

Polje COSMOS i pankromatski pregled neba

Ivor Vice Bulaja

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička cesta 32, Zagreb

Mentorica: prof. dr. sc. Vernesa Smolčić

21. siječnja 2025.

Sažetak

Analizirana je distribucija radiovalnih izvora unutar grupa galaksija u polju COSMOS, koristeći rendgenski katalog "COSMOS X-ray Group Catalog" i radiovalni katalog "VLA-COSMOS 3 GHz Multiwavelength Counterpart Catalog". Podaci o crvenim pomacima preuzeti su iz fotometrijskih i spektroskopskih istraživanja [1] [2]. Primijenjeni su dodatni kriteriji filtracije prema luminozitetu i zvjezdanoj masi radiovalnih izvora te masi grupa ($\log(L_{1.4}) \geq 23.3$, $\log(M^*) \geq 10$, $\log(M_{200}) \geq 13.7$). Rezultati pokazuju da površinska gustoća radiovalnih izvora opada s povećanjem udaljenosti od središta grupa te potvrđuju očekivane gravitacijske učinke u središnjim područjima grupa galaksija. Provedena je analiza površinske gustoće radiovalnih izvora za različite raspone crvenog pomaka (unutar $0.3 \leq z \leq 1.6$). Unutar grupa nisu zabilježene statistički značajne razlike u površinskoj gustoći, osim u najužem području oko samog središta grupa, gdje su potrebne daljnje analize. Izvan grupa opažena je statistički značajna ovisnost površinske gustoće o crvenom pomaku. Neovisno o rasponu crvenog pomaka, površinska gustoća pokazuje očekivani pad s povećanjem udaljenosti od središta grupa.

1 UVOD

1.1 Polje COSMOS

COSMOS (*Cosmic Evolution Survey*) [3] jedno je od najopsežnijih astronomskih istraživanja koje se bavi proučavanjem svemira na velikim razmjerima. Istraživačko polje COSMOS obuhvaća područje od 2 kvadratna stupnja na nebu, što odgovara površini koju prekrivaju tisuće galaksija, te uključuje opažanja u širokom rasponu elektromagnetskog spektra – od rendgenskog zračenja do radiovalova.

Podaci za ovo istraživanje prikupljeni su pomoću najpoznatijih svemirskih i zemaljskih teleskopa, uključujući *Hubble Space Telescope* za optička opažanja visoke rezolucije, *Subaru* teleskop za širokokutne slike, *Chandra* i *XMM-Newton* za rendgenska opažanja te *Very Large Array* (VLA) za radio-opervacije. Uz njih, korišteni su i infracrveni podaci prikupljeni pomoću teleskopa *Spitzer* i *Herschel*. Ova višebojna opažanja omogućila su detaljno istraživanje struktura na različitim udaljenostima, što odgovara promatranju svemira kroz različite vremenske epohe.

Veliki broj opažanja i spektroskopskih podataka u okviru COSMOS-a čini ga ključnim alatom za mapiranje svemirskih struktura, istraživanje evolucije galaksija i identifikaciju aktivnih galaktičkih jezgri (AGN). Projekt

predstavlja suradnju znanstvenika iz cijelog svijeta, a njegova baza podataka dostupna je široj znanstvenoj zajednici za daljnja istraživanja i nova otkrića.

1.2 Radiovalni izvori

Radiovalni izvori su astrofizički objekti koji emitiraju zračenje u radiovalnom dijelu elektromagnetskog spektra. Među najznačajnijim radiovalnim izvorima su aktivne galaktičke jezgre (AGN), koje ispuštaju snažne mlazove relativističkih čestica kao posljedicu akrecije materijala na supermasivnu crnu rupu u središtu galaksije. Ovi mlazovi, pod utjecajem snažnih magnetskih polja, emitiraju radiovalove putem sinkrotronskog zračenja. [4] [5]

Sinkrotronsko zračenje nastaje kada se elektroni, ubrzani do relativističkih brzina, spiralno gibaju unutar magnetskog polja, pri čemu dolazi do emisije zračenja kontinuiranog spektra s maksimalnom emisijom u radiovalnom dijelu spektra. [4]

Osim AGN-ova, važni radiovalni izvori uključuju radio-galaksije, kvazare, pulsare, ostatke supernova te regije formiranja zvijezda unutar galaksija. [5]

1.3 Grupe galaksija

Grupe galaksija su gravitacijski vezane strukture koje se sastoje od desetaka do stotina galaksija, međugalaktičkog plina i tamne tvari. S manjim brojem članova od većih jata galaksija, grupe predstavljaju najčešći tip kozmičkih struktura u svemiru. [6]

Međugalaktička plazma unutar grupa galaksija, zagrijana na temperaturu od nekoliko milijuna kelvina, emitira rendgenske zrake putem *bremsstrahlung* emisije. Intenzitet i spektralna raspodjela rendgenskog zračenja ovise o temperaturi i gustoći plazme, što rendgenska opažanja čini ključnima za procjenu ukupne mase grupe i raspodjele mase unutar nje. [6]

2 PODACI

U ovom dijelu opisujemo astronomske kataloge koji su korišteni u radu.

