

Sinkrotronsko zračenje galaksija

Šlaus, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:293633>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Bruno Šlaus

Sinkrotronsko zračenje galaksija

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Bruno Šlaus

Diplomski rad

Sinkrotronsko zračenje galaksija

izv. prof. dr. sc. Vernesa Smolčić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem se profesorici Vernesi Smolčić na vođenju ovog diplomskog rada te svim članovima njene grupe. Njihovi savjeti i vodstvo učinili su ovaj rad mogućim. Također se zahvaljujem članovima Opservatorija u Leidenu, gdje sam učio tijekom ljetne škole.

Sažetak

Sinkrotronsko zračenje, koje nastaje interakcijom magnetskog polja i relativistički ubrzanih nabijenih čestica, dominantan je oblik zračenja galaksija u radio području. Sinkrotronsko zračenje javlja se pri prirastu (akreciji) materijala na središnju supermasivnu crnu rupu. Opažanja u radio području stoga su neizostavan dio proučavanja aktivnih galaktičkih jezgri. U ovom radu se promatra radio emisija na frekvenciji 610 MHz unutar XXL-North polja. Koristimo podatke koji dolaze od opažanja Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) radio teleskopom. Radi detekcijskog limita istraživanja uzorak opaženih izvora sastoji se uglavnom od aktivnih galaktičkih jezgri. Podatke korigiramo eliminacijom efekta kromatske aberacije, odvajamo razlučene od nerazlučenih izvora, te izdvajamo sve izvore koji se sastoje od više komponenti. Koristeći podatke The NRAO VLA Sky Survey (NVSS) istraživanja na 1400 MHz računamo spektralne indekse detektiranih izvora, koji su izravno povezani s oblikom energetske raspodjele čestica odgovornih za opaženo sinkrotronsko zračenje. Uočavamo razlike između spektralnih indeksa razlučenih i nerazlučenih izvora koje pripisujemo razlikama u prirodi samih emitera. Činjenicu da nerazlučeni izvori u prosjeku posjeduju veći broj ravnih spektara objašnjavamo time da je emisija nerazlučenih izvora u pravilu dominirana zračenjem iz njihove optički duboke sredine, dok razlučeni izvori zrače iz svojih optički tankih radio izbočina (proširenog završetka radio mlazova prisutnoga kod radio glasnih aktivnih galaktičkih jezgri). Koristeći fotometrijski određene crvene pomake, konstruiramo funkcije luminoziteta promatranoga uzorka. Pritom uzorak razdvajamo na više podskupova ograničenih crvenih pomaka radi postojanja evolucije funkcija luminoziteta. Uspoređujemo stvorene funkcije luminoziteta s podacima ostalih istraživanja te s modelom evolucije preuzetim iz literature. Zaključujemo da su slaganja dobra. Važnost naših podataka leži u tome da se, radi širine i relativne dubine polja, nalaze u sredini između istraživanja velike dubine preko malenoga nebeskog polja i plićih istraživanja preko velikih nebeskih površina.

Ključne riječi: aktivne galaktičke jezgre, sinkrotronsko zračenje, radio opažanja, spektralni indeksi, funkcije luminoziteta

Synchrotron emission of galaxies

Abstract

Synchrotron emission arising from the accelerated motion of charged particles is the dominant form of radio emission from galaxies. It is observed in the process of accretion of material into the central supermassive black hole. Observations in the radio part of the spectrum are important for understanding the nature of active galactic nuclei. Our observations are carried out at the frequency of 610 MHz inside the XXL-North field, with the Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT). Because of the detection limit of our observations, the majority of our sample consists of active galactic nuclei. We eliminate effects of bandwidth smearing, separate resolved from unresolved sources and classify the multi-component sources. Using the NRAO VLA Sky Survey (NVSS) data at 1400 MHz we calculate the spectral indices of our sources, which are directly connected to the shape of the energy distribution of the emitting particles. The spectral indices of resolved and unresolved sources differ slightly, which we explain by the difference in the nature of these emitters. The unresolved sources emit radiation mostly from the core which is optically thick, while the resolved sources emit radiation from the optically thin radio lobes. By using the photometrically derived redshifts, we were able to construct the luminosity functions of our sample. To assess the evolution of the luminosity functions we separate our data into redshift subsets. We compare our luminosity functions with values from other surveys and with a model of luminosity function evolution taken from literature. The importance of our observations lies in the mixture of depth and width of our survey, which provides a bridge between the very deep surveys directed towards small areas of the sky and the very wide but shallow surveys.

Keywords: active galactic nuclei, synchrotron radiation, radio observations, spectral index, luminosity functions

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Radio astronomija	1
1.2	Sinkrotronsko zračenje	1
1.3	Aktivne galaktičke jezgre	4
1.4	Funkcije luminoziteta	6
2	Podaci	9
2.1	GMRT opažanja XXL-North polja	9
2.2	Stvaranje kataloga	10
2.3	Učestalost pogrešnih detekcija	11
2.4	NVSS podaci	13
2.5	CFHTLS podaci	13
2.6	Katalog crvenih pomaka	13
3	Analiza kataloga i korekcije	14
3.1	Kromatska aberacija	14
3.2	Razlučeni i nerazlučeni izvori	15
3.3	Izvori od više komponenti	17
4	Račun spektralnih indeksa	17
4.1	Osnove računa	17
4.2	Spajanje kataloga	19
4.3	Odstupanja vezana uz detekcijski limit	19
4.4	Eliminacija sistematskih odstupanja i crtanje histograma spektralnih indeksa	22
5	Spajanje s optičkim katalogom	24
5.1	Crveni pomaci	24
5.2	Spajanje kataloga	24
6	Funkcije luminoziteta	26
6.1	Konstrukcija funkcija luminoziteta	26
6.2	Račun luminoziteta	28
6.3	Funkcije luminoziteta unutarnjeg dijela XXL-North polja	29

6.4	Funkcije luminoziteta vanjskoga dijela XXL-North polja	30
6.5	Funkcije luminoziteta cijeloga XXL-North polja	30
7	Zaključak	33
	Literatura	35

1 Uvod

1.1 Radio astronomija

Važan dio suvremene opažačke astrofizike su opažanja u radio području. Razvitak radio astronomije tijekom prošloga stoljeća doveo je do znatnih poboljšanja u postignutoj razlučivosti, te se najdetaljnija opažanja danas vrše upravo pomoću radio teleskopa (Thompson et al. 2017.). Iz činjenice da atmosfera ne apsorbira zračenje u radio području, opažanja se mogu vršiti s površine Zemlje¹. Dodatna pogodnost radio opažanja je činjenica da radio emisija ne biva opstruirana prašinom prisutnom u svemiru (Bonato et al. 2017.). Također, radi velikih valnih duljina radio zračenja, mjerenja je moguće vršiti metodom radio interferometrije¹. Glavno obilježje ove metode jest činjenica da se mjerenje vrši većim brojem teleskopa. Signali pojedinih teleskopa spajaju se u jedinstvenu sliku. Za zračenje astronomskih objekata u radio području izrazitu važnost ima sinkrotronski proces (Beckmann & Shrader 2012.).

1.2 Sinkrotronsko zračenje

Opće je poznato da pri akceleraciji nabijenih čestica dolazi do emisije elektromagnetskoga zračenja. Ako je za akceleraciju zaslužno magnetsko polje, tada govorimo o "magnetobremstrahlung-u"¹. Ovisno o brzini ubrzanih čestica razlikujemo dva različita pojma: ako je brzina čestica bitno manja od brzine svjetlosti, govorimo o ciklotronskoj radijaciji, dok relativističke čestice dovode do sinkrotronskog zračenja¹. Iz aspekta opažačke astrofizike, najbitnije je upravo sinkrotronsko zračenje jer je ono zaslužno za većinu detektirane emisije u radio području.

Energija sinkrotronskog zračenja ovisna je o energiji nabijene čestice, jačini magnetskoga polja te kutu između gibanja čestice i silnica magnetskoga polja (Beckmann & Shrader 2012.). Može se pokazati (Beckmann & Shrader 2012.) da spektar zračenja jedne čestice, posjeduje maksimum u blizini kojega se emitira većina energije (Condon 1992.). Spektar zračenja jedne čestice prikazan je na Slici 1.1. U praksi zračenje dolazi od emitera sačinjenog od velikoga broja nabijenih čestica, te je konačni spektar posljedica zračenja cijelog ansambla čestica. Slijedi da spektre pojedinih čestica određenih energija moramo zbrojiti. Pretpostavimo da energet-

¹<http://www.cv.nrao.edu>

ska raspodjela nabijenih čestica $n(E)$ poštuje eksponencijalnu ovisnost (Beckmann & Shrader 2012.):

$$n(E)dE = kE^{-p}dE \quad (1.1)$$

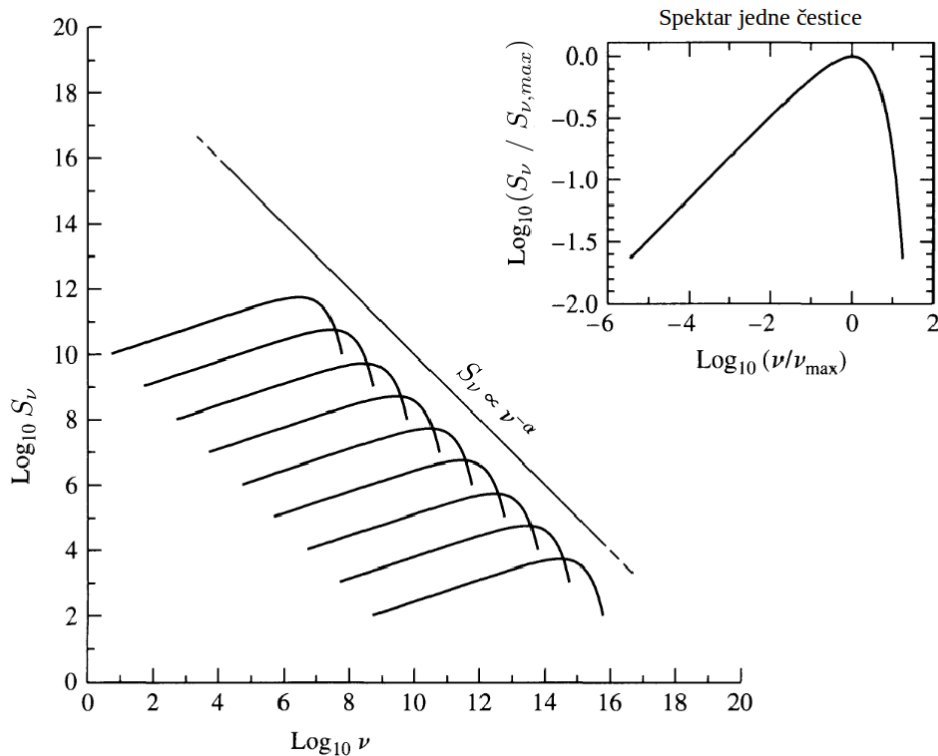
gdje je k normalizacijska konstanta, a p eksponent raspodjele. Uz pretpostavku da je magnetsko polje uniformno i statičko, može se pokazati da za spektar sinkrotronskoga zračenja ansambla čestica vrijedi (Condon 1992., Carroll & Ostlie 2007.):

$$S_\nu \propto \nu^{-\alpha} \quad (1.2)$$

gdje je S_ν oznaka za gustoću fluksa (tj. gustoću ozračenja). Eksponent α , koji određuje nagib spektra, zovemo spektralnim indeksom. Veza između spektralnoga indeksa α i eksponenta energetske raspodjele p glasi (Beckmann & Shrader 2012.):

$$\alpha = \frac{p-1}{2} \quad (1.3)$$

Slikoviti prikaz zbrajanja spektara pojedinih čestica prikazan je na Slici 1.1.

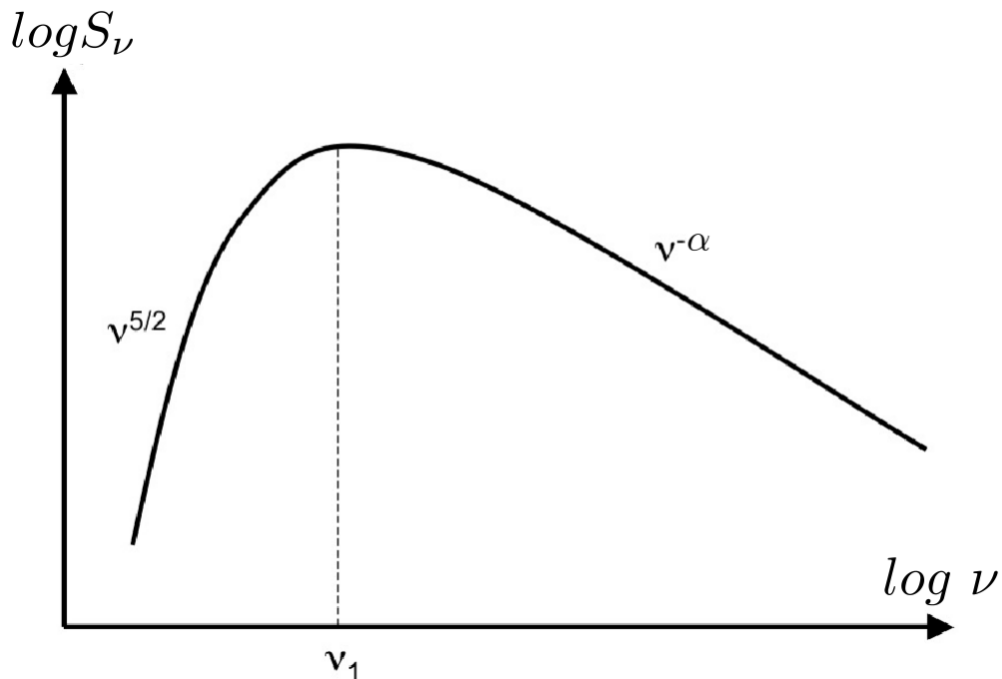


Slika 1.1: Slikovit prikaz zbrajanja jednočestičnih spektara sinkrotronskoga zračenja u konačni spektar karakterističnog eksponencijalnog oblika. Zaseban prikaz jednočestičnoga spektra prikazan je u desnom gornjem dijelu slike. Frekvencija je označena sa ν , dok je S_ν oznaka za gustoću fluksa. (Carroll & Ostlie 2007.)

Daljnje komplikacije dolaze od činjenice da plazma koja emitira zračenje nije potpuno prozirna (optički tanka). Drugim riječima dio emitiranoga zračenja biva apsorbiran prije no što napusti emiter u procesu kojega nazivamo samo-apsorpcijom (Carroll & Ostlie 2007.). Može se pokazati da su efekti samo-apsorpcije najizraženiji pri niskim frekvencijama (Beckmann & Shrader 2012.). Ova pojava bitno mijenja izgled spektra te dovodi do toga da na određenoj frekvenciji ν_1 spektar postiže svoj maksimum. Na niskim frekvencijama spektar postaje neovisan o spektralnome indeksu te poštuje jednostavnu relaciju:

$$S_\nu \propto \nu^{5/2} \quad (1.4)$$

Spektar ansambla nabijenih čestica, koji uzima u obzir efekte samo-apsorpcije, nalazi se na Slici 1.2. Jasno su uočljiva dva spomenuta režima: optički tanki režim na višim frekvencijama, te optički dubok na nižim.



