
AzTEC5	150.063	2.555	3.05	2.766	3.768	5.450
AzTEC7	150.117	2.808	2.3	3.119	4.394	6.539
AzTEC8	149.997	2.578	3.18	3.385	4.559	6.542
AzTEC9	150.0	2.449	1.07	2.351	3.591	5.694
AzTEC10	149.890	2.684	2.79	2.941	4.056	5.928
AzTEC11	150.037	2.669	1.6	2.785	4.082	6.274
AzTEC12	150.147	2.732	2.54	2.687	3.744	5.52
AzTEC14-W	150.107	2.522	1.3	2.477	3.71	5.798
AzTEC15	150.054	2.577	3.17	3.295	4.441	6.376
AzTEC17a	149.913	2.568	0.83	2.113	3.304	5.326
AzTEC17b	149.934	2.485	4.14	2.358	3.021	4.209
AzTEC18	149.928	2.594	3.00	3.066	4.196	6.091
AzTEC19a	150.125	2.541	3.2	2.929	3.938	5.644
AzTEC19b	150.197	2.549	1.11	2.4	3.653	5.777
AzTEC21a	150.027	2.795	2.6	2.692	3.742	5.506
AzTEC21b	150.095	2.771	2.8	2.669	3.68	5.376
AzTEC23	149.847	2.568	1.6	2.68	3.928	6.037
AzTEC26	150.029	2.671	2.5	3.543	4.945	7.303
AzTEC29b	150.106	2.619	1.45	2.555	3.784	5.862
Vd-17871	150.363	2.149	4.62	2.541	3.345	4.905
AK03	150.078	2.471	4.76	2.357	3.133	4.673
J1000+0234	150.227	2.576	4.54	2.696	3.531	5.128
AzTEC159	149.877	1.924	4.57	2.564	3.365	4.904

7 Rasprava i zaključak

Voronoi dijagramima na prvi pogled možemo lako identificirati postojanost protojata na malim crvenim pomacima, dok je za crvene pomake $z=4$ i 5 teže izdvojiti protojato od okruženja (Slika 7). Razlog tomu je što na manjim crvenim pomacima protojato sadrži veliki broj galaksija, dok na većim sadrži mali broj. Također, na većim crvenim pomacima, standardna devijacija fotometrijskih crvenih pomaka galaksija raste.

Površinska gustoća viška galaksija kao funkcija udaljenosti od središta (Slika 8), je za $z=2$ i 3 glatka padajuća funkcija, za $z=4$ jest padajuća, ali nije više glatka, dok za $z=5$ pokazuje nepravilno ponašanje. Na manjim crvenim pomacima (za $z=2$ i 3) ona je glatka, zbog velikog broja galaksija protojata, koji se pravilno raspodjeljuju oko središta. Na većim crvenim pomacima to ponašanje izrazito ovisi o statističkoj prirodi simulacije tj. o nasumičnosti postavljanja galaksija na dane koordinate i crvene pomake, zbog malog broja galaksija protojata. Stoga je bilo važno što pravilnije postaviti galaksije u polje, kako bi se što manje grupirale i pritom značajno ne mijenjale δ_g funkciju oko središta. Za razliku od $z=2$ i 3 , diferencijalne δ_g funkcije se ne poklapaju savršeno sa δ_g funkcijama koje su Chiang et al. izračunali. Njihove funkcije su glatke i pravilno padajuće, a razlog tome je što su oni izračunali srednje vrijednosti ponašanja δ_g funkcija velikog broja simuliranih protojata, pri čemu nisu imali poteškoća sa kompletnosti i kontaminacijama. Funkcije prikazane na Slici 8, prikazuju višak gustoće promatranog dijela neba u kojem se ne nalaze sve galaksije protojata (zbog pogreške fotometrijskih crvenih pomaka) te u kojem postoje galaksije u polju (postoji kontaminacija). Stoga smo prikazali ponašanje ispravljene δ_g funkcije, uzimajući u obzir vrijednosti medijana kompletnosti (Slika 14, lijevo) i vrijednosti medijana kontaminacija (Slika 15). No i te krivulje pokazuju odstupanja od krivulja izračunatih od Chiang et al. Razlog vidimo u tome da svako simulirano protojato ima svoje pripadajuće vrijednosti kompletnosti i kontaminacija koje ne moraju odgovarati vrijednostima medijana (velike vrijednosti interkvartilnih raspona na Slikama 14 i 15 su pokazatelji toga). Također vrijednosti za različite tipove protojata pokazuju odstupanja od vrijednosti medijana (primjer je dan na Slici 13 za krivulje kontaminacija za različite tipove protojata na $z=2$) što također valja imati na umu. Sve δ_g funkcije u središtu i oko njega se nalaze na granici ili iznad iznosa $3\sigma_{\delta_g=0}(x)$, što je indikacija postojanja protojata i viška gustoće na tom području. Na manjim crvenim pomacima te vrijednosti su daleko iznad granice (što je razumljivo zbog velikog broja galaksija), dok je za crveni pomak $z=5$ na samoj granici, što otežava mogućnost identificiranja protojata na tom crvenom pomaku.