2.1 Radiovalni katalog

Za potrebe analize korišten je katalog radiovalnih izvora "VLA COSMOS - 3 GHz Multiwavelength Counterpart Catalog" [7]. Ovaj katalog dobiven je unakrsnom korelacijom podataka iz kataloga "VLA-COSMOS 3 GHz Large Project" [8], koji obuhvaća 384 sata promatranja provedenih pomoću Karl G. Jansky Very Large Array (VLA) u SAD-u. Katalog sadrži radijske podatke na valnoj duljini od 10 cm, s prosječnom osjetljivošću od 2,3 $\mu\text{Jy}/\text{beam}$ pri rezoluciji od 0,75 lučne sekunde [7]. Unakrsna korelacija provedena je s najnovijim katalogom fotometrijskih crvenih pomaka "COSMOS2015" [2]. Nakon korelacije, dobiven je katalog "VLA COSMOS - 3 GHz Multiwavelength Counterpart Catalog" [7] s ukupno 7729 detektiranih izvora, koji je korišten u ovoj analizi.

U sklopu rada korišteni su podaci o $L_{1.4\text{GHz}}$ radio luminozitetu i zvjezdanoj masi M^* radiovalnih izvora.

Luminozitet na frekvenciji 1,4 GHz određen je na temelju promatranja fluksne gustoće S_ν na 3 GHz iz projekta "VLA-COSMOS 3 GHz Large Project". Fluksna gustoća predstavlja količinu energije zračenja koja prolazi kroz određenu površinu po jedinici vremena i frekvencijskog pojasa, a izražava se u jedinicama Jy (Jansky). Kako bi se izračunao luminozitet u referentnom okviru na 1,4 GHz, za izvore koji su istovremeno detektirani i na 1,4 GHz korišten je stvarni spektralni indeks, gdje je veza spektralnog indeksa i fluksne gustoće dana s $S_\nu \propto \nu^\alpha$. Za izvore koji nisu detektirani na 1,4 GHz, pretpostavljen je spektralni indeks $\alpha = -0.7$, što odgovara medijanu spektralnog indeksa za sve detektirane radio-izvore. [7]

Zvjezdane mase M^* određene su pomoću identifikacije s radio-izvorima iz kataloga COSMOS2015 [2]. Korištena se metoda prilagodbe SED (*spectral energy dis-*

tribution), koja uključuje komponente ultraljubičastog i infracrvenog zračenja te mogući doprinos aktivnih galaktičkih jezgri (AGN). Metoda SED temelji se na prilagodbi modela spektra energije opaženim fotometrijskim podacima kroz široki raspon valnih duljina. Na temelju prilagodbe SED-a dobiveni su ukupni infracrveni luminoziteti, koji su zatim korišteni za procjenu zvjezdanih masa uz pretpostavku Chabrierove funkcije početne mase. [7]

2.2 Rendgenski katalog

U području X-zraka korišten je katalog "COSMOS X-ray Group Catalog - Gozaliasl 2019" [9]. Katalog je temeljen na rendgenskim opažanjima s opservatorija XMM-Newton i Chandra. Ovaj katalog obuhvaća rendgenske grupe koje su identificirane do granice rendgenskog fluksa od $3 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ u rasponu energija od 0,5 do 2 keV. Ukupno je zabilježeno 247 grupa s masama M_{200c} u rasponu od $8 \times 10^{12} M_\odot$ do $3 \times 10^{14} M_\odot$ te u rasponu crvenog pomaka $0,08 \leq z < 1,53$ [9].

U rendgenskom katalogu parametar R_{200} definira radijus unutar kojeg je prosječna gustoća *halo*-a 200 puta veća od kritične gustoće svemira. Drugim riječima, predstavlja granicu unutar koje se gravitacijski zadržava većina mase *halo*-a, a galaksije unutar te regije ostaju gravitacijski vezane.

R_{200} izračunava se pomoću izraza:

$$M_{200} = \frac{4\pi}{3} \times 200 \times \rho_{\text{krit}} \times R_{200}^3 \quad (1)$$

gdje ρ_{krit} predstavlja kritičnu gustoću svemira, a M_{200} masu *halo*a [9]. Za procjenu mase *halo*-a koristi se odnos između rendgenskog sjaja i mase ($L_X - M_{200}$), kalibriran pomoću podataka o slabom gravitacijskom lećanju, na temelju čega se određuje R_{200} [10].