Slika 1.2: Spektar sinkrotronskoga zračenja izračunat teorijski uzimajući u obzir efekt samo-apsorpcije. Osi grafa su logaritamske. Na niskim frekvencijama plazma je optički duboka, a fluks je proporcionalan $\nu^{5/2}$. Na višim frekvencijama plazma postaje optički tanka te vrijedi: $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$. Frekvencija ν_1 je frekvencija na kojoj plazma prelazi iz optički tanke u optički duboku.²

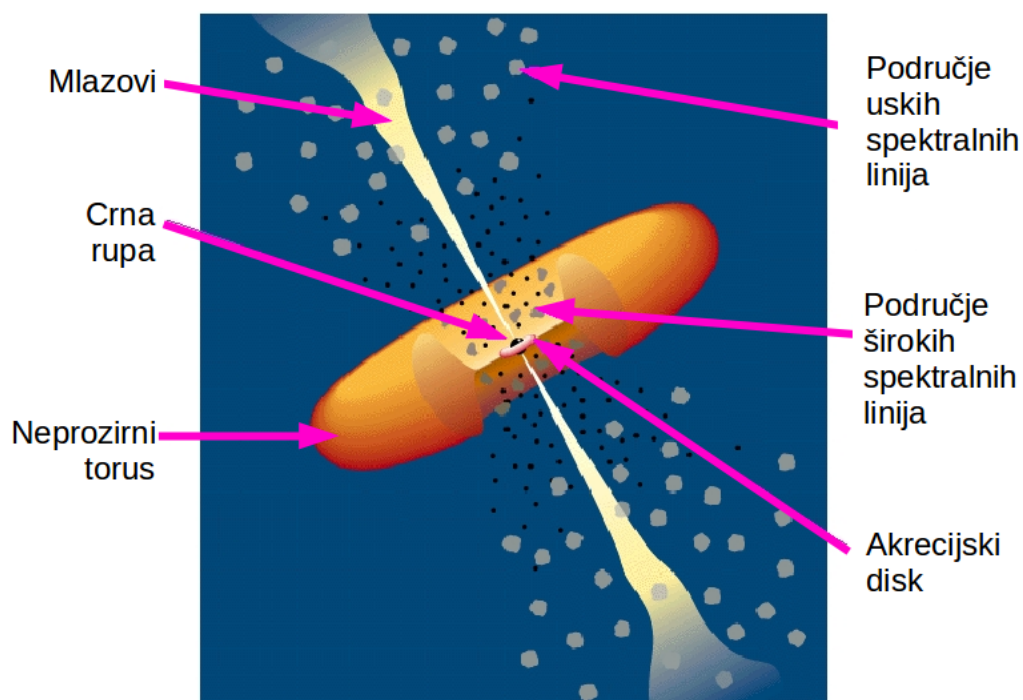
²<http://wiredspace.wits.ac.za/handle/10539/20362>

Sinkrotronsko zračenje javlja se u procesima velikih energija, radi potrebe da nabijene čestice budu ubrzanе na ultrarelativističke brzine. Prvi puta opaženo je u galaksiji M87 (Burbidge 1956.) koja posjeduje aktivnu jezgru (aktivne galaktičke jezgre opisane su detaljnije u sljedećem poglavlju). Općenito, dva primarna izvora radio emisije galaksija su prirast materijala na središnju crnu rupu (tj. aktivne galaktičke jezgre) te stvaranje novih zvijezda (Kimball et al. 2011.). Radio emisija aktivnih galaktičkih jezgri posljedica je sinkrotronskoga zračenja relativistički ubrzanih radio mlazova (Kimball et al. 2011.). Stvaranje novih zvijezda također može dovesti do pojave sinkrotronskoga zračenja radi prisutnosti kratkoživućih supernova. Naime, vjeruje se da eksplozije supernovi također mogu ubrzati čestice do relativističkih brzina (Kimball et al. 2011.).

1.3 Aktivne galaktičke jezgre

Vjeruje se da većina galaksija u svome središtu posjeduje supermasivnu crnu rupu (Beckmann & Shrader 2012.). U slučaju kada postoji prirast (akrecija) materijala na centralnu crnu rupu, dolazi do emisije elektromagnetskoga zračenja. Tada govorimo o aktivnim galaktičkim jezgrama. Kada luminozitet galaktičke jezgre nadjača luminozitet čitave galaksije, takav objekt nazivamo kvazarom (*engl. quasar = quasi-stellar object*).

Danas je većinom prihvaćeno da velik broj različitih opažanja kozmološko dalekih sjajnih objekata pripisujemo postojanju aktivnih galaktičkih jezgri. Pritom se niz različitih opažanja objedinjuje u jedan model: ujedinjeni model aktivnih galaktičkih jezgri (Netzer 2015.). Glavna ideja ovoga modela jest da se razna opažanja pripisuju istome fizikalnome procesu: akreciji materijala u središnju crnu rupu (Bentz 2015.). Razlike između opaženih objekata pripisuju se drugačijim kutem gledanja (inklinacije) promatranoga objekta, te razlikama u luminozitetu objekta. Model nam daje uvid u morfologiju aktivnih galaktičkih jezgri. Prikaz modela aktivne galaktičke jezgre dan je na Slici 1.3. U središtu galaksije nalazi se crna rupa mase $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ (Bentz 2015.). Materijal koji upada na crnu rupu nalazi se u obliku rotirajućega akrecijskoga diska (Carroll & Ostlie 2007.). U ravnini diska, na većem polumjeru, nalazi se neprozirni torus. Okomito na ravninu diska i torusa moguće je postojanje radio mlazova. Za različitosti u spektrima kvazara izrazito je bitno postojanje

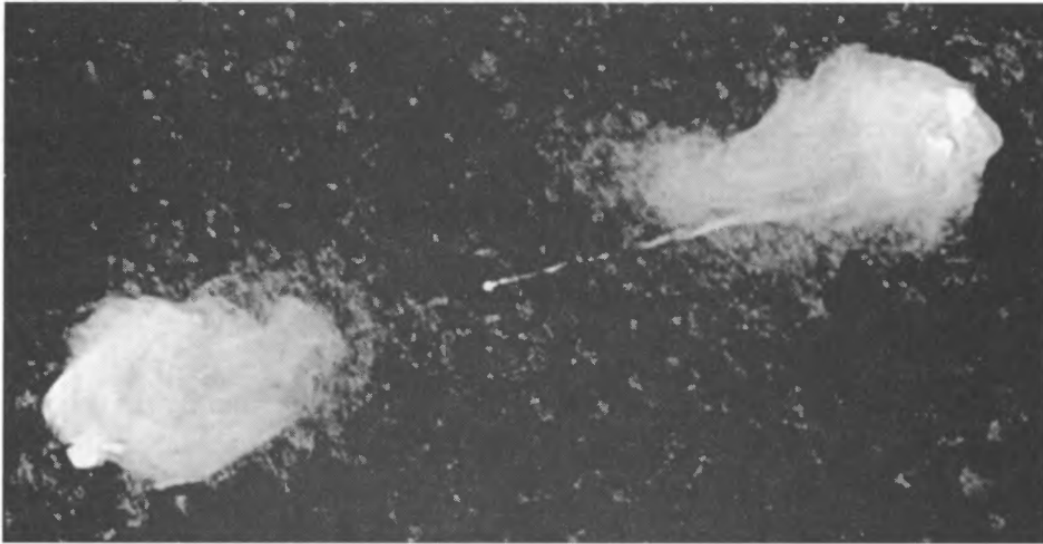


Slika 1.3: Prikaz ujedinenog modela aktivnih galaktičkih jezgri. Veći broj različitih opažanja pripisuje se postojanju aktivnih galaktičkih jezgri čija je pretpostavljena morfologija prikazana na slici. Pojedini dijelovi aktivne galaktičke jezgre označeni su na slici. (Urry & Padovani 1995)

dviju različitih područja fotoioniziranoga plina. U blizini crne rupe i akrecijskoga diska ($\approx 0.01\text{pc}$; Bentz 2015.) nalazi se područje širokih linija (*engl. broad line region, BLR*). Naziv ovoga područja potječe od činjenice da su brzine čestica plina ovog područja velike čime dolazi do jakog Dopplerovog proširenja spektralnih linija (nekoliko 1000 ms^{-1} ; Bentz 2015.). Povećanjem polumjera dolazimo u područje gdje je moguće postojanje prašine (nakon polumjera sublimacije prašine). Područje širokih linija prelazi u neprozirni torus. S vanjske strane torusa (Carroll & Ostlie 2007.), na velikim polumjerima ($\approx 10\text{pc}$; Bentz 2015.) postoji drugo područje fotoioniziranoga plina: područje uskih linija (*engl. narrow line region, NLR*). Dopplerovo proširenje linija bitno je manje (nekoliko 100 ms^{-1} ; Bentz 2015.). Ovisno o kutu gledanja opažamo različite spektre. Na primjer, gledamo li kvazar u ravnini diska, torus će prikriti područje širokih linija. Spektar će tada posjedovati isključivo uske linije.

Postojanje radio mlazova dokazano je i direktnim opažanjima (Slika 1.4; Carroll & Ostlie 2007.). Razvojem opažanja visoke razlučivosti, mlazovi su praćeni do velike blizine same jezgre (Tadhunter 2008.). Za opažanja u radio području važni su isključivo radio-glasne aktivne galaktičke jezgre, odnosno one koje posjeduju radio

mlazove. Mlazovi ovih objekata sastoje se od nabijenih čestica te zrače sinkrotronskim zračenjem (Carroll & Ostlie 2007.). Spektri sinkrotronskoga zračenja, odnosno spektralni indeksi, ovise o morfologiji pojedinih objekata ³. Opaženo je da kompaktni izvori imaju ravnije spektre, dok razlučeni izvori imaju strmije spektre (Kimbal & Ivezić 2008.).



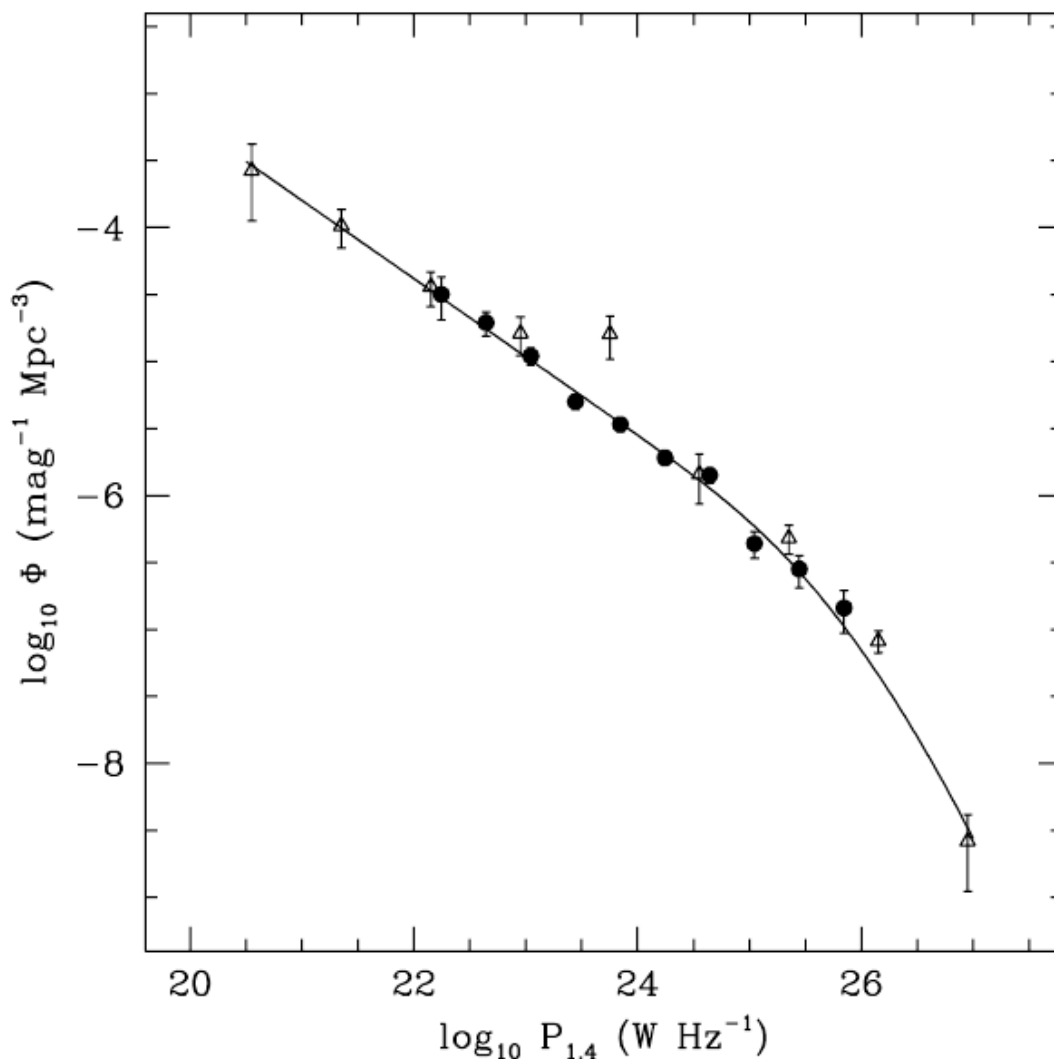
Slika 1.4: Prikaz aktivne galaksije Cygnus A. Slika je snimljena u radio području spektra. Jasno su vidljivi radio mlazovi i radio izbočine (proširenja na kraju radio mlazova; Carroll & Ostlie 2007.).

1.4 Funkcije luminoziteta

Funkcije luminoziteta određenoga uzorka astronomskih objekata su mjera promjene njihove prostorne gustoće u ovisnosti o luminozitetu (npr. Willott et al. 2001., Condon 1996.). Funkcije luminoziteta aktivnih galaktičkih jezgri daju važan uvid u prirodu i evoluciju ovih objekata te njihovu rasprostranjenost i prostorno grupiranje (Condon 1996.). Prikaz tipične funkcije luminoziteta nalazi se na Slici 1.5. Slika prikazuje funkciju luminoziteta u lokalnom svemiru. Uzorak izvora na velikoj udaljenosti od opažača, radi konačne brzine svjetlosti, odgovara objektima u prošlosti. Promatranjem funkcija luminoziteta na različito udaljenim uzorcima, moguće je stoga promatrati kozmološku evoluciju funkcija luminoziteta. Postoje dva glavna modela evolucije: evolucija prostorne gustoće i evolucija luminoziteta (Smolčić et al. 2017c.). Evolucija prostorne gustoće odgovarala bi pomicanju točaka Slike 1.5. u smjeru or-

³<http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Cambridge/Cambridge1.3.1.html>

dinate, dok bi evolucija luminoziteta odgovarala pomacima u smjeru apscise. Često se koriste i modeli koji uključuju obje vrste evolucije (Yuan et al. 2016.).