Na primjeru kontaminacija za različite tipove na Slici 13, vidljivo je da Fornax ima

veću tendenciju kontaminacije u odnosu na protojata tipa Virgo ili Coma. To pripisujemo činjenici da Fornax i Virgo imaju manji broj galaksija od protojata tipa Coma te su im δ_g funkcije manjeg iznosa, na istim udaljenostima od središta protojata (Slika 9).

Na Slici 14 je vidljivo da se vrijednosti medijana kompletnosti protojata u ovisnosti o crvenom pomaku (z_0) značajno ne mijenja. Nasumičnost generiranja fotometrijskih crvenih pomaka galaksija protojata rezultira većom devijacijom kompletnosti protojata. Na crvenom pomaku $z=4$, kompletnost blago raste, dok na crvenom pomaku $z=5$ blago pada. Razlog porastu na $z=4$ vidimo u tome da raspon crvenog pomaka Δz kojeg koristimo prilikom metode traženja protojata, naglo raste na $z=4$ (sa $\Delta z = 0.08$ za $z=3$, na $\Delta z = 0.3$ za $z=4$) dok devijacija raspodjele fotometrijskih crvenih pomaka galaksija (Slika 11, desno) blago raste (sa $\sigma_{z_{phot}} = 0.02$ za $z=3$, na $\sigma_{z_{phot}} = 0.04$ za $z=4$). Kao rezultat se dobiva da kompletnost protojata raste. Na crvenom pomaku $z=5$ raspon Δz se značajno ne mijenja (raste na $\Delta z = 0.36$), dok devijacija naglo raste (na $\sigma_{z_{phot}} = 0.14$), te to uzrokuje blagi pad kompletnosti na $z=5$. Srednja vrijednost kompletnosti protojata po kružnim isječcima se značajno ne mijenja (Slika 14, desno), jer kompletnost ne ovisi o položaju galaksija i protojata, već o crvenim pomacima galaksija koje se dodjeljuju neovisno o položajima i udaljenosti od središta protojata.

Ponašanje kontaminacije u ovisnosti o udaljenosti od središta protojata je prikazano na Slici 15, za različite crvene pomake. Kontaminacija očekivano raste sa udaljenosti od središta protojata. Za crvene pomake $z=4$ i 5 to je ponašanje nepravilnije (čak i nakon generiranja 1,000 protojata po tipu i crvenom pomaku, te funkcije i dalje nisu glatke), zbog malog broja galaksija protojata i galaksija u polju te zbog nasumičnog generiranja položaja tih galaksija. Ako se unutar nekog kružnog isječka ne nalazi galaksija u polju, kontaminacija pada na 1, a ukoliko unutar kružnog isječka nema galaksija protojata a ima galaksija u polju, kontaminacija naglo raste. Taj efekt je izraženiji na većim crvenim pomacima te su stoga krivulje kontaminacija za $z=4$ i 5 nepravilnije. Za krivulje na crvenom pomaku $z=5$, vrijednost medijana kontaminacije jest 1 ili 2 (na Slici 15, to su vrijednosti 1 i 0.5) uz interkvartilni raspon koji je delta funkcija. Razlog tom ponašanju jest veliki broj rezultata za $z=5$, koji daje te dvije vrijednosti kontaminacije. Uzrok tome leži u činjenici da na $z=5$ ima izrazito malo galaksija protojata i galaksija u polju (na $z=5$, u jednom kvadratnom stupnju COSMOS polja ima oko 36 galaksija u polju, vjerojatnost da se neka nađe unutar površine protojata je mala), te je kontaminacija često jednaka 1 (jer nema galaksija u polju) u blizini središta protojata.