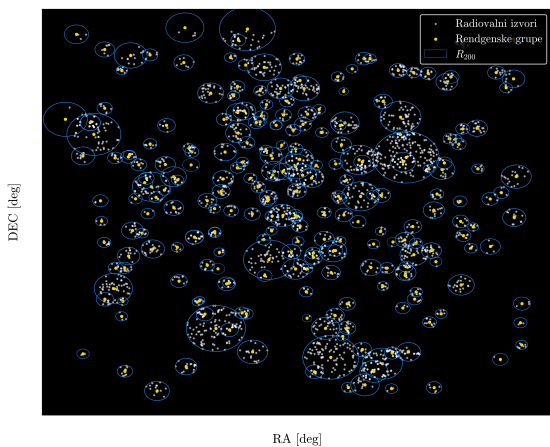
2.3 Fotometrijski i spektroskopski crveni pomaci

U sklopu COSMOS istraživanja koriste se fotometrijski i spektroskopski crveni pomaci za određivanje udaljenosti galaksija i skupova galaksija. Fotometrijski crveni pomak procjenjuje se na temelju mjerenja svjetline objekata u različitim fotometrijskim filtrima. Ova metoda omogućuje brzo određivanje crvenog pomaka za veliki broj objekata, ali je manje precizna u usporedbi sa spektroskopijom te je sklonija pogreškama, osobito za blijeđe i udaljene objekte. Spektroskopski crveni pomak dobiva se analizom specifičnih apsorpcijskih i emisijskih linija u spektru objekta, što ga čini izuzetno preciznim, ali zahtijeva dugotrajnija opažanja i ograničava se na manji broj objekata. U COSMOS projektu fotometrijski crveni pomaci omogućuju mapiranje velikog broja galaksija, dok se spektroskopski koriste za kalibraciju i provjeru točnosti fotometrijskih procjena [9].

Podaci o crvenom pomaku u radiovalnom katalogu određeni su kombinacijom spektroskopskih i fotometrijskih podataka. Spektroskopski crveni pomaci preuzeti su iz nekoliko ključnih istraživanja, uključujući zCOSMOS (*Bright i Deep* istraživanja) provedena VIMOS instrumentom na VLT teleskopu, DEIMOS/Keck II istraživanje, VIMOS *Ultra Deep Survey* (VUDS), te dodatne podatke iz MOSDEF i SDSS DR12 kataloga (više detalja: [1]). Za izvore kod kojih spektroskopski podaci nisu bili dostupni, korišteni su fotometrijski crveni pomaci iz COSMOS2015 kataloga, temeljenog na SED (*spectral energy distribution*) fitanju [2]. Fotometrijska analiza uključivala je širok raspon opažanja od ultralubičastog do infracrvenog spektra.

Na sličan način dobiveni su i podaci o crvenom pomaku za rendgenski katalog. Za grupe koje imaju dovoljan broj spektroskopskih članova ($N \geq 3$), crveni pomak grupe izračunat je primjenom *bi-weight* metode [9]. *bi-weight* metoda procjenjuje središnju vrijednost skupa podataka na način da dodjeljuje manju težinu podatcima koji značajno odstupaju od prosjeka, čime smanjuje utjecaj mjerenja koja znatno odstupaju. U ovom slučaju, metoda je korištena za određivanje prosječnog crvenog pomaka grupe na temelju individualnih spektroskopskih crvenih pomaka članova grupe. U slučajevima kada grupa sadrži manje od tri spektroskopska člana, korišteni su fotometrijski crveni pomaci iz kataloga COSMOS2015 (više detalja: [2]).

3 METODE



Slika 1: Polje COSMOS nakon unakrsne korelacije te filtracije radio i rendgenskog kataloga prema R_{200} . bijelo - radiovalni izvori, žuto - središte grupe, plavo - R_{200} pojedine grupe.

U ovom dijelu opisujemo metode koje smo koristili za obradu podataka iz kataloga.

3.1 Korelacija kataloga

U prvom koraku provedena je korelacija rendgenskog i radiovalnog kataloga korištenjem alata TOPCAT (*Tool for Operations on Catalogues and Tables*) [11]. TOPCAT je alat za analizu astronomskih kataloga koji omogućuje učitavanje i obradu velikih skupova podataka. Pomoću TOPCAT-a izvršena je unakrsna korelacija kataloga na temelju položaja izvora na nebu. Ovaj korak rezultira preliminarnim združenim katalogom, spremnim za daljnju analizu, u kojem su radiovalni izvori pridruženi grupama galaksija.

Da bi korelirali kataloge morali smo odrediti rezoluciju unakrsne korelacije i za početnu vrijednost koristili smo najveću vrijednost $R_{200} = 0.0986\text{deg}$ [9] iz rendgenskog kataloga. Ovakva metoda rezultirala je s 32,455 podudaranja, što ukazuje na to da je velikom broju grupa pridruženo više radiovalnih izvora nego što pripadaju toj grupi te da je u ovom koraku korelacija gruba.

Kako bismo smanjili broj višestrukih pridruživanja, u sljedećem koraku filtrirali smo katalog uklanjanjem svih izvora čija je udaljenost od središta grupe veća od R_{200} za tu grupu kojoj su dodijeljeni nakon korelacije. Nakon ove filtracije, broj podudaranja smanjen je na 3,166. Slika 1 prikazuje navedeni katalog gdje su označeni radiovalni izvori, grupe te R_{200} za pojedinu grupu.