Slika 1.5: Funkcija luminoziteta aktivnih galaksija u području lokalnog svemira, stvorena iz opažanja na 1.4GHz . Crne točke su podaci iz Sadler 2002. dok prozirni trokuti dolaze od Sadler 1989. Na ordinati se nalazi prostorna gustoća po magnitudi po megaparseku, dok je na apcisi luminozitet (izračena snaga po frekvenciji; Sadler 2002.)

Kako funkcije luminoziteta evoluiraju s udaljenošću uzorka od opažača, nužno se ograničiti na izvore čiji raspon udaljenosti nije prevelik. Stoga je pri stvaranju funkcija luminoziteta nužno poznavati prostornu udaljenosti pojedinih izvora. Procjena udaljenosti u astrofizici dobiva se mjerenjem crvenih pomaka (*engl. redshift*). Naime, opažačka je činjenica da su spektri udaljenijih izvora pomaknuti prema crvenome dijelu spektra, te da je jačina pomaka proporcionalna udaljenosti (Baryshev 2016.). Objašnjenje ove pojave leži u širenju svemira (Carroll & Ostlie 2007.). Danas je općenito prihvaćeno da se svemir širi na način da se sve točke udaljavaju jedna od

druge u procesu koji se može slikovito predočiti analogijom rastezanja gume. U ovoj analogiji svjetlost koju emitira daleki objekt biva "rastegnuta zajedno sa prostorom" duž svoga puta do opažača (Bunn & Hogg 2009.). U praksi moguće je razmišljati o pojavi pomaka ka crvenom kao Dopplerovog efekta. Dobro je poznato da radijalna brzina promatranih objekata putem Dopplerovog efekta utječe na njihove spektre: spektri udaljavajućih objekata pomaknuti su ka crvenome, dok su spektri objekata koji se približavaju pomaknuti ka većim valnim duljinama (odnosno prema plavijem dijelu spektra). Porast brzine udaljavanja s udaljenošću izvora (relacija brzine i udaljenosti: Hubble 1929.) slijedi kao direktna posljedica homogenog izotropnog širenja svemira (Carroll & Ostlie 2007.). Slijedi da je crveni pomak udaljenih izvora veći. (Za detaljnijeg izvoda crvenih pomaka te važnosti točne interpretacije vidjeti Bunn & Hogg 2009.). Funkcije luminoziteta izračunate na različitim crvenim pomacima su najdirektnija metoda istraživanja evolucije galaksija (Gruppioni et al. 2013.). Pritom opažanja u radio području bivaju neizostavan dio cjelokupnog istraživanja.

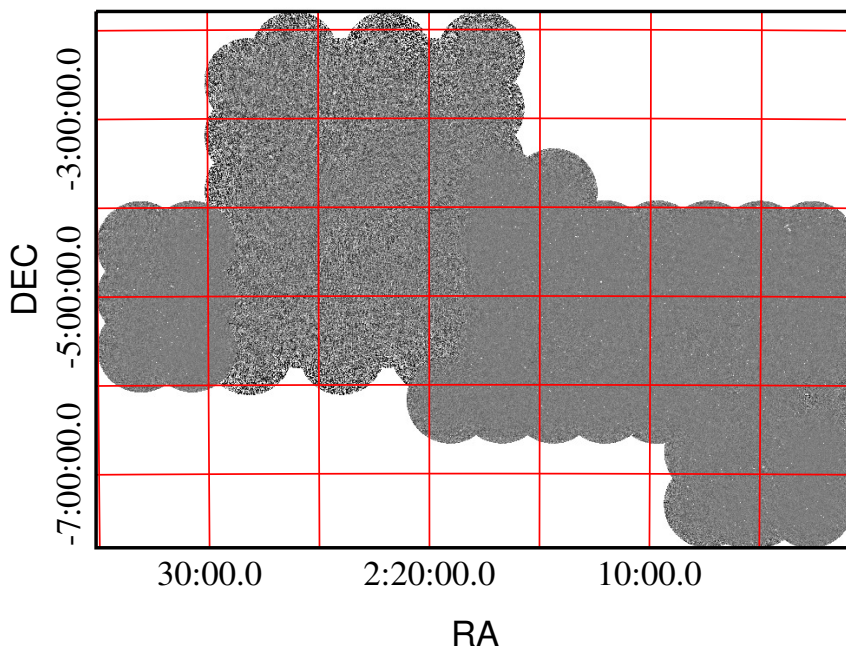
U ovome radu računamo spektralne indekse detektiranih objekata te konstruiramo njihove funkcije luminoziteta. U poglavlju 2 opisujemo mjerenja te stvaranje kataloga. Također navodimo i korištene podatke koji pripadaju drugim istraživanjima. Poglavlje 3 bavi se analizom i korekcijama dobivenoga kataloga. Pritom proučavamo kromatsku aberaciju, razlučenost izvora te izvore od više komponenti. Poglavlje 4 opisuje račun spektralnih indeksa te diskusiju njihovih vrijednosti. U poglavlju 5 i 6 stvaramo funkcije luminoziteta mjerenih objekata, te diskutiramo rezultate i slaganje s literaturom. Zaključak se nalazi u poglavlju 7.

2 Podaci

U ovom poglavlju opisujemo provedena mjerenja te stvaranje kataloga. Potpoglavlje 2.1 opisuje proces samoga mjerenja, dok se potpoglavlje 2.2 bavi stvaranjem kataloga te provjerom mjerenja. Potpoglavlje 2.3 ispituje pouzdanost stvorenog kataloga promatranjem učestalosti pogrešnih detekcija. Daljnja potpoglavlja opisuju podatke ostalih istraživanja korištenih u ovom radu.

2.1 GMRT opažanja XXL-North polja

Korišteni podaci dolaze s Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) radio teleskopa⁴, smještenog u Indiji (80 km sjeverno od Pune). Mjerenja su vršena na frekvenciji od 610 MHz, unutar dijela neba pod nazivom XXL-North polje. Prikaz XXL-North polja na 610 MHz, zajedno s koordinatama neba, nalazi se na Slici 2.1.

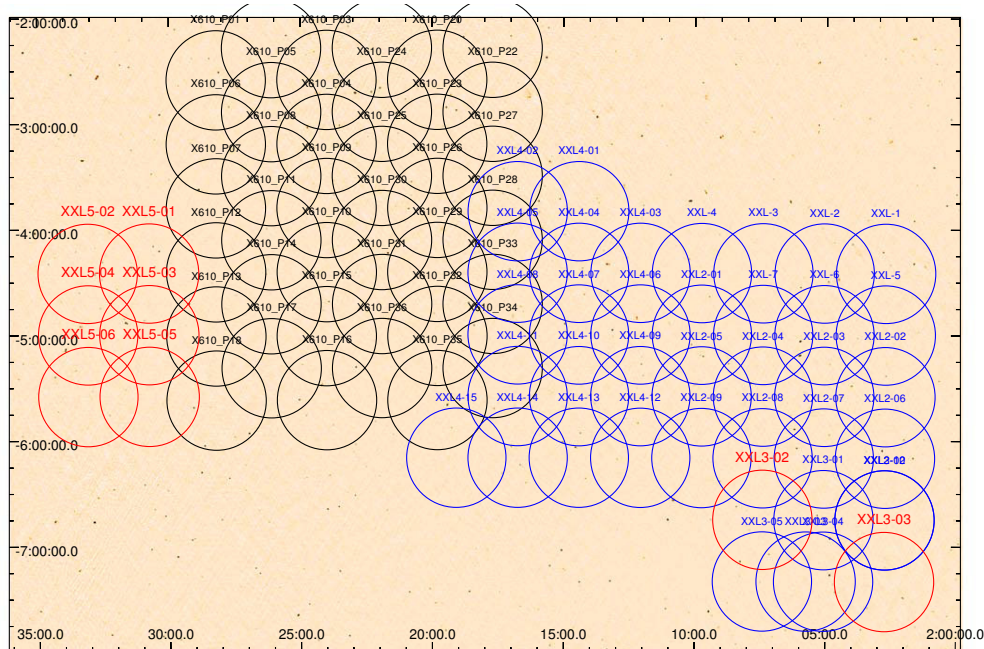


Slika 2.1: Prikaz XXL-North polja te koordinata položaja na nebu. RA i DEC odnose se redom na rektascenziju i deklinaciju. Sa slike je vidljiva i razlika u šumu središnjeg i vanjskog dijela polja.

Opažanja su vršena metodom korelatora, pri čemu se mjerenja cijelog niza teleskopa spajaju u konačnu sliku. Prednost ove metode jest postizanje izrazito velike razlučivosti. Jedna od ograničenja jest, međutim, nemogućnost promatranja područja neba prevelike površine (Thompson et al. 2017.). Radi veličine XXL-North

⁴<http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/>

polja, teleskop je stoga bio usmjeren na više različitih položaja (*engl. pointings*). Pojedinačna usmjerenja spojena su u jednu sliku (mozaik). Raspored usmjeravanja teleskopa dan je na Slici 2.2.



Slika 2.2: Raspored usmjeravanja GMRT teleskopa unutar XXL-North polja. Svaka kružnica odgovara pojedinačnome usmjerenju. Crno obojene kružnice odgovaraju XMM-LSS potpodručju. Preuzeto iz Smolčić et al. (u postupku recenzije).

Opažanja središnjeg dijela XXL-North polja (XMM-LSS potpodručje, za detalje vidjeti Tasse et al. 2007.) razlikovala su se od opažanja ostatka polja (Smolčić et al, u postupku recenzije). Radi toga središnji dio ima vidljivo veći šum od ostatka XXL-North polja. Šum središnjeg djela polja iznosio je oko $200 \mu\text{Jy}$, a vanjskoga oko $50 \mu\text{Jy}$. razlučivost polja iznosila je 6.5 lučnih sekundi. Površina središnjega dijela polja iznosila je 7.7 kvadratnih stupnjeva, a vanjskoga 12.66 kvadratna stupnja. Pri obradi podataka i stvaranju slike korišten je SPAM pipeline (za detalje vidjeti Intema et al. 2017.).

2.2 Stvaranje kataloga

Pri stvaranju kataloga korišten je PyBDSM program (Mohan & Raferty 2015.). Održana su područja radio mape (tj. ”otoci”) čija je gustoća fluksa 3 puta veća od lokalnoga šuma (3σ), oko vrhova sa 5σ (za detalje oko ekstrakcije kataloga vidjeti Smolčić et al, u postupku recenzije). Cjelokupan katalog sadržavao je 7640 eleme-

nata. Pri daljnjim razmatranjima ograničili smo se na izvore čiji je omjer signala i šuma (S/N) iznosio više od 7, pri čemu je u katalogu preostalo 5434 članova.

Za potrebe naših istraživanja preuzeli smo gotov katalog⁵ te kontinuiranu mapu⁶. Radi različite osjetljivosti središnjeg i vanjskog dijela polja, razdvojili smo katalog na dva podskupa, koristeći program Topcat⁷. Pritom smo slijedili granicu različitoga šuma. Središnji dio polja sadržavao je 819 izvora sa $S/N > 7$, a vanjski dio njih 4615. Radi osjetljivosti ovoga istraživanja, većina detektiranih izvora odgovara aktivnim galaktičkim jezgrama (Smolčić et al. 2017a.).

Da provjerimo mjerenja unesena u katalog, usporedili smo gustoću fluksa dobivenih izvora sa gustoćama fluksa izvora iz Tasse et al 2007., ranijeg istraživanja koje je pokrivalo središnji dio XXL-North polja. Pritom smo promatrali izvore dvaju istraživanja čija je međusobna udaljenost manja od 5 lučnih sekundi. Uz pretpostavku da ovi izvori pripadaju istome fizikalnome emiteru njihov fluks, mjeren unutar dva istraživanja, trebao bi biti jednak. Rezultati usporedbe nalaze se na Slici 2.3. Sa slike je jasno da je slaganje dobro, čime je potvrđeno da su izmjereni fluksevi vjerodostojni. Odstupanje od 2.4% može se objasniti drugačijim standardom fluksa pri kalibraciji (Perley & Butler 2013.).

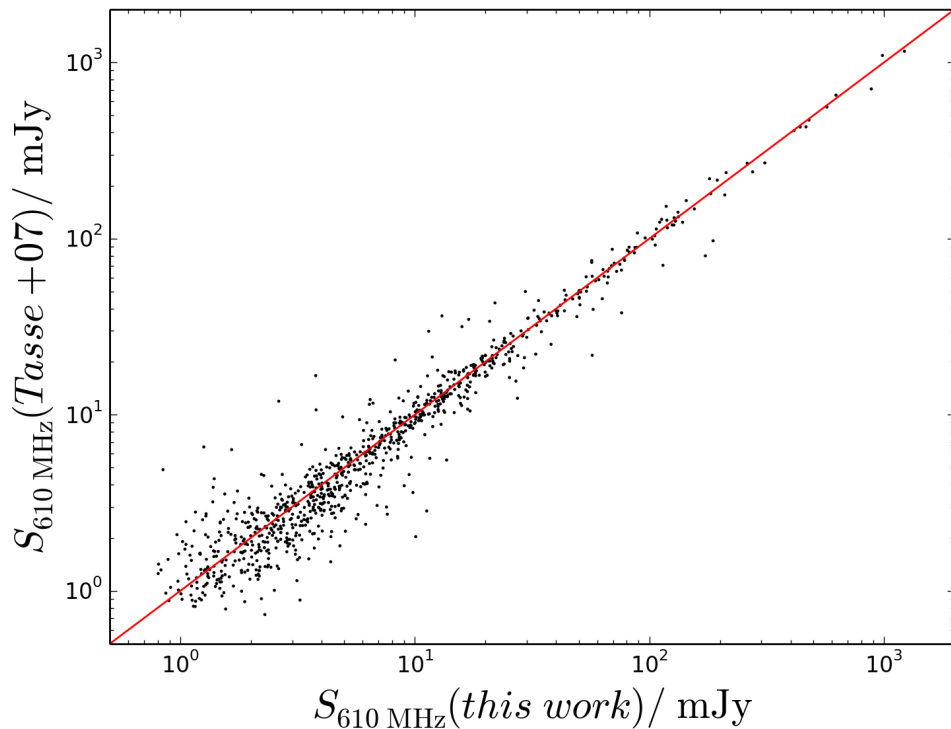
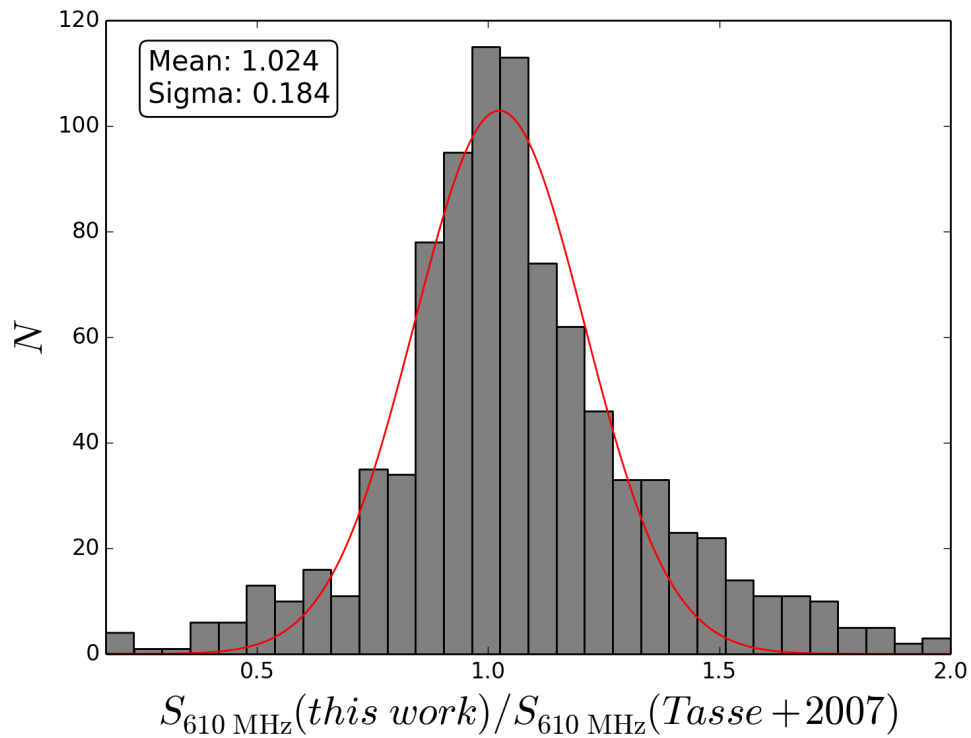
2.3 Učestalost pogrešnih detekcija