Naši rezultati efektivnih radijusa protojata (Slika 16) pokazuju odstupanja od rezultata, te se slažu do na faktor 2 od dobivenih radijusa u Chiang et al. (2013). Standardne devijacije omjera očekivano rastu zbog nasumičnog postavljanja malog broja galaksija

protojata na većim crvenim pomacima. Omjeri radijusa za različite tipove protojata (na različitim crvenim pomacima) te vrijednost medijana svih omjera (i pripadajući interkvartilni rasponi) su dani na Slici 17. Pretpostavljamo da odstupanja nastaju zbog drugačije raspodjele mase unutar protojata, dobivamo drugačije rezultate. Za razliku od nas (gdje smo pretpostavili da sve galaksije naših protojata imaju istu masu), Chiang et al. su u svojim simulacijama uključili, ne samo tip i masu svake pojedine galaksije, već i masu ICM i DM, koje čine do 95% ukupne mase protojata. Zbog različite grupiranosti i raspodjele mase ICM i DM (koja ne mora slijediti distribuciju galaksija) dobivamo drugačije vrijednosti.

Na lijevoj strani Slike 18 su prikazane vrijednosti efektivnih radijusa simuliranih protojata (u sugibajućim skalama). Ukoliko izračunate radijuse ispravimo pomoću omjera (danim u prijašnjem odlomku), dobivaju se vrijednosti efektivnih radijusa koje su Chiang et al. izračunali. Te vrijednosti efektivnih radijusa rastu sa većim crvenim pomakom (Slika 18, lijevo), te se ta krivulja može jasno usporediti sa krivuljama efektivnih radijusa iz rada Chiang et al. (2013) na stranici 4, Slika 2.

Zbog zadane definicije efektivnog radijusa, Chiang et al. dobivaju rezultate u kojima se unutar efektivnog radijusa protojata nalazi do 65% masa pojedinih haloa i do 40% ukupne mase protojata. Kao što je vidljivo na Slici 19, na malim crvenim pomacima ($z=2, 3$ i 4), unutar naših efektivnih radijusa se nalazi oko 63% galaksija (tj. radijus je na $N_{int}^{<r} \approx 0.63$, na Slici 16). Ako bi pretpostavili da nam galaksije predstavljaju haloe unutar protojata, ti rezultati se slažu sa pretpostavkom Chiang et al. Na crvenom pomaku $z=5$, efektivni radijusi sadrže oko 55% galaksija (tj. radijus je na $N_{int}^{<r} \approx 0.55$) uz povećani interkvartilni raspon. Razlog tome leži u statističkoj prirodi postavljanja galaksija, gdje zbog malog broja galaksija standardna devijacija efektivnih radijusa raste (Slika 18, lijevo). Kako bi se problem traženja efektivnih radijusa djelomično riješio, potrebna je dodjela mase svakoj galaksiji po nekoj distribuciji mase. Također je poželjan veći broj generiranih protojata, kako bi rezultati bili kvalitetniji, a raspodjele na većim crvenim pomacima bolje.

Primjenjujući metodu računanja efektivnih radijusa na promatrana protojata, izračunali smo efektivne radijuse te zatim koristili omjere, kako bismo korigirali izračunate radijuse. Omjere (Slika 18, desno) koje smo koristili su omjeri između realnih radijusa (koje su izračunali Chiang et al.) i radijusa simuliranih protojata koje smo mi izračunali. Vrijednosti efektivnih radijusa protojata su dane u Tablici 1 i na Slici 20 (u sugibajućoj skali). Treba imati na umu da mi nismo u stanju reći kojem tipu protojata (Coma, Virgo ili Fornax) pripadaju promatrana protojata. Na Slici 20 je uočljivo da efektivni radijusi rastu sa porastom crvenog pomaka, te da je iznos tih radijusa unutar prihvatljivog raspona, tj. prema očekivanjima koje su Chiang et al. izračunali (na Slici 20 se nalaze vrijednosti

korigiranih radijusa simuliranih protojata).