Ipak, radi potpunije analize, u daljnjem radu povećali smo kriterij za uklanjanje na $10 \times R_{200}$ što nas vraća na početnih 32,455 podudaranja.

3.2 Crveni pomak

Do sada smo razmatrali samo dvodimenzionalnu udaljenost radiovalnih izvora od središta grupe te sada uključujemo i treću dimenziju putem crvenog pomaka. Radiovalni izvor pridružili smo grupi ukoliko se nalazio u intervalu:

$$z_{ri} = z_g \pm 3\sigma(1 + z_g) \quad (2)$$

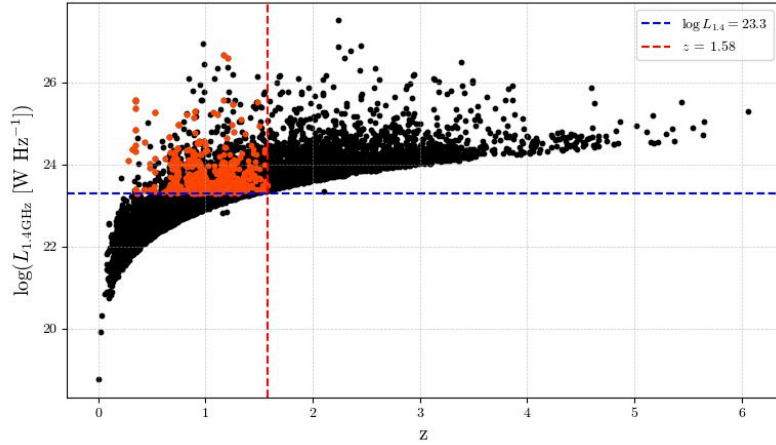
gdje z_{ri} predstavlja crveni pomak radiovalnog izvora, z_g crveni pomak grupe te σ standardnu devijaciju za koju je uzeta konzervativna vrijednost od $\sigma = 0.01$ [2].

Nakon navedenog koraka broj podudaranja smanjuje se na 2311

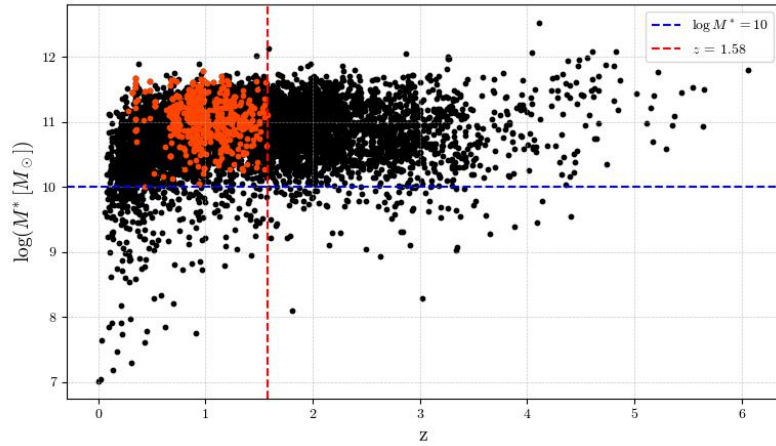
3.3 1.4 GHz radio luminozitet

Nakon što smo definirali podudaranja na temelju crvenog pomaka, sljedeći korak bio je ograničiti podudaranja na temelju luminoziteta radiovalnih izvora. Ovaj korak omogućuje precizniji odabir izvora koji pripadaju relevantnim grupama, eliminirajući izvore niskog luminoziteta koji nisu ključni za analizu.

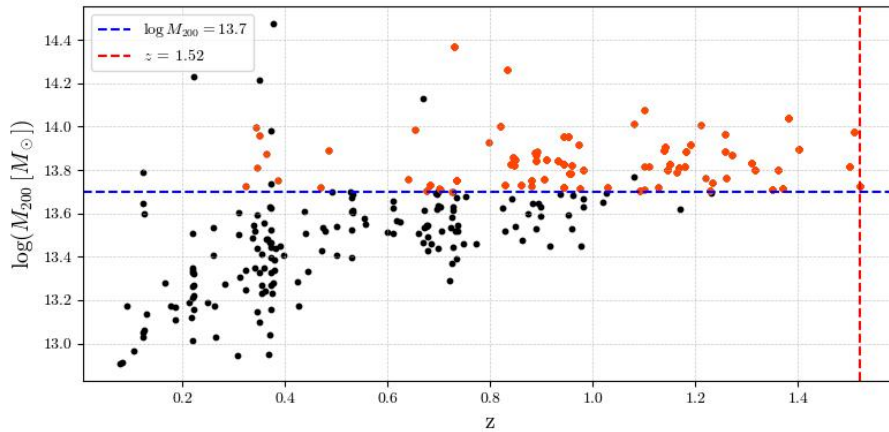
Podudaranja smo ograničili tako što smo uzeli u obzir



Slika 2: 1.4 GHz radio luminozitet radiovalnih izvora u ovisnosti o crvenom pomaku. Crvena linija - maksimalni crveni pomak radiovalnih izvora, plava linija - donja granica luminoziteta, crno - uzorak početnog radiovalnog kataloga, crveno - uzorak nakon unakrsne korelacije te filtracije prema crvenom pomaku i luminozitetu.