Kako bismo proučili količinu pogrešnih detekcija pri ekstrakciji korištenoga kataloga, koristili smo dodatni katalog koji je nastao iz invertirane mape kontinuiranog zračenja (mape gdje su fluksevi pomnoženi sa -1) uz iste postavke ekstrakcije. Kako u stvarnosti ne postoje izvori s negativnom emisijom, sve izvore detektirane iz inverzne mape pripisujemo posljedicama šuma (Smolčić et al. 2017b.). Detekcije koje potječu od šuma smatramo pogrešnima. Katalog nastao iz invertirane mape sadržavao je svega 46 izvora. Ograničimo li se na detekcije za koje je vrijedilo $S/N > 7$, preostao je samo jedan izvor. Iz malenoga broja pogrešnih detekcija zaključujemo da je korišten katalog vrlo pouzdan, odnosno da broj pogrešnih detekcija ne igra veliku ulogu.

⁵Popis izvora i pripadnih podataka

⁶Mapa kontinuiranoga zračenja

⁷<http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>



Slika 2.3: Usporedba gustoća fluksa našega kataloga ("this work") sa gustoćama fluksa iz Tasse et al 2007. Gornja slika prikazuje omjer gustoće fluksa dvaju istraživanja u obliku histograma te prilagodbu Gaussove funkcije. Srednja vrijednost prilagodbe ("Mean") te njena širina ("Sigma") označeni su u gornjem lijevom kutu slike. Donja slika prikazuje odnose fluksa u dvodimenzionalnom grafu te pravac $x = z$ gdje bi u idealnom slučaju trebale ležati točke grafa.

2.4 NVSS podaci

Pored podataka sa GMRT radio teleskopa detektiranih na frekvenciji 610MHz, koristili smo i podatke The NRAO VLA Sky Survey (NVSS) istraživanja na frekvenciji 1400MHz (Condon et al. 1998.). NVSS podaci detektirani su pomoću Very Large Array teleskopa (VLA)⁸, te pokrivaju veliko područje koje obuhvaća i područje XXL-North polja. Razlučivost NVSS istraživanja bitno je manja od razlučivosti GMRT polja, te iznosi 45 lučnih sekundi. Detekcijski limit NVSS polja iznosi 2.5mJy. Podaci NVSS istraživanja javno su dostupni putem interneta⁹. Za detalje oko ekstrakcije NVSS kataloga vidjeti Condon et al (1998.).

2.5 CFHTLS podaci

Koristili smo i podatke koji su dio Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey istraživanja (CFHTLS)¹⁰. Radi se o velikome projektu u trajanju od 5 godina (s 2300 sati opažanja), čiji podaci su javno dostupni putem interneta. Mjerenja su vršena u optičkome području spektra, pomoću "MegaCam" kamere CFHT teleskopa. Za potrebe našega istraživanja preuzeli smo mape kontinuiranog zračenja u području neba koje se poklapa s XXL-North poljem.

2.6 Katalog crvenih pomaka

Radi potrebe za poznavanjem crvenih pomaka, koristili smo katalog u optičkome području preuzet od S. Fotopoulou¹¹. Ovaj katalog, neujednačene gustoće, sastavljen je od više optičkih i infracrvenih kataloga. Za svaki izvor naveden je fluks na više različitih frekvencija (cijeli optički spektar i bliži dio infracrvenoga) te crveni pomak. Dva glavna načina određivanja crvenih pomaka su: fotometrijska metoda i spektroskopska metoda. Fotometrijska metoda koristi kontinuirani spektar radijacije (Bolzonella et al. 2000.), dok se spektroskopska metoda bazira na promatranju pomaka istaknutih spektralnih linija (Lee 2017.). Korišteni crveni pomaci ovoga kataloga izračunati su fotometrijskom metodom.

⁸<http://www.vla.nrao.edu/>

⁹<http://www.cv.nrao.edu/nvss/>

¹⁰<http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/>

¹¹Department of Astronomy at the University of Geneva, Chemin d'Ecogia 16, 1290 Versoix, Switzerland; članica XXL konzorcija: http://irfu.cea.fr/en/Phocea/Vie_des_labos/Ast/alltec.php?id_ast=3015

3 Analiza kataloga i korekcije

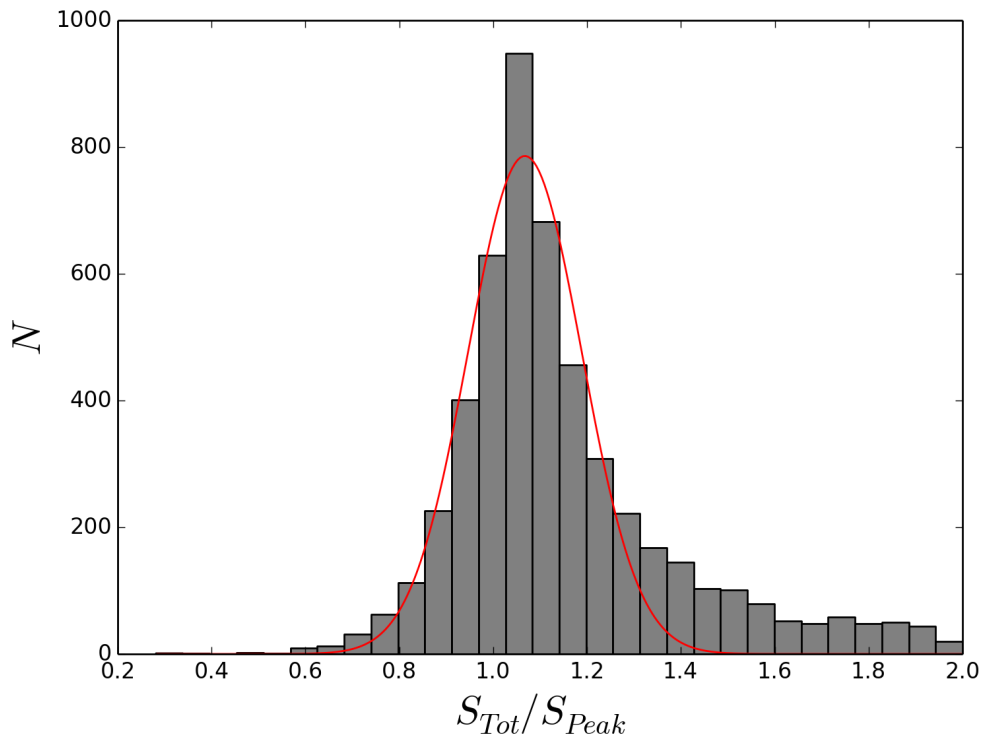
U ovome poglavlju bavimo se analizom stvorenog kataloga te raznim korekcijama koje je potrebno primijeniti. Potpoglavljje 3.1 opisuje pojavu kromatske aberacije. U potpoglavljju 3.2 razdvajamo razlučene od nerazlučenih izvora, dok se potpoglavljje 3.3 bavi pronalaženjem izvora od više komponenti.

3.1 Kromatska aberacija

Kod opažanja vršenih pomoću prijemnika konačne frekvencijske širine kanala, nužno je uzeti u obzir efekte kromatske aberacije (Bondi et al. 2003.). Pri stvaranju slike izvora koji se nalaze dalje od centra opažanja dolazi do smanjenja maksimalnoga fluksa (S_{Peak}). Integrirani (totalni) fluks (S_{Tot}) pritom ostaje očuvan.

Može se pokazati da je efekt kromatske aberacije proporcionalan udaljenosti pojedinoga izvora od centra opažanja (Bondi et al. 2008.). Dodatne komplikacije javljaju se kada teleskop usmjerimo na više različitih položaja (odnosno kada promatramo mozaik). U tom slučaju u obzir se moraju uzeti sva usmjerenja teleskopa čime efekt kromatske aberacije postaje ovisan o njihovom rasporedu. Radi uniformnog rasporeda usmjerenja teleskopa (Slika 2.2) pretpostavili smo da je u našem slučaju efekt kromatske aberacije konstantan u prostoru.

Uzmemo li u obzir da su većina detektiranih izvora mali i kompaktni izvori, očekujemo da je njihov integrirani fluks u prosjeku jednak maksimalnome (Smolčić et al. 2017b.). Efekti kromatske aberacije narušavaju ovo pravilo. Pri kvantifikaciji efekta kromatske aberacije, promotrili smo stoga histogram detektiranih izvora u ovisnosti o omjeru integriranog i maksimalnoga fluksa. Odstupanje vrha histograma od jedinice upućuje na efekte kromatske aberacije. Pri određivanju vrha histograma koristili smo prilagodbu Gaussove funkcije (Slika 3.4). Također smo zrcalili histogram oko najviše vrijednosti te ponovili prilagodbu. Obje metode daju položaj vrha na 1.06 (uz 1% odstupanja). U svim daljnjim razmatranjima korigirali smo stoga maksimalni fluks množeći ga sa 1.06.



Slika 3.4: Histogram detektiranih izvora N raspoređenih po omjeru totalnoga (integriranoga) i maksimalnog fluksa S_{Tot}/S_{Peak} . Desni dio slike je odrezan jer nas zanima položaj vrha. Crvenom linijom označena je prilagodba Gaussove funkcije. Vrh Gaussiana nalazi se na 1.06, što ukazuje na odstupanje uzrokovano kromatskom aberacijom.

3.2 Razlučeni i nerazlučeni izvori

Pri daljnjim razmatranjima korisno je razlikovati razlučene od nerazlučenih izvora. Izvore smatramo razlučenima kada su veći od rezolucijskog elementa (Smolčić et al. 2017b.). Direktna mjera razlučenosti izvora je omjer integriranoga i maksimalnoga fluksa (Prandoni et al. 2000.). Razlučenost izvora povećava njegov integrirani fluks naspram maksimalnoga fluksa.

Na omjer integriranog i maksimalnoga fluksa utječe i šum, koji ga može i povećati i smanjiti. Omjeri gdje integrirani fluks iznosi manje od maksimalnoga, očito su posljedica efekata šuma (Bondi et al. 2003.) jer za nerazlučene izvore maksimalni šum biva jednak integriranome. Nacrtali smo graf omjera integriranog i maksimalnoga fluksa kao funkcije omjera signala i šuma (Slika 3.5).

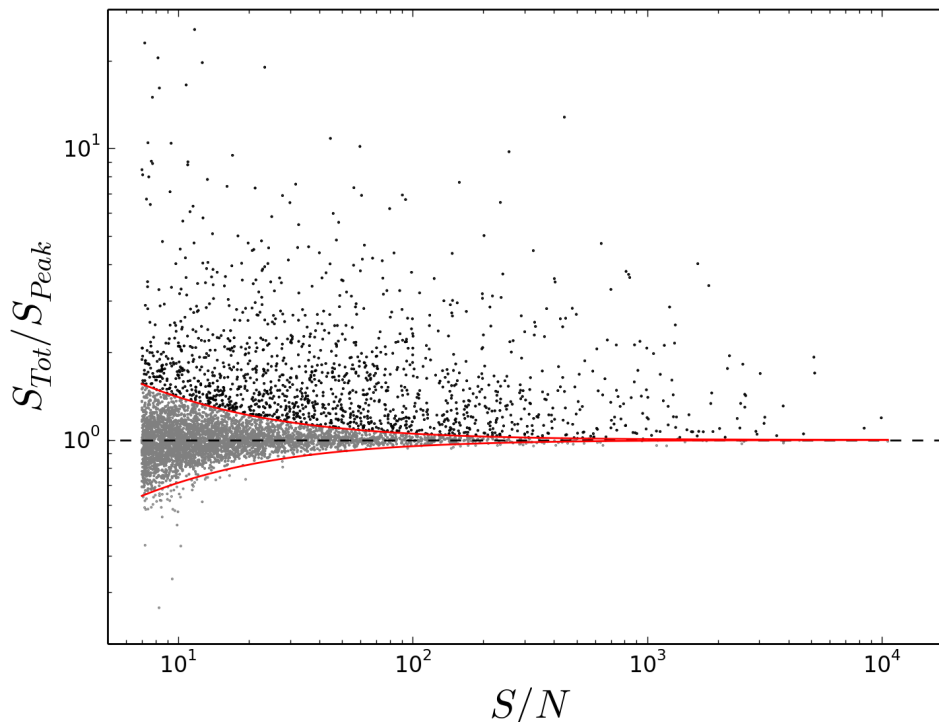
Kako bismo odvojili razlučene od nerazlučenih izvora definirali smo funkciju omotnice koja obuhvaća većinu izvora sa $S_{Tot} < S_{Peak}$. Oblik omotnice preuzeli smo iz

Miller et al. (2013.):

$$\frac{S_{Tot}}{S_{Peak}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{(S/N)^\beta}} \quad (3.1)$$

gdje su α i β koeficijenti koje možemo varirati. Odabrali smo konvenciju u kojoj omotnica obuhvaća 95% izvora sa $S_{Tot} < S_{Peak}$, pri čemu vrijedi: $\alpha = 3.2$ te $\beta = 0.9$.