Integralne δ_g funkcije i pripadajuće korigirane δ_g funkcije (Slika 21) se dobro slažu za gotovo sva protojata, uz određena odstupanja na udaljenostima od središta protojata većim od efektivnih radijusa. AzTEC9 i AzTEC17a pokazuju odstupanja tih funkcija unutar efektivnog radijusa i blizu središtima protojata, čiji uzrok leži u drugačijoj raspodjeli galaksija protojata i raspodjeli galaksija koje se uočava na nebu. AzTEC1 pokazuje veća odstupanja tih dviju funkcija, dok nekoliko drugih protojata sadrže odstupanja na rubovima protojata (izvan efektivnog radijusa).

Literatura

- [1] Anderson, Herbert L. , Metropolis, Monte Carlo, and the MANIAC. // Los Alamos Science , 14, 96–108 (1986)
- [2] Angulo, R.E. ; Springel, V., White, S.D.M., et al. , The journey of QSO haloes from z 6 to the present. // MNRAS, 425, 2722 (2012)
- [3] Bahcall, N.; Ostriker, J.P.; Perlmutter, S.; Steinhardt, P.J., The Cosmic Triangle: Revealing the State of the Universe. // Science, 284 (1999), Iss. 5419, p. 1481
- [4] Barnes, J. E.; Hernquist, L. , Dynamics of interacting galaxies. // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 30 (1992), p. 705-742
- [5] Bolzonella, M.; Miralles, J.-M.; Pelló, R., Photometric redshifts based on standard SED fitting procedures. // A&A, 363, p.476-492 (2000)
- [6] Boselli, A., A Panchromatic View of Galaxies., Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2012
- [7] Capak, P. L.; Riechers, D.; Scoville, N. Z., et al. , A massive protocluster of galaxies at a redshift of $z \approx 5.3$. // Nature, 470, 233 (2011)
- [8] Carrol, B. W.; Ostlie, D. A., An Introduction to Modern Astrophysics. 2nd ed. San Francisco (CA), USA: Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley, 2007
- [9] Chiang, Y.; Overzier, R.; Gebhardt, K. , Ancient Light from Young Cosmic Cities: Physical and observational signatures of galaxy proto-clusters. // ApJ, 779, 127 (2013)
- [10] Digby-North, J. A.; Nandra, K.; Laird, E. S., et al. , Excess AGN activity in the $z = 2.30$ Protocluster in HS 1700+64 // MNRAS, 407, 846 (2010)

- [11] Fukuda, Y.; Hayakawa, T.; Ichihara, E., Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super-Kamiokande's First 300 Days. // Phys. Rev. Lett., Volume 81 (1998), Issue 6
- [12] Giodini, S.; Pierini, D.; Finoguenov, A., et al. , Stellar and total baryon mass fractions in groups and clusters since redshift 1. // Apj, 703, 982 (2009)
- [13] Griffiths, D., Introduction to Elementary Particles. // WILEY-VCH , Weinheim (Germany) , second edition (2008)
- [14] Hatch, N. A.; De Breuck, C.; Galametz, A., et al., Galaxy protocluster candidates around $z \sim 2.4$ radio galaxies // MNRAS, 410, 1537 (2011a)
- [15] Hinnes, A.; Biermann, P., Models of the evolution of galaxies in groups and clusters. // A&A, 86 (1980), 11
- [16] Ilbert, O.; McCracken, H. J.; Le Fèvre, O., et al., Mass assembly in quiescent and star-forming galaxies since $z=4$ from UltraVISTA // A&A, 556, A55 (2013)
- [17] Karas, V.; Matt, G., Monte Carlo simulations of dusty gas discs around supermassive black holes ; IAU Symposium No. 238 (2006)
- [18] Katzgraber, H. G., Introduction to Monte Carlo Methods. Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University College Station, Texas, USA, 2011.
- [19] Joshi , K. J.; Nave , C. P.; Rasio, F. A., et al., Monte Carlo Simulations of Globular Cluster Evolution. II. Mass Spectra, Stellar Evolution, and Lifetimes in the Galaxy. // ApJ, 550, 691 (2001)
- [20] Kurk, J.; Venemans, B.; Röttgering, H., et al., Proto-clusters associated with radio galaxies from $z=2$ to $z=4$. // Astrophysics and Space Science Library, 301 (2004), pp 141-144
- [21] Kubo, M.; Yamada, T.; Ichikawa. T., et al., NIR spectroscopic observation of massive galaxies in the protocluster at $z=3.09$. // ApJ, 799, 38 (2015)
- [22] Lehmer, B. D.; Alexander, D. M.; Geach, J. E., et al., The CHANDRA deep protocluster survey: evidence for an enhancement of AGN activity in the SSA22 protocluster at $z=3.09$. // ApJ, 691, 687 (2009)
- [23] Lidman, C. E.; Peterson, B. A., An Optically Based Search for Distant Galaxy Clusters. // AJ, 112, 2454 (1996)