Slika 3: Zvezdana masa radiovalnih izvora u ovisnosti o crvenom pomaku. Crvena linija - maksimalni crveni pomak radiovalnih izvora, plava linija - donja granica zvjezdane mase, crno - uzorak početnog radiovalnog kataloga, crveno - uzorak nakon unakrsne korelacije te filtracije prema crvenom pomaku, luminozitetu i zvjezdanoj masi.



Slika 4: M_{200} rendgenskih grupa u ovisnosti o crvenom pomaku. Crvena linija - maksimalni crveni pomak rendgenskih grupa, plava linija - donja granica M_{200} , crno - uzorak početnog rendgenskog kataloga, crveno - uzorak nakon unakrsne korelacije te filtracije prema M_{200} .

najveći crveni pomak ($z = 1.58$) među radiovalnim izvorima. Na temelju najveće vrijednosti z , odredili smo minimalni 1.4 GHz radio luminozitet koristeći sliku 2, koja prikazuje odnos između luminoziteta i crvenog pomaka. Iz slike smo vizualno odredili graničnu vrijednost luminoziteta za najveći z , te smo u analizu uključili samo izvore čiji je luminozitet veći od te granične vrijednosti. Na taj način uklonili smo izvore s niskim luminozitetom koji nisu relevantni za naše istraživanje te dobili uzorak gdje izvori imaju podjednake luminozitete za puni raspon crvenog pomaka.

Uklanjanjem izvora koji nisu u intervalu:

$$\log(L_{1.4 \text{ GHz}}) \geq 23.3 \quad (3)$$

Značajno smo smanjili broj podudaranja sa 2311 na 694.

3.4 Zvezdana masa

Nakon što smo ograničili podudaranja na temelju luminoziteta, sljedeći korak bio je definirati granicu za zvezdanu masu (M^*) galaksija. Ova granica omogućuje nam da uklonimo izvore s niskom zvezdanom masom koji nisu od značaja za analizu.

Granica za zvezdanu masu određena je na temelju najvećeg crvenog pomaka ($z = 1.58$) u uzorku rendgenskog kataloga. Za tu vrijednost z , pomoću slike 3, koja prikazuje odnos između zvezdane mase i crvenog pomaka, vizualno smo odredili minimalnu zvezdanu masu koju ćemo razmatrati. U analizu su uključene samo galaksije čija je zvezdana masa veća od ove granične vrijednosti kako bi u uzorku imali izvore podjednake zvezdane mase u punom rasponu crvenog pomaka.

Uklanjanjem izvora koji nisu u intervalu:

$$\log(M^* [M_\odot]) \geq 10 \quad (4)$$

broj podudaranja smanjili smo na 689.

3.5 M_{200} rendgenskih grupa

Konačni korak analize uključivao je filtriranje grupa iz rendgenskog kataloga na temelju kriterija mase M_{200} , s ciljem uklanjanja grupa s malim ukupnim masama koje nisu relevantne za proučavanje.

Granica za M_{200} određena je na temelju najvećeg crvenog pomaka $z = 1.52$ među grupama. Vizualno smo, koristeći sliku 4 koja prikazuje odnos između mase M_{200} i crvenog pomaka, procijenili minimalnu vrijednost mase za najveći z . U analizu su uključene samo grupe s masama većim od te granične vrijednosti. Na taj način uzorak sadrži konzistente vrijednosti M_{200} u punom rasponu crvenog pomaka.

Primjenom kriterija:

$$\log(M_{200} [M_\odot]) \geq 13.7 \quad (5)$$

Dobivamo konačni katalog s 439 podudaranja koji ćemo koristiti u daljnoj analizi.

3.6 Površinska gustoća - Σ

Ključna veličina korištena u ovom radu za kvalitativno ispitivanje odnosa između udaljenosti od središta grupe i broja radiovalnih izvora jest površinska gustoća Σ [12].

Površinska gustoća Σ definira se kao broj objekata N unutar prstenastog područja (bin) podijeljen s površinom tog područja A_{bin} :

$$\Sigma = \frac{N}{A_{bin}} \quad (6)$$

gdje je površina prstenastog bin -a dana izrazom:

$$A_{bin} = \pi (r_{vanjski}^2 - r_{unutarnji}^2) \quad (7)$$

Udaljenosti radiovalnih izvora od središta dodijeljene grupe računaju se iz kataloga standardno prema udaljenosti dviju točaka. Dobivene vrijednosti r normaliziraju se s radijusom R_{200} odgovarajuće grupe kako bi se dobile bezdimenzionalne vrijednosti r/R_{200} . Time se sve udaljenosti skaliraju u jedinstvene jedinice koje omogućuju usporedbu među grupama različitih veličina.