Pretpostavimo li da greške koje potječu od šuma s jednakom vjerojatnošću mogu povećati i smanjiti omjer integriranog i maksimalnoga fluksa (Miller et al. 2013.), zrcaljenjem ove funkcije oko apscise obuhvatili smo sve izvore pod utjecajem šuma. Njih smo smatrali nerazlučenima te im otada nadalje integrirani fluks izjednačili s maksimalnim. Izvore iznad gornje omotnice (njih 1472) smatrali smo razlučenima, jer se omjer integriranog i maksimalnoga fluksa ne može pripisati isključivo šumu.



Slika 3.5: Graf omjera integriranoga i korigiranog maksimalnoga fluksa S_{Tot}/S_{Peak} kao funkcije omjera signala i šuma S/N . Izvore koji se nalaze iznad gornje omotnice (označene crvenom linijom) smatramo razlučenima (crne točke). Ostale izvore (sive točke) smatramo nerazlučenima.

S grafa se također može uočiti da je korekcija za kromatsku aberaciju uzeta korektno jer ne postoji sistematski odmak podataka od pravca $S_{Tot}/S_{Peak} = 1$. Naime, kako je većina izvora nerazlučeno, očekujemo da im integrirani fluks iznosi točno jednako kao i maksimalni. Sistematska odstupanja ukazivala bi na efekte kromatske aberacije.

3.3 Izvori od više komponenti

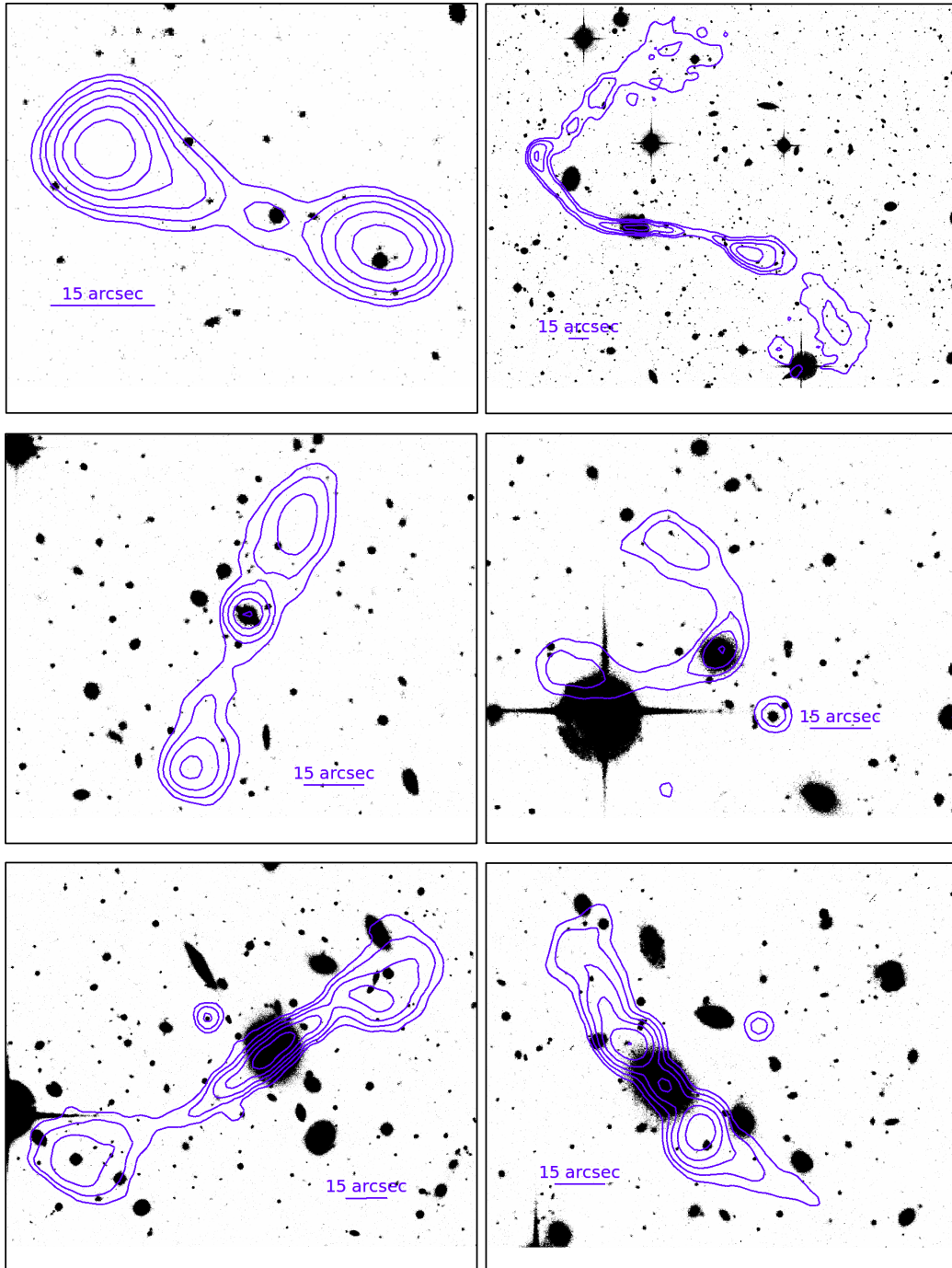
Pri stvaranju kataloga, veliki izvori difuzne strukture i kompleksne morfologije (radio mlazovi i izbočine) mogu biti upisani u katalog kao veći broj elemenata (komponenti; Smolčić et al. 2017b.). Želimo li da svaki element kataloga odgovara točno jednome radio emiteru, nužno je identificirati ovakve izvore. Vizualne inspekcije pojedinih izvora često su pod utjecajem ljudske pogreške. Kako bismo zadržali maksimalnu objektivnost pri klasifikaciji multi komponentnih izvora, koristili smo automatsku metodu. Pritom smo koristili proceduru opisanu u članku Tasse et al. iz 2006. godine. Svi izvori čija je međusobna udaljenost iznosila manje od 60 lučnih sekundi, klasificirani su kao komponente istoga izvora. Nadalje, kako bismo smanjili utjecaj pogrešne (nasumične) klasifikacije, dodan je dodatni uvjet na izvore u vanjskom djelu XXL-North polja. Grupirani su isključivo izvori čiji fluks je iznosio više od 1.4mJy . Razlog ovome ograničenju leži u relaciji veličine i fluksa (Bondi et al. 2003.). Naime, pokazuje se da su izvori većega fluksa ujedno i prostorno veći, čime je vjerojatnije da su sastavljeni od više komponenti. Direktnim računom pokazuje se da nasumična Poissonova vjerojatnost grupiranja izvora biva izrazito malena (manje od 1% za oba dijela XXL-North polja). Također napominjemo da se automatska klasifikacija uvelike slagala sa vizualnim inspekcijom. Primjeri izvora od više komponenti nalaze se na Slici 3.6.

4 Račun spektralnih indeksa

Ovo poglavlje opisuje račun spektralnih indeksa te korekciju sistematskih odstupanja koja se javljaju pri mjerenjima. Potpoglavlje 4.1 izlaže osnovne ideje računa. Potpoglavlje 4.2 opisuje spajanje našega kataloga s katalogom na 1400MHz. Potpoglavlja 4.3 i 4.4 bave se eliminacijom sistematskih odstupanja. U potpoglavlju 4.4 također navodimo i diskutiramo vrijednosti spektralnih indeksa.

4.1 Osnove računa

Pri računu spektralnih indeksa koristili smo podatke na dvjema različitim frekvencijama: GMRT podatke na 610MHz te NVSS podatke na 1400MHz. U slučaju kada detektirani izvor predstavlja zasebnu populaciju elektrona, njegov spektar zračenja



Slika 3.6: *Primjeri izvora sačinjenih od više komponenti. Slike su stvorene koristeći CFHTLS mape kontinuiranog zračenja. Plavom bojom označene su konture koje odgovaraju radio emisiji. Konture poštuju eksponencijalni rast $2^n \sigma$, $n=3,4,5..$, gdje je σ oznaka za lokalni šum. Skala slike dana je plavom linijom u kutu svake slike. Pri stvaranju slika korišten je program "ds9"¹²*

dobro je opisan modelom sinkrotronskog zračenja opisanim u uvodu. Izvori od više komponenti uvode komplikacije. Pojedinačne komponente ovih izvora posjeduju bitno drugačije spektre jer je za njihovu emisiju zaslužan samo dio cjelokupnoga emitera (Tasse et al., 2007.). Iz računa spektralnih indeksa stoga nužno je izbaciti

sve izvore od više komponenti.

Poznavanjem integriranog fluksa istoga izvora na dvjema različitim frekvencijama trivijalno dolazimo do izraza za spektralni indeks. Koristeći relaciju (1.2) dobivamo:

$$\alpha = -\frac{\log S_2 - \log S_1}{\log \nu_2 - \log \nu_1} \quad (4.2)$$

gdje su $S_{1,2}$ integrirani fluksevi na frekvenciji $\nu_{1,2}$ respektivno.

4.2 Spajanje kataloga

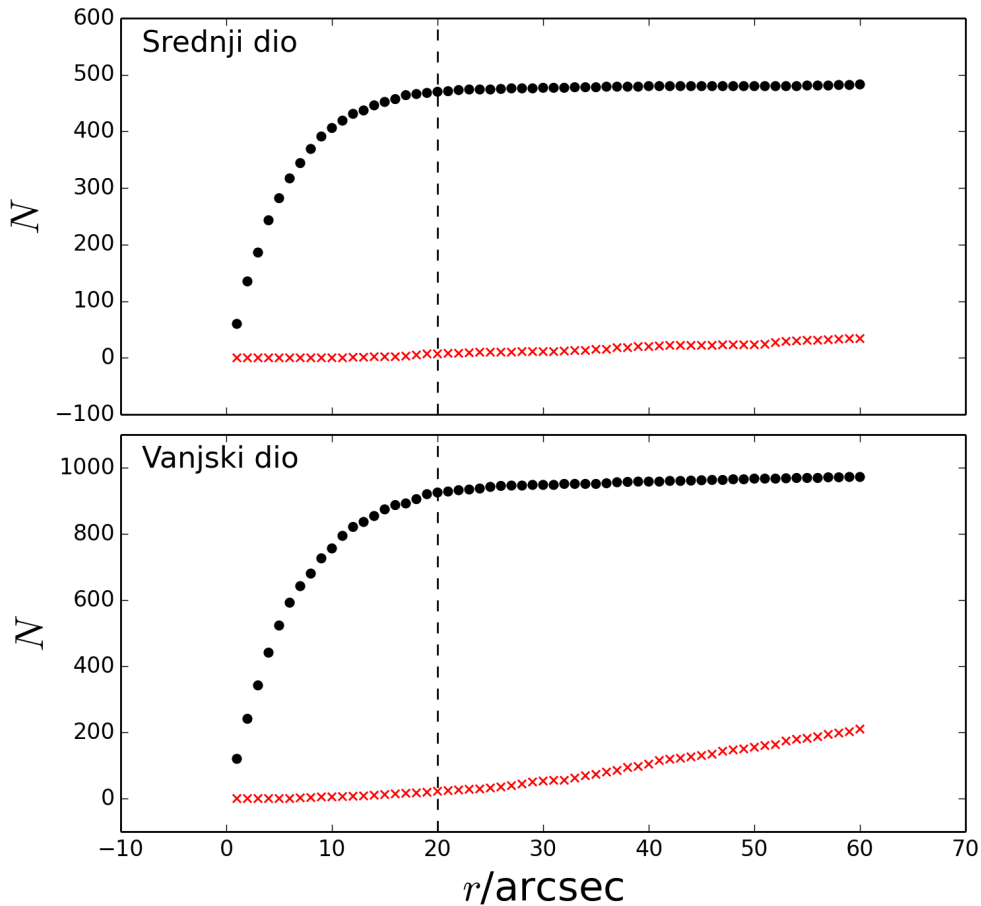
Kako smo koristili podatke različitih istraživanja (GMRT i NVSS istraživanja) nužno je bilo odrediti koji elementi dvaju kataloga odgovaraju istim fizikalnim izvorima. Elemente različitih kataloga povezali smo na osnovi njihovog položaja na nebu, dozvoljavajući pritom konačnu međusobnu udaljenost. Rezultantni katalog sastojao se stoga isključivo od izvora detektiranih unutar oba istraživanja dovoljno bliskih koordinata položaja.

Kako bismo odredili optimalnu dozvoljenu udaljenost, pored pravog NVSS polja, generirali smo i polje nasumičnih izvora iste prosječne gustoće. Varirajući dozvoljenu udaljenost (polumjer povezivanja) uspoređivali smo broj podudaranja GMRT polja s nasumičnim i pravim NVSS poljem (Slika 4.7). Povezivanje izvora GMRT polja s poljem nasumičnih izvora simulira neželjene efekte slučajnoga podudaranja. Polumjer povezivanja birali smo pazeći da ovi efekti ne igraju veliku ulogu, istovremeno pokušavajući dobiti što veći broj podudaranja s pravim NVSS poljem. Odabrali smo radius od 20 lučnih sekundi, što otprilike odgovara polovici razlučivosti NVSS polja (45 lučnih sekundi). Rezultantni katalog imao je 470 elemenata u središnjem dijelu XXL-North polja te 925 u vanjskome.