- [24] Lilly, S. J.; Le Fèvre, O.; Renzini, et al., zCOSMOS: A Large VLT/VIMOS Redshift Survey Covering $0 < z < 3$ in the COSMOS Field. // ApJS, 172 (2007), p. 70-85
- [25] Loewenstein, M., The contribution of population III to the enrichment and preheating of the intracluster medium. // ApJ, 557 (2001), 573L
- [26] Nieuwenhuizen, Th. M. , Do non-relativistic neutrinos constitute the dark matter? // EPL, 86 (2009), 59001
- [27] Markevitch, M.; Gonzalez, A. H., et al., Direct constraints on the dark matter self-interaction cross section from the merging galaxy cluster 1E 0657. // ApJ, 606:819–824 (2004)
- [28] Matteucci, F., Vettolani, G., Chemical abundances in galaxy clusters - A theoretical approach. // A&A, 202 (1988), 21
- [29] Miettinen, O.; Smolcic, V.; Novak, M., (Sub)millimetre interferometric imaging of a sample of COSMOS/AzTEC submillimetre galaxies - I. Multiwavelength identifications and redshift distribution. // A&A, (2015), *u pripremi*
- [30] Oklopčić, A.; Smolčić, V.; Giodini, S., et al., Identifying dynamically young galaxy groups via wide-angle tail galaxies: a case study in the COSMOS field at $z=0.53$. // ApJ, 713, 484 (2019)
- [31] Ostriker, J.P. , Steinhardt, P.J., The observational case for a low-density Universe with a non-zero cosmological constant. // Nature, 377 (1995), Iss. 6550, p. 600.
- [32] Owen, F. N.; Eilek, J. A. , The Complex Core of Abell 2199: The X-Ray and Radio Interaction. // ApJ, 493 (1998), p.73–80
- [33] Peccei, R. D.; Quinn, H. R. , CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles.// Phys. Rev. Lett., 38, 25 (1977): 1440
- [34] Postman, M.; Lubin, L.; Gunn, J. E., et al., The Palomar Distant Clusters Survey. I. The Cluster Catalog. // AJ, 111, 615 (1996), P96
- [35] Ramella, M.; Boschin, W.; Fadda D.; Nonino, M., Finding galaxy clusters using Voronoi tessellations. // A&A, 368, 776-786 (2001)
- [36] Renzini, A., Iron as a tracer in galaxy clusters and groups. // ApJ, 488 (1997), p. 35-43