Kako bi se obuhvatile i male i velike udaljenosti na konzistentan način, koristi se logaritamska podjela bin -ova. To znači da se bin -ovi šire s povećanjem udaljenosti od središta, omogućujući bolju razlučivost u unutarnjim dijelovima grupe, gdje se broj izvora najbrže mijenja.

Napravljena je podjela u 5 bin -ova u rasponu od $0.01R_{200}$ do $10R_{200}$ na logaritamskoj skali.

Poissonova pogreška na površinsku gustoću izračunata je kao:

$$\sigma_\Sigma = \frac{\sqrt{N}}{A_{bin}} \quad (8)$$

4 REZULTATI I RASPRAVA

Slika 5 prikazuje ovisnost površinske gustoće radiovalnih izvora Σ o normaliziranoj udaljenosti od središta rendgenskih grupa galaksija r/R_{200} za ukupni raspon crvenog pomaka z . Rezultati pokazuju značajnu koncentraciju radiovalnih izvora u blizini središta grupa, pri čemu je najveća vrijednost Σ zabilježena u prvom bin -u, koji pokriva interval $0.01R_{200}$ do $0.04R_{200}$, s vrijednošću $\Sigma = (643 \pm 371) \text{ deg}^{-2}$.

r/R_{200}	$\Sigma [deg^{-2}]$	$\sigma_{\Sigma} [deg^{-2}]$
0.025	643	371
0.099	162	47
0.395	27	5
1.571	6.6	0.6
6.256	0.92	0.06

Tablica 1: Ovisnost površinske gustoće o normaliziranoj udaljenosti od središta grupe za puni raspon crvenog pomaka. Prvi stupac prikazuje središte *bin*-a.

Relativno velika nesigurnost rezultata u prvom *bin*-u posljedica je toga što se razmatra relativno mala površina, što ograničava ukupni uzorak radiovalnih izvora na svega $N = 3$. Ipak, to još uvijek odgovara izrazito velikoj koncentraciji radiovalnih izvora.

Kako se udaljenost od središta povećava, Σ opada. Sa slike 5 vidljivo je da se površinska gustoća u svakom sljedećem *bin*-u smanjuje otprilike za red veličine. Točne vrijednosti za svaki *bin* prikazane su u tablici 1. Važno je napomenuti da greške postaju manje na većim udaljenostima, što se može objasniti većim uzorcima N u vanjskim *bin*-ovima. Razlog za to leži u povećanju površine *bin*-a s rastućom udaljenošću: kako se udaljujemo od središta, svaka naredna prstenasta zona (tj. *bin*) obuhvaća veći dio prostora. To znači da, unatoč manjoj gustoći radiovalnih izvora, razmatramo značajno veći broj galaksija. Veći uzorak galaksija smanjuje statističku nesigurnost i time greške postaju manje.

Površinska gustoća radiovalnih izvora Σ opada s udaljenošću od središta rendgenskih grupa galaksija zbog gravitacijske prirode tih sustava. U središnjim regijama grupa galaksija gravitacijsko privlačenje je najsnažnije, što uzrokuje veću koncentraciju galaksija i radiovalnih izvora. Kako se udaljenost od središta povećava, gravitacijski utjecaj slabi, a distribucija galaksija postaje sve rjeđa. Osim toga, vanjske regije često uključuju područja koja nisu gravitacijski vezana za grupu, što dodatno doprinosi opadanju Σ . Ova raspodjela također reflektira dinamiku galaksija unutar grupe, gdje su centralne regije češće mjesto međugalaktičkih interakcija i akrecijskih procesa, dok periferne regije karakterizira veća disperzija objekata. [13]

Ovi rezultati su u skladu s nalazima sličnih istraživanja ([13] i [12]). Dodatni korak u analizi iz [12] bio je uključivanje kontrolnog uzorka. Ovaj uzorak sastoji se od galaksija bez radio emisije koje su odabrane tako da imaju istu distribuciju zvjezdane mase kao i uzorak s radiovalnim izvorima. U daljnjim fazama ovog istraživanja planira se istražiti kako prisutnost radiovalnih izvora utječe na gustoću galaksija unutar grupe, osobito u blizini njezina središta, koristeći kontrolni uzorak na sličan način.