4.3 Odstupanja vezana uz detekcijski limit

Pri računu spektralnih indeksa, također je važno paziti na činjenicu da različita istraživanja (vršena različitim teleskopima) imaju različiti detekcijski limit. Detekcijski limit je najslabiji integrirani fluks kojega je moguće opaziti unutar pojedinoga istraživanja. Nužno je uočiti da izvori korišteni u računu spektralnih indeksa (relacija

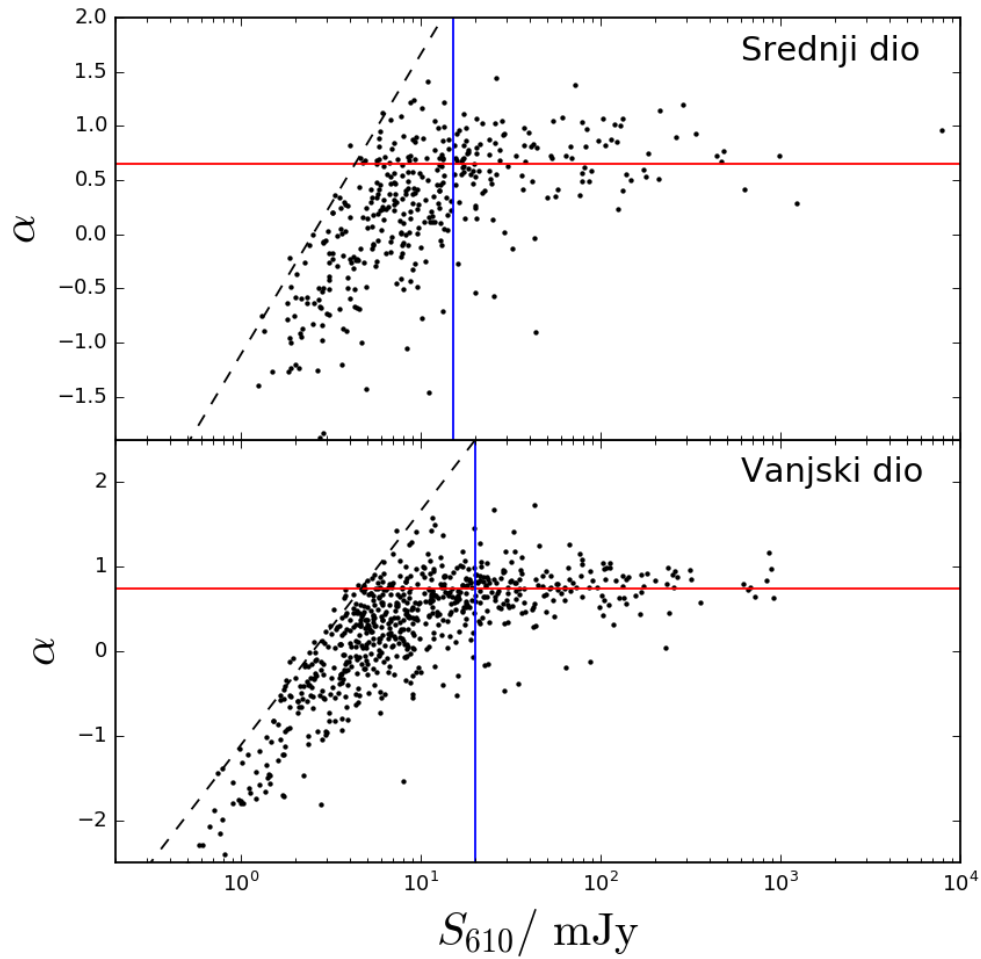
¹²<http://ds9.si.edu/site/Home.html>.



Slika 4.7: Usporedba broja podudarajućih izvora N za pravo NVSS polje (crni kružići) te polje nasumičnih izvora (crveni križići), u ovisnosti o radiusu povezivanja r , za središnji i vanjski dio XXL-North polja. Okomita iscrtkana linija označava optimalni radius od 20 lučnih sekundi (arcsec).

4.2) po definiciji moraju biti detektirani unutar oba korištena istraživanja (GMRT i NVSS). Činjenica da NVSS ima viši detekcijski limit (2.5 mJy) od GMRT istraživanja, vodi na to da mnogi izvori detektirani unutar GMRT kataloga nemaju pripadajući element unutar NVSS kataloga. Ova nesimetrija bitno utječe na prosjek spektralnih indeksa (Tasse et al. 2007.). Sistematska odstupanja vezana uz detekcijski limit zorno su prikazana na grafovima izračunatih spektralnih indeksa prikazanih u ovisnosti o integriranome fluksu GMRT polja (Slika 4.8). Jasno je vidljivo da radi detekcijskog limita NVSS polja, u području niskih flukseva, biva izostavljen nezanemariv udio spektralnih indeksa.

Srednju vrijednost spektralnoga indeksa možemo izračunati zadržavajući se u području flukseva gdje sistematska odstupanja nisu izražena. Za središnji dio XXL-North polja to je područje gdje integrirani fluks GMRT polja iznosi više od 15mJy . Srednja



Slika 4.8: Grafovi spektralnoga indeksa α u ovisnosti o integriranome fluksu GMRT polja S_{610} , za središnji i vanjski dio XXL-North polja. Kosa crtkana crna linija prikazuje detekcijski limit NVSS polja (2.5mJy). Jasno je uočljivo da, radi detekcijskog limita, točke u gornjem lijevom djelu grafa bivaju odrezane. Plava okomita linija prikazuje granicu područja u kojem su odstupanja vezana uz detekcijski limit zanemariva. Crvena horizontalna linija prikazuje srednju vrijednost spektralnog indeksa izračunatu u tom području.

vrijednost spektralnoga indeksa tada iznosi $\alpha = 0.65$. Za vanjski dio XXL-North polja to je područje fluksa većega od 20mJy, pri čemu srednji spektralni indeks iznosi $\alpha = 0.75$. Ovakve vrijednosti spektralnog indeksa u skladu su (ugrubo) s rezultatima u literaturi, gdje se redovito nalazi da je tipičan spektralni indeks galaksija 0.7 do 0.8 (Kimball & Ivezić 2008.).

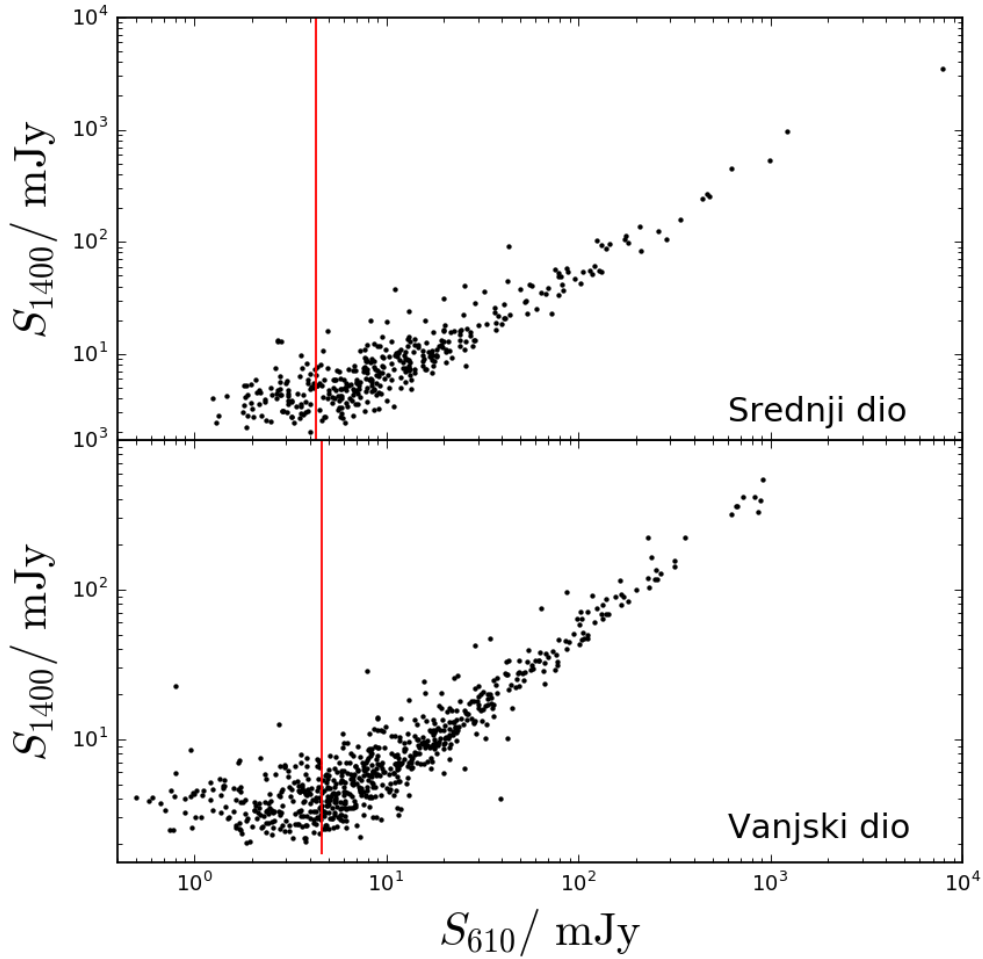
4.4 *Eliminacija sistematskih odstupanja i crtanje histograma spektralnih indeksa*

Odstupanja radi detekcijskoga limita moguće je uočiti i usporedbom integriranih flukseva dvaju istraživanja (Slika 4.9). U slučaju identičnih detekcijskih limita, točke grafa trebale bi ugrubo iscrtavati pravac. Odstupanje od pravca, vidljivo pri niskim fluksevima, posljedica je razlike u detekcijskim limitima. Koristeći srednje vrijednosti spektralnih indeksa iz prošloga poglavlja te relaciju (4.2), bili smo u stanju odrediti detekcijski limit GMRT polja koji bi, u idealnome slučaju bez sistematskih odstupanja, odgovarao detekcijskome limitu NVSS polja. Dobili smo limit od 4.28mJy za središnji dio XXL-North polja te 4.64mJy za vanjski. Ovime efektivno odvajamo dio točaka u području slabih flukseva koje odstupaju od očekivanoga pravca. Te točke eliminirali smo iz daljnjih računa spektralnih indeksa.

Nakon izdvajanja izvora od više komponenti, te točaka koje stvaraju sistematska odstupanja vezana uz detekcijski limit, preostala su 299 izvora u središnjem dijelu, te 488 izvora u vanjskome dijelu XXL-North polja. Izračunali smo spektralne indekse ovih izvora te ih prikazali u obliku histograma. Ponovno smo razdijelili podatke na središnji i vanjski dio XXL-North polja. Također, odvojeno smo promatrali razlučene i nerazlučene izvore. Dobiveni histogrami nalaze se na Slici 4.10.

Uočili smo da dobiveni histogrami imaju vrh u području pozitivnih spektralnih indeksa, iz čega se može zaključiti da spektri većine promatranih izvora poštuju eksponencijalni zakon relacije (1.2). Srednje vrijednosti spektralnih indeksa prikazane su na Slici 4.10. Histogrami za razlučene i nerazlučene izvore pokazuju određene različitosti. Nerazlučeni izvori (za oba dijela XXL-North polja) u prosijeku češće posjeduju ravan spektar ($\alpha < 0.5$). Nasuprot tome, razlučeni izvori imaju prosječno strmije spektre. Ovaj trend u skladu je s drugim istraživanjima (Kimball & Ivezić 2008., Tasse et al. 2007.).

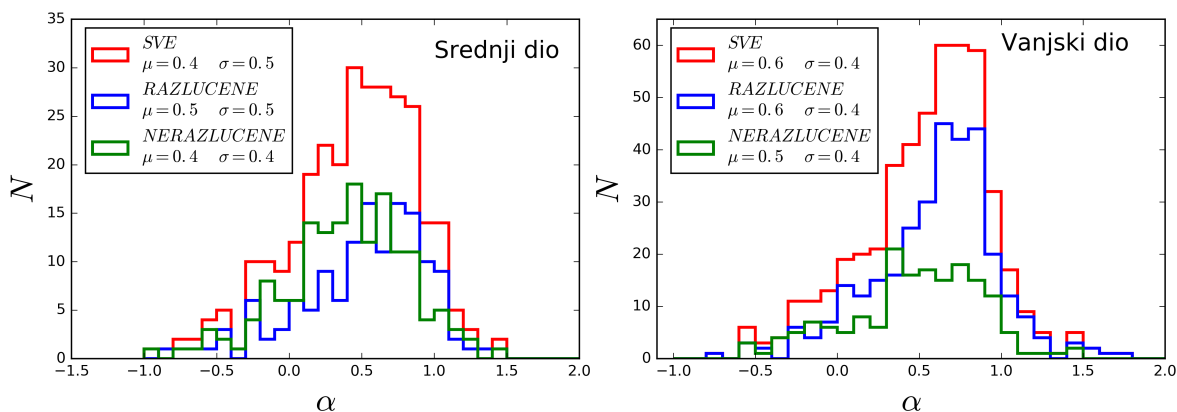
Pri objašnjavanju ovih pojava nužno je bilo uočiti da, radi detekcijskih limita našega istraživanja, velika većina detektiranih izvora odgovaraju aktivnim galaktičkim jezgrama (Smolčić et al. 2017a). Spektri sinkrotronskog zračenja aktivnih galaktičkih jezgri bitno se razlikuju za kompaktne i proširene izvore. Kod kompaktnih izvora dominira zračenje iz sredine izvora (*engl. core*). Spektar kompaktnih izvora ravan je duž velikog raspona frekvencija. Ova pojava često se objašnjava nehomogenostima



Slika 4.9: Slika prikazuje usporedbu integriranih flukseva GMRT (S_{610}) i NVSS (S_{1400}) istraživanja, za srednji i vanjski dio XXL-North polja. Crvena crtkana linija označava izračunati detekcijski limit GMRT polja u idealnom slučaju bez odstupanja (vidjeti tekst za detalje).

unutar izvora ili pak pretpostavkom da se izvor sastoji od nekoliko diskretnih emitera smještenih unutar same sredine. Oba ova scenarija vode na to da su različiti dijelovi kompaktnoga emitera optički duboki na različitim frekvencijama, što može dovesti do zaravnavanja spektra¹³. Prošireni izvori zrače dominantno iz optički tankih izbočina (*engl. lobe*). Spektri ovakvih izvora u prosjeku su strmiji. Radi razlika u veličini, kompaktni izvori većinom su nerazlučeni, dok su prošireni većinom razlučeni.

¹³http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Cambridge/Cambridge1_3_1.html



Slika 4.10: Histogrami spektralnih indeksa za srednji i vanjski dio XXL-North polja. Posebno su prikazane vrijednosti za razlučene (plavo) i nerazlučene (zeleno) izvore. Izračunate srednje vrijednosti μ i standardne devijacije σ dane su u legendi.

5 Spajanje s optičkim katalogom

U ovome poglavlju opisujemo spajanje našeg kataloga s katalogom u optičkome području spektra, koji sadrži crvene pomake izvora. Potpoglavlje 5.1 daje kratak opis optičkog kataloga, dok potpoglavlje 5.2 opisuje proces spajanja dvaju kataloga.