- [37] Riechers, D. A.; Carilli, C. L.; Capak, P. L., et al., ALMA Imaging of Gas and Dust in a Galaxy Protocluster at Redshift 5.3: [C II] Emission in "Typical" Galaxies and Dusty Starbursts 1 Billion Years after the Big Bang. // ApJ, 796, 84 (2014)
- [38] Rigby, E. E.; Hatch, N. A.; Röttgering, H. J. A., et al., Searching for large-scale structures around high-redshift radio galaxies with Herschel. //MNRAS, 437, 2, p. 1882-1893 (2013)
- [39] Rocha M.; Jonsson, P.; Primack, J. R., et al., Dust attenuation in hydrodynamic simulations of spiral galaxies. //MNRAS, 383, 1281–129 (2008)
- [40] Ryden B., Introduction to Cosmology. Department of Astronomy, The Ohio State University (2006), p. 255-281
- [41] Salvato et al., u pripremi
- [42] Scoville, N.; Aussel, H.; Brusa, M., et al., The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): Overview // ApJS, 172, 1 (2007a)
- [43] Smolčić, V.; Aravena, M.; Navarrete, F., Millimeter imaging of submillimeter galaxies in the COSMOS field: redshift distribution. // A&A, 548 (2012), pp. 34
- [44] Smolčić, V.; Karim, A.; Miettinen, O.; Novak, N., et al., Physical properties and environment of $z > 4$ submillimeter galaxies in the COSMOS field. // A&A, (2014) *prihvaćeno*
- [45] Smolčić, V.; Miettinen, O.; Tomičić, N., et al., A search for galaxy overdensities and protoclusters around submillimetre galaxies in the COSMOS field. // A&A, (2015), *u pripremi*
- [46] Sparke S. L. & Gallagher J.S., Galaxies in the Universe: An Introduction ; in Cambridge University Press (2007), p. 278
- [47] Springel, V.; White, S. D. M.; Jenkins, A., et al., Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars // Nature, 435, 629-636 (2005)
- [48] Struble, M. F.; Rood, H. J., A Compilation of Redshifts and Velocity Dispersions for ACO Clusters. // ApJS, 125 (1), (1999), 35–71
- [49] Toshikawa, J.; Kashikawa, N.; Ota, K., et al., Discovery of a protocluster at $z \sim 6$. // ApJ, 750, 137 (2012)

- [50] Voit, G.M., Tracing cosmic evolution with clusters of galaxies. // Rev. Mod. Phys., vol. 77, Issue 1 (2005), pp. 207-258
- [51] Whitaker, K. E.; Labbe, I.; Dokkum, v. P.G., et al., The NEWFIRM Medium-Band Survey: photometric catalogs, redshifts, and the bimodal color distribution of galaxies out to $z \sim 3$. // ApJ, 735, 86 (2011)
- [52] Wilman, D. J., Balogh, M. L., Bower, R. G., et al., Galaxy groups at $0.3 \leq z \leq 0.55$ - I. Group properties. // MNRAS, 358, 71–87 (2005)
- [53] Bayesian Photometric Redshifts: Introduction, <http://www.stsci.edu/~dcoe/BPZ/intro.html>, preuzeto 6.2.2015
- [54] CFHT: Canada France Hawaii Telescope, <http://www.cfht.hawaii.edu/>, preuzeto 6.2.2015
- [55] Chandra X-ray Observatory, <http://chandra.harvard.edu/>, preuzeto 6.2.2015
- [56] Cosmic Evolution Survey, <http://cosmos.astro.caltech.edu/>, preuzeto 6.2.2015
- [57] ESA: XMM-Newton, <http://sci.esa.int/xmm-newton/>, preuzeto 6.2.2015
- [58] ESA: X-ray emission from a COSMOS group of galaxies, <http://sci.esa.int/xmm-newton/46325-x-ray-emission-from-a-cosmos-group-of-galaxies/>, preuzeto 7.2.2015
- [59] GALEX: Galaxy Evolution Explorer, <http://www.galex.caltech.edu/>, preuzeto 6.2.2015

- [60] Giant Magellan Telescope, <http://www.gmto.org/>, preuzeto 6.2.2015

- [61] Groups of Galaxies, <http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/gclusters/groups.html>, preuzeto 7.1.2015.

- [62] Hubble Space Telescope, http://hubblesite.org/the_telescope/, preuzeto 6.2.2015

- [63] Las Cumbres Observatory: Redshift , <http://lcogt.net/spacebook/redshift>, preuzeto 6.2.2015

- [64] NASA Spitzer Space Telescope, <http://www.spitzer.caltech.edu/>, preuzeto 6.2.2015

- [65] NOAO: National Optical Astronomy Observatory, <http://www.noao.edu/>, preuzeto 6.2.2015

- [66] NRAO: Very Large Array, <http://www.vla.nrao.edu/>, preuzeto 6.2.2015

- [67] Origin of structures, <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec24.html>, preuzeto 7.2.2015

- [68] Subaru Telescope, <http://subarutelescope.org/>, preuzeto 6.2.2015

- [69] UKIRT: United Kingdom Infrared Telescope, <http://www.jach.hawaii.edu/UKIRT/>, preuzeto 6.2.2015

- [70] Yi-Kuan Chiang: *Ancient Light from Young Cosmic Cities*, <http://www.as.utexas.edu/~ykchiang/>, preuzeto 6.1.2015