Slika 6 prikazuje ovisnost površinske gustoće radioval-

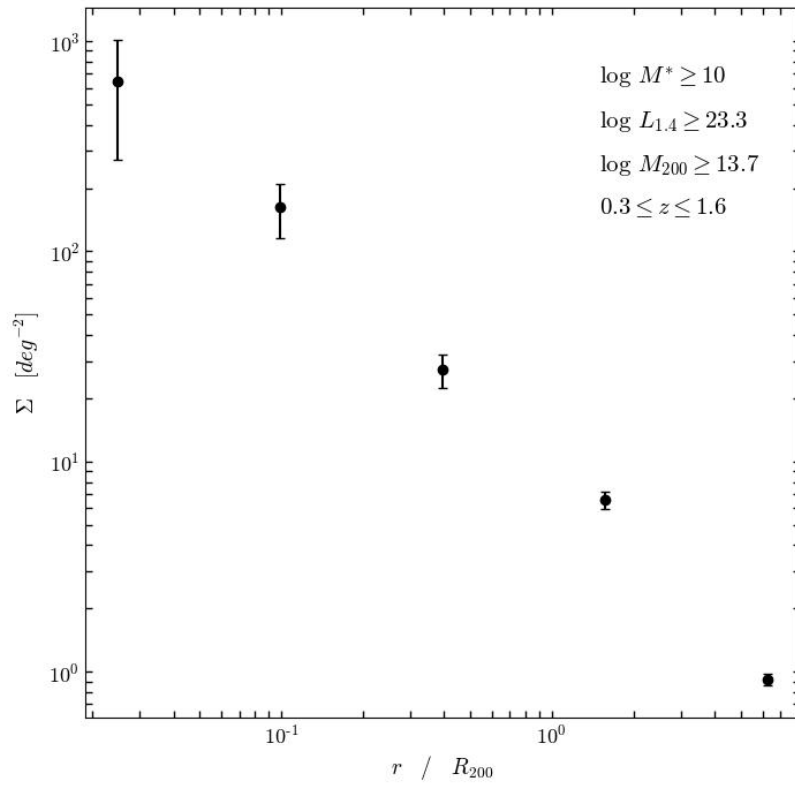
nih izvora Σ o normaliziranoj udaljenosti od središta rendgenskih grupa galaksija r/R_{200} za različite intervale crvenog pomaka z . Kako bi se uključila treća dimenzija u analizu, crveni pomaci su podijeljeni u 5 intervala, koji su dani na slici, na način da sadrže statistički značajne uzorke.

Ako se osvrnemo na prvi *bin* prikazan na slici 6, koji odgovara regiji u blizini središta galaktičke grupe, uočavamo da su izvori prisutni isključivo u rasponu crvenog pomaka od 0,8 do 1,1. U ostalim rasponima crvenog pomaka ili ne bilježimo prisutnost izvora, ili su rezultati usporedivi s nulom.

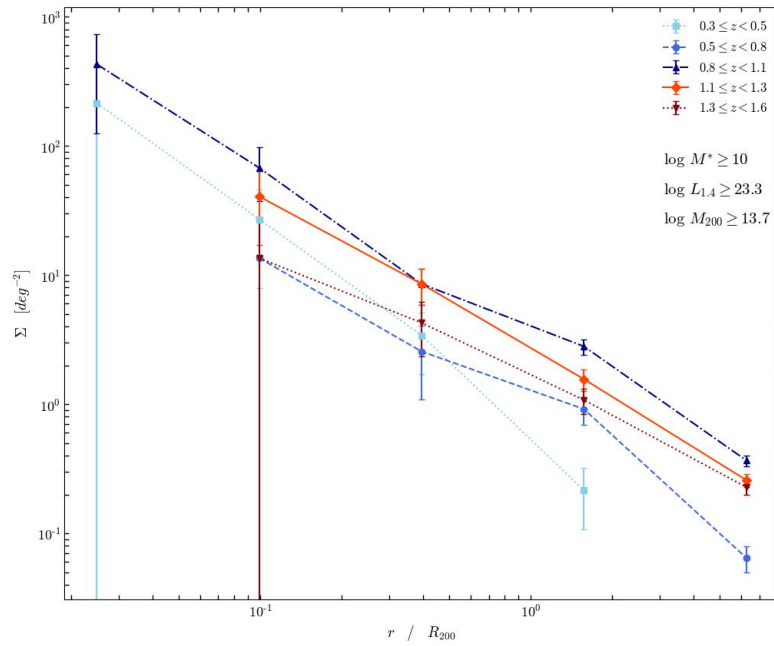
Trenutno nemamo definitivan odgovor za ovaj rezultat, no postoji mogućnost da je on posljedica fluktuacija karakterističnih za male uzorke. Takve varijacije nisu neuobičajene u statistikama s ograničenim brojem podataka. Ovaj rezultat svakako bi trebao biti uključen u daljnje ispitivanje kako bi se utvrdilo je li riječ o slučajnom odstupanju ili potencijalnom signalu za dublju analizu.

Na udaljenostima većima od samog središta grupa reproducirali smo očekivani rezultat da površinska gustoća opada s povećanjem udaljenosti od središta grupe u svim rasponima crvenog pomaka. Unutar grupe, do udaljenosti R_{200} , nemamo statistički značajnih razlika u površinskoj gustoći kroz raspone crvenog pomaka.

Na većim udaljenostima, izvan granica grupa, primjećuje se da je površinska gustoća najniža za manje vrijednosti crvenog pomaka, zatim doseže maksimum u srednjem rasponu, nakon čega ponovno opada.