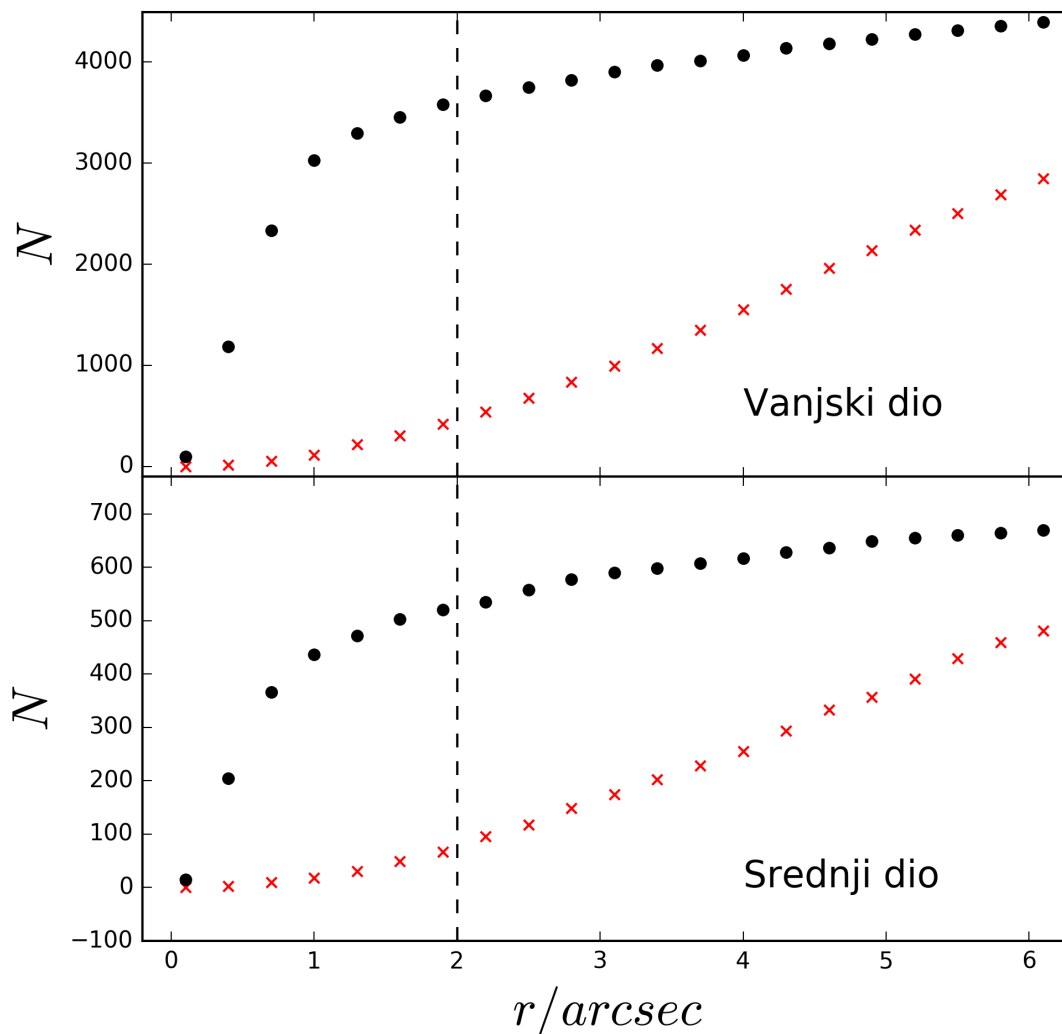
5.1 Crveni pomaci

Pri stvaranju funkcija luminoziteta potrebno je poznavati crvene pomake pojedinih izvora. Za potrebe ovoga istraživanja crvene pomake preuzeli smo iz kataloga u optičkome i infracrvenome području opisanoga u poglavlju 2.6. Crveni pomaci u ovome katalogu izračunati su fotometrijskom metodom.

5.2 Spajanje kataloga

Posebna pažnja ponovno je morala biti posvećena spajanju dvaju kataloga: našega radio kataloga s optičkim katalogom. Pretpostavili smo da detekcije istoga položaja pripadaju istome izvoru iako su frekvencije opažanja dvaju istraživanja bitno različite (optičke i radio). Opravdanje možemo naći u tipičnome izgledu spektra galaksija koji se proteže duž velikoga raspona frekvencija te je istaknut i u radio i u optičkome području (Calistro Rivera et al. 2016.). Kako su detektirani izvori većinom aktivne galaktičke jezgre, očekivali smo stoga da su vidljive i u radio i u optičkome području. Pri spajanju koristimo sve izvore radio kataloga sa $S/N > 7$, bez eliminacije izvora

od više komponenti. Pažnju treba posvetiti i pojavi nasumičnih podudaranja. Nasumična podudaranja simulirali smo kreirajući umjetni katalog izvora nasumičnih položaja (proces analogan onome opisanome u 4.2). Broj podudaranja s pravim i nasumičnim optičkim katalogom prikazan je na Slici 5.11. Radi optimalnog omjera nasumičnih i stvarnih podudaranja (0.17 za unutarnji dio polja te 0.13 za vanjski), odlučili smo se za radius spajanja od 2 lučne sekunde. Pritom je broj podudaranja iznosio 526 za unutarnji dio polja i 3620 za vanjski. Pri stvaranju funkcija luminoziteteta izostavili smo, nadalje, izvore u neposrednoj blizini ruba XXL-North polja radi postojanja povećanog šuma u tom području. Preostala su 433 izvora u unutarnjem dijelu polja i 2846 u vanjskome.



Slika 5.11: Omjer stvarnih (crno) i nasumičnih (crveno) podudaranja pri spajanju optičkoga kataloga s našim GMRT podacima, za oba dijela XXL-North polja. Okomita ctkana linija označava optimalni radius spajanja od 2 lučne sekunde.

6 Funkcije luminoziteta

U ovome poglavlju opisujemo stvaranje funkcija luminoziteta te diskutiramo rezultate. Potpoglavlje 6.1 opisuje metodu stvaranja funkcija luminoziteta te potrebne korekcije. Potpoglavlje 6.2 bavi se detaljima oko računa samoga luminoziteta izvora. Zadnja tri potpoglavlja donose rezultatne funkcije luminoziteta te njihovu usporedbu s literaturom. Diskutiramo i važnost ovoga istraživanja naspram ostalih.

6.1 Konstrukcija funkcija luminoziteta

Pri konstrukciji funkcija luminoziteta koristimo se metodom opisanoj u Schmidt 1968 (vidjeti i Condon 1989.). Izvore smo podijelili na podskupove po luminozitetu, te unutar svakoga podskupa izbrojili količinu detektiranih izvora. Komplikacije nastaju iz činjenice da je naše istraživanje ograničeno detekcijskim limitom, odnosno najmanjim fluksom kojega je moguće opaziti. Stoga je dio slabih izvora ostao nedetektiran čime se bitno mijenja prostorna gustoća. Način da se kompenzira ovaj efekt jest da se svaki izvor pri zbrajanju podijeli s maksimalnim volumenom u kojem je moguće detektirati taj izvor (Schmidt 1968). Mjera prostorne gustoće izvora za određeni podskup luminoziteta Φ računa se stoga po formuli:

$$\Phi = \frac{1}{\Delta \log L} \sum_i \frac{1}{V_{max,i}} \quad (6.3)$$

gdje je $\Delta \log L$ širina luminozitetnog podskupa, a suma ide po svim izvorima toga podskupa. $V_{max,i}$ je najveći mogući volumen u kojem se može nalaziti pojedini izvor, a da je njegov fluks iznad detekcijskoga limita istraživanja (Condon 1989.). Naime, poznavajući fluks i crveni pomak pojedinoga izvora, mogli smo izračunati njegov luminozitet (npr. Delhazie et al. 2017.; vidjeti i sljedeće potpoglavlje). Uzimajući da je luminozitet izvora njegovo stvarno fizikalno svojstvo, računali smo fluks koji bi taj izvor imao u slučaju da se nalazi na većim udaljenostima. Udaljenost nakon koje je izračunati fluks manji od detekcijskoga limita jest granična udaljenost detekcije unutar ovoga istraživanja. Ta udaljenost bila je korištena za račun maksimalnoga mogućega volumena u kojem se izvor može naći V_{max} .

Radi postojanja evolucije funkcija luminoziteta (Condon 1989.; opisano i u uvodu), ukupni uzorak opaženih izvora podijeliti smo na podskupove manjih raspona crve-

nih pomaka. Unutar pojedinoga podskupa evolucija može biti zanemarena, dok usporedba funkcija luminoziteta različitih podskupova daje uvid u evoluciju aktivnih galaktičkih jezgri. Pri stvaranju funkcija luminoziteta primijenjene su i potrebne korekcije. Prva (najočitija) korekcija odnosi se na činjenicu da promatramo samo mali dio nebeske sfere: 20, 36 kvadratnih stupnjeva od ukupnih 41252.96 (12.66 kvadratna stupnja za vanjski i 7.7 kvadratna stupnja za unutarnji dio XXL-North polja). Stoga je naš uzorak očito nepotpun te izračune prostorne gustoće treba korigirati (Mauch & Sadler 2007.). Druga korekcija odnosi se na kompletnost korištenoga uzorka, radi varijacije šuma unutar promatranoga polja. Naime, neki od izvora koji bi trebali biti detektirani ostaju neopaženi jer je njihov fluks smanjen posljedicom šuma. Ove efekte eliminirali smo usporedbom našega istraživanja s dubljim istraživanjem provedenim u istome rasponu flukseva. Pritom smo koristili podatke COSMOS istraživanja¹⁴. Iako je COSMOS istraživanje vršeno na drugom predjelu neba, očekivali smo da će normalizirani broj izvora biti jednak. Pri tome je važno da su oba polja dovoljno velika da se mogu zanemariti nehomogenosti u gustoći svemira (Baran et al. 2016.). Usporedbom broja detektiranih izvora s brojem izvora COSMOS istraživanja odredili smo količinu izvora koji nedostaju. Izračunate korekcije ovise o fluksu te su navedene u Tablici 6.1. Za detalje oko ove korekcije vidjeti Smolčić et al. (u postupku recenzije).

Dio XXL-North polja	S_{610MHz}/mJy	Omjer detekcija
Unutarnji dio	1.24	0.09
	1.92	0.42
	2.96	0.61
	4.58	0.88
Vanjski dio	0.30	0.06
	0.39	0.31
	0.51	0.66
	0.67	0.73
	0.87	0.78
	1.24	0.82
	1.92	0.87
	2.96	0.89
4.58	0.89	

Tablica 6.1: Korekcija koja je nužna radi nekompletnosti našega uzorka radi postojanja šuma unutar XXL-North polja. Korekcija ovisi o fluksu promatranoga izvora S_{610MHz}/mJy te se razlikuje za unutarnji i vanjski dio XXL-North polja.

¹⁴<http://cosmos.astro.caltech.edu/>

Greške na vrijednost prostorne gustoće σ računete su kao (Krziesinski et al. 2009.):

$$\sigma = \frac{1}{\Delta \log L} \sqrt{\sum_i \frac{1}{(V_{max,i})^2}} \quad (6.4)$$

Treba napomenuti da greške računete na ovaj način ne uzimaju u obzir greške koje postoje u mjerenju luminoziteta (Geijo et al. 2006), niti greške u računu spektralnih indeksa, te stoga podcjenjuju ukupnu grešku.

6.2 Račun luminoziteta

Pažnju treba posvetiti i računu luminoziteta L_{610MHz} . Naime, radi udaljenosti izvora trebali smo uzeti u obzir i kozmološke efekte koji se javljaju radi širenja svemira. Koristili smo formulu (Delhazie et al. 2017.):

$$L_{610MHz} = \frac{S_{610MHz} 4\pi D_L^2}{(1+z)^{1+\alpha}} \quad (6.5)$$

gdje je S_{610MHz} oznaka za fluks na 610 Mhz, a D_L oznaka za "luminozitetnu udaljenost": generalizaciju udaljenost definirane pomoću luminoziteta za svemir koji se širi (Copeland et al. 2006.). Za potrebe ovoga istraživanja važno je znati da, uz odabir fiksnih kozmoloških konstanti, D_L biva funkcija crvenih pomaka $D_L(z)$ (Copeland et al. 2006.). Pri izračunu $D_L(z)$ iz poznatih crvenih pomaka koristili smo "python-biblioteku" `astropy`¹⁵. Pritom je bilo nužno odabrati kozmološke konstante. Odabrali smo Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker (FLRW) kozmologiju bez zakrivljenosti te: Hubbleovu konstantu $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ i gustoću nerelativističke materije $\Omega_m = 0.3$.

Spektralni indeksi koji nisu bili pod utjecajem sistematskih odstupanja (vidjeti poglavlja 4.3 i 4.4) korišteni su u računu luminoziteta nepromijenjeni. Ostale vrijednosti spektralnih indeksa postavljene su na 0.7 za oba dijela XXL-North polja, što odgovara srednjoj vrijednosti prosječnog spektralnoga indeksa za oba dijela polja. Također valja ponovno napomenuti da smo pri stvaranju funkcija luminoziteta bili u stanju koristiti isključivo izvore za koje smo uspjeli odrediti crveni pomak.

¹⁵<http://www.astropy.org/>

6.3 Funkcije luminoziteta unutarnjeg dijela XXL-North polja

Funkcije luminoziteta unutarnjega dijela XXL-North polja nalaze se na Slici 6.12. Pored podataka iz ovoga istraživanja prikazani su i podaci drugih istraživanja. U slučaju kada se rasponi crvenih pomaka nisu posve podudarali, preuzeti podaci evoluirani su pomoću parametara evolucije preuzetih iz pripadajućeg istraživanja. Podaci preuzeti iz Donoso et al. 2009. dolaze od istraživanja 14,000 radio glasnih aktivnih galaktičkih jezgri, te su stoga neodređenosti ovih mjerenja malene. Sa slike se vidi da je slaganje dobro. Podaci preuzeti od McAlpine et al. 2013. odnose se na istraživanje evolucije slabih aktivnih galaktičkih jezgri unutar VIDEO-XMM3 polja. Podaci se protežu na veće udaljenosti, a slaganje je također zadovoljavajuće. Podaci preuzeti od Padovani et al. 2015. odnose se na istraživanje radio glasnih aktivnih galaktičkih jezgri E-CDFS polja. Neodređenosti ovoga istraživanja su veće radi manjeg broja opaženih izvora, no slaganje je (pogotovo na manjim udaljenostima) i dalje dobro. Podaci iz Sadler et al. 2007. dolaze od 2SLAQ istraživanja 391 radio galaksija. Udaljenosti izvora su manje, a slaganje je dobro. Točke preuzete iz Smolčić et al. 2009. dio su VLA-COSMOS opažanja vršenih na 1.4GHz, dok podaci iz Smolčić et al. 2017c. pripadaju istome polju ali mjerenom na 3GHz. Podaci na 3GHz dostupni su na većem rasponu udaljenosti jer je osjetljivost opažanja bila veća. Podudaranje s našim podacima ponovno je zadovoljavajuće. Treba ponovno napomenuti da greške prikazane na grafu podcjenjuju stvarnu grešku jer ne propagiraju korektno greške mjerenja luminoziteta te računa spektralnoga indeksa. Sa slika je također moguće uočiti da točka najnižeg luminoziteta ponekad odstupa od ostalih podataka. Ovo odstupanje pripisuje se nekompletnosti optičkoga kataloga kojega smo koristili pri određivanju crvenih pomaka. Naime, svaki izvor korišten pri stvaranju funkcija luminoziteta morao je biti detektiran u tom katalogu. Uz pretpostavku da su izvori slaboga sjaja radio kataloga također slaboga sjaja u optičkome području, slijedi da nekompletnost optičkoga kataloga dovodi do odstupanja funkcija luminoziteta u području malih radio luminoziteta.