Slika 5: Ovisnost površinske gustoće Σ o r/R_{200} za ukupni raspon crvenog pomaka z . Legenda prikazuje granične vrijednosti luminoziteta, zvjezdane mase i mase grupe te raspon crvenog pomaka.



Slika 6: Ovisnost površinske gustoće Σ o r/R_{200} za različite rasponne crvenog pomaka z . Legenda prikazuje granične vrijednosti luminoziteta, zvjezdane mase i mase grupe te rasponne crvenog pomaka.

5 ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirali smo distribuciju radiovalnih izvora u grupama galaksija unutar polja COSMOS, koristeći podatke iz rendgenskih i radiovalnih kataloga te fotometrijske i spektroskopske crvene pomake. Primjenom različitih filtracijskih kriterija, uključujući crveni pomak, radio luminozitet, zvjezdanu masu i M_{200} grupa, konstruirali smo katalog podudaranja, što je omogućilo proučavanje odnosa između površinske gustoće radiovalnih izvora i njihovih položaja unutar grupa. Glavni cilj bio je ispitati kako površinska gustoća radiovalnih izvora varira s udaljenošću od središta grupa i kroz različite vremenske epohe.

Rezultati pokazuju da površinska gustoća radiovalnih izvora značajno opada s povećanjem udaljenosti od središta grupa, što je u skladu s očekivanim gravitacijskim efektima u ovim strukturama. U regijama blizu središta grupa zabilježena je najveća koncentracija radiovalnih izvora što je u skladu s sličnim istraživanjima [12]. Sljedeća faza bila bi uključivanje kontrolnih grupa (bez radiovalnih izvora) u analizu.

U blizini središta grupa primjetili smo odsutnost radiovalnih izvora za sve raspone crvenog pomaka osim 0.8 do 1.1. Rezultat je raspravljen u prethodnom poglavlju.

Analiza s obzirom na crveni pomak nije pokazala statistički značajne razlike u površinskoj gustoći unutar grupa. Izvan grupa vidimo ovisnost površinske gustoće o crvenom pomaku.

Literatura

- [1] V. Smolčić et al. "The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Multiwavelength counterparts and the composition of the faint radio population". *Astronomy Astrophysics* 602 (2017.), A2. DOI: **10.1051/0004-6361/201630223**.
- [2] C. Laigle et al. "The COSMOS2015 Catalog: Exploring the $1 < z < 6$ Universe with Half a Million Galaxies". *The Astrophysical Journal Supplement Series* 224 (2016.). DOI: **10.3847/0067-0049/224/2/24**.
- [3] COSMOS Collaboration. *COSMOS Survey: The Cosmic Evolution Survey*. n.d. URL: **<https://cosmos.astro.caltech.edu/>**.
- [4] G. B. Rybicki i A. P. Lightman. *Radiative Processes in Astrophysics*. New York: Wiley, 1979.
- [5] J. J. Condon. "Radio emission from normal galaxies". *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 30.1 (1992.), str. 575–611. DOI: **10.1146/annurev.aa.30.090192.003043**.
- [6] A. Vikhlinin, A. Kravtsov, W. Forman, C. Jones, M. Markevitch, S. S. Murray i L. Van Speybroeck. "Chandra measurements of galaxy cluster mass profiles". *The Astrophysical Journal* 640.2 (2006.), str. 691–709. DOI: **10.1086/500288**.
- [7] V. Smolčić et al. "The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Cosmic evolution of radio AGN and implications for radio-mode feedback since $z \sim 5$ ". *Astronomy Astrophysics* 602 (2017.). DOI: **10.1051/0004-6361/201730685**.
- [8] V. Smolčić et al. "The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Continuum data and source catalog release". *Astronomy Astrophysics* 602 (2017.). VLA-COSMOS SI. DOI: **10.1051/0004-6361/201628704**.
- [9] G. Gozaliasl et al. "Chandra centres for COSMOS X-ray galaxy groups: differences in stellar properties between central dominant and offset brightest group galaxies". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)* 483 (2019.), str. 3545–3565. DOI: **10.1093/mnras/sty3203**.
- [10] A. Leauthaud et al. "A Weak Lensing Study of X-Ray Groups in the COSMOS Survey: Form and Evolution of the Mass–Luminosity Relation". *The Astrophysical Journal* 709 (2010.), str. 97–114. DOI: **10.1088/0004-637X/709/1/97**.
- [11] TOPCAT – Tool for Operations on Catalogues and Tables. **<https://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>**.
- [12] V. Smolčić et al. "On the occupation of X-ray-selected galaxy groups by radio active galactic nuclei since $z = 1.3$ ". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 416.1 (2011.), str. L31–L35. DOI: **10.1111/j.1745-3933.2011.01092.x**.
- [13] Yen-Ting Lin i Joseph J. Mohr. "Radio sources in galaxy clusters: Radial distribution, and 1.4 GHz and K-band bivariate luminosity function". *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170.1 (2007.), str. 71–94. DOI: **10.1086/513744**.