Pored opažanja, priložen je i model funkcije luminoziteta preuzet iz Smolčić et al. 2017c., opisan relacijom:

$$\Phi(L, z, \alpha_D, \beta_D, \alpha_L, \beta_L) = (1 + z)^{\alpha_D + z \cdot \beta_D} \times \Phi_0 \left[\frac{L}{(1 + z)^{\alpha_L + z \cdot \beta_L}} \right] \quad (6.6)$$

gdje se dopušta eksponentu člana $(1 + z)$ da ima ovisnost o pomaku ka crvenome. Pritom je Φ_0 lokalna funkcija luminoziteta (Mauch & Sadler 2007.) oblika:

$$\Phi_0(L) = \frac{\Phi^*}{(L/L^*)^\alpha + (L/L^*)^\beta} \quad (6.7)$$

gdje je: $\Phi^* = \frac{1}{0.4} \cdot 10^{-5.5} \text{Mpc}^{-3} \text{dex}^{-1}$, $L^* = 10^{24.59} \text{WHZ}^{-1}$, $\alpha = -1.27$, and $\beta = -0.49$. Parametri modela, koji opisuju evoluciju funkcija luminoziteta preuzeti su također iz članka Smolči et al. 2017c. te iznose: $\alpha_D = 0$, $\alpha_L = 2.88 \pm 0.82$, $\beta_D = 0$, $\beta_L = -0.84 \pm 0.34$ (što odgovara evoluciji luminoziteta). Dobiveni su prilagodbbom relacije (6.6) na podatke toga istraživanja. Sa slike je jasno da je slaganje s modelom također zadovoljavajuće.

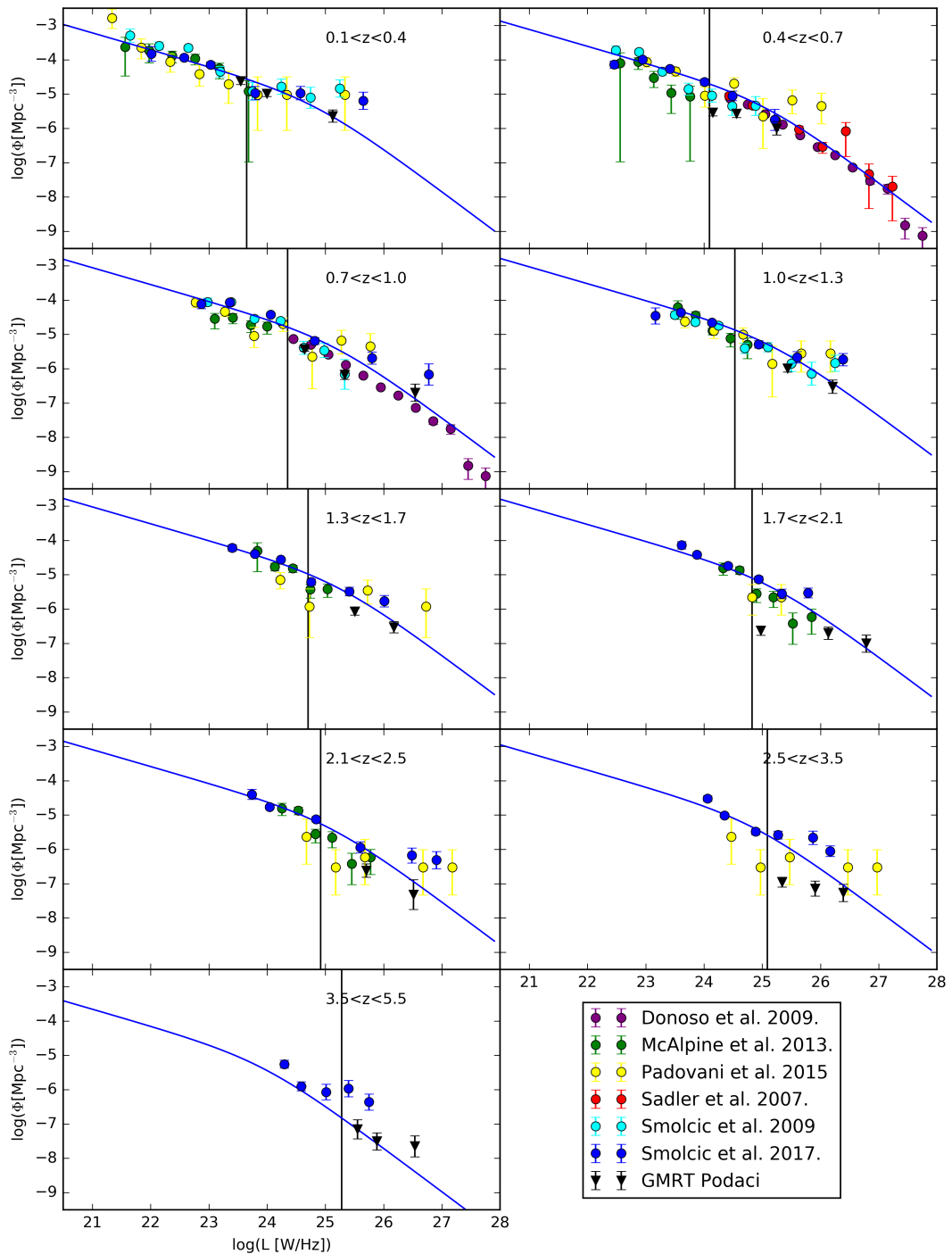
6.4 Funkcije luminoziteta vanjskoga dijela XXL-North polja

Funkcije luminoziteta vanjskoga dijela XXL-North polja nalaze se na Slici 6.13. Podaci drugih istraživanja identični su onima iz prošlog potpoglavlja. Prikazani model je također identičan. Uočavamo da je slaganje ponovno zadovoljavajuće. Broj točaka u vanjskome dijelu polja je veći pa su stoga neodređenosti naših mjerenja nešto manje.

6.5 Funkcije luminoziteta cijeloga XXL-North polja

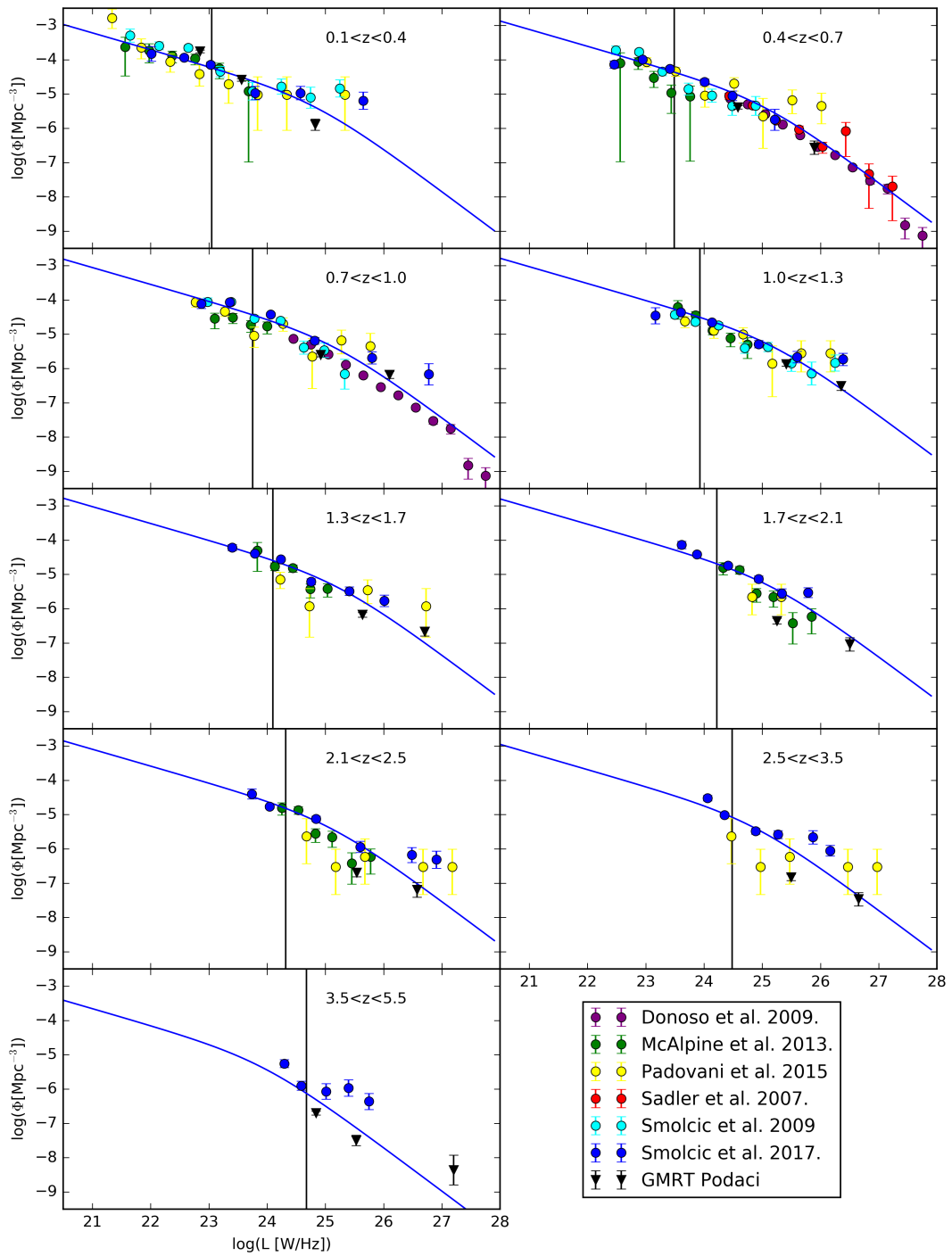
Na Slici 6.14. prikazujemo funkcije luminoziteta cijeloga XXL-North polja. Spajanje dijelova XXL-North polja provedeno je tako da su izvori oba dijela XXL-North polja korišteni zajedno u relaciji (6.3). Maksimalni volumeni u kojima je moguća detekcija pojedinih izvora izračunata je pomoću detekcijskog limita pripadajućeg dijela polja. Slaganje s ostalim istraživanjima i dalje je dobro. Broj izvora u uzorku sada je veći nego u prošlim poglavljima, te su stoga neodređenosti točaka još manje.

Važno je napomenuti kako veličina i dubina XXL-North polja utječe na funkcije luminoziteta. Kada je promatrano polje izrazito veliko tada postoji veća vjerojatnost da se detektiraju sjajni izvori. Velika količina sjajnih izvora davat će funkcije luminoziteta koje se nalaze na strani grafa gdje su luminoziteti veliki. Ako pak istraživanje posjeduje veliku dubinu opažanja, tada će funkcije luminoziteta moći biti stvarane na velikim pomacima ka crvenome. Naše istraživanje XXL-North polja nalazi se neg-



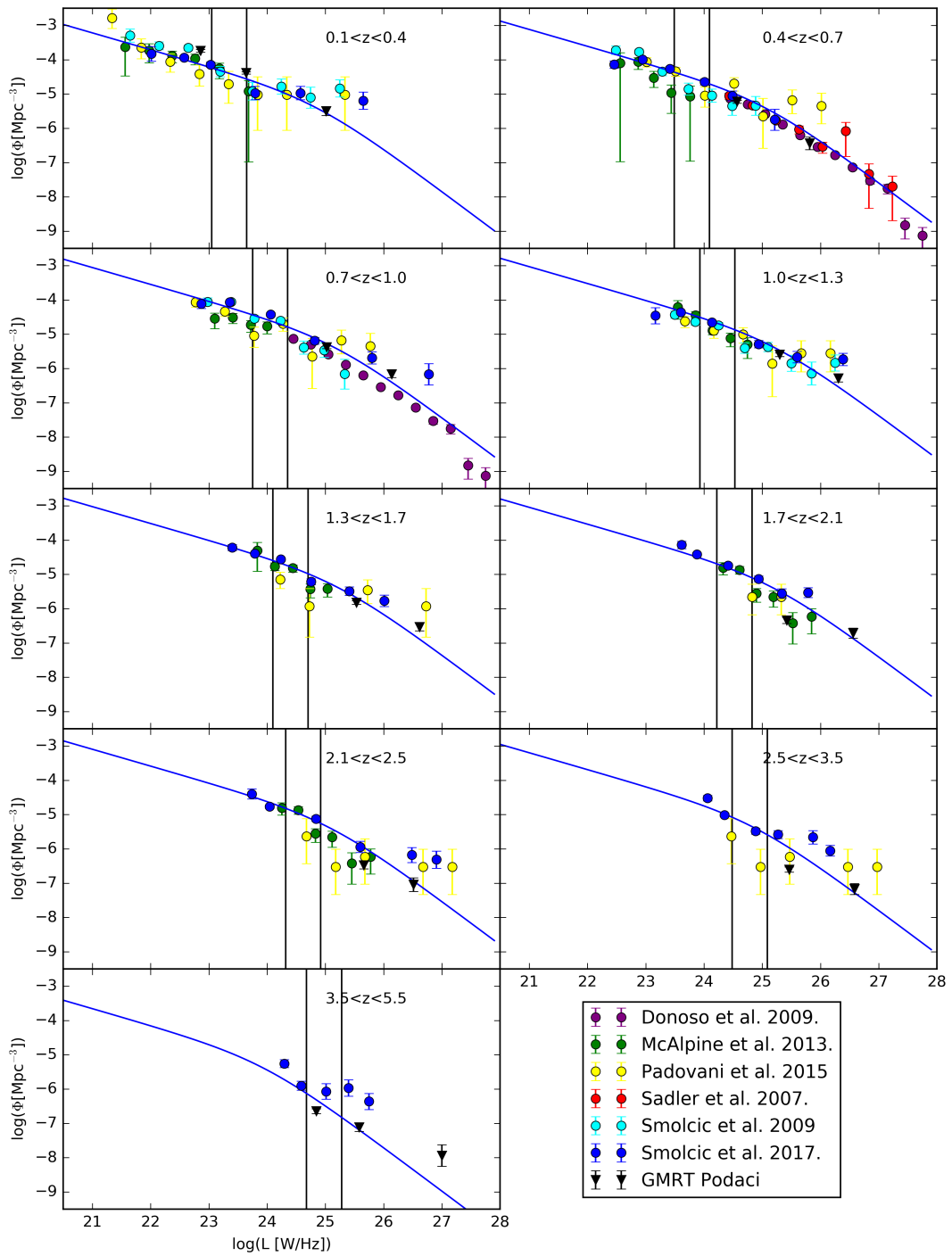
Slika 6.12: Funkcije luminoziteta unutarnjeg dijela XXL-North polja. Pored naših GMRT podataka, prikazani su i podaci ostalih istraživanja koja su popisana u legendi. Okomite linije predstavljaju detekcijski limit preračunat u luminozitet na gornjem rubu podskupa crvenog pomaka. Plava linija odgovara modelu evolucije funkcija luminoziteta preuzetom iz Smolčić et al. 2017c.

dje između ova dva scenarija jer kombinira relativnu veličinu polja s nezanemarlivom dubinom. Promatrani izvori protežu se stoga i na veće luminozitete i na velike cr-



Slika 6.13: Funkcije luminozитета kao u Slici 6.12. ali za vanjski dio XXL-North polja.

vene pomake. Stoga su mjerenja provedena u ovom istraživanju važna za shvaćanje funkcija luminozитета aktivnih galaktičkih jezgri.



Slika 6.14: Funkcije luminoziteteta kao u Slici 6.12. za oba dijela XXL-North polja zajedno.

7 Zaključak

Promatrali smo izvore detektirane unutar XXL-North polja GMRT radio teleskopom. Mjerenja su vršena na frekvenciji od 610MHz. Radi detekcijskoga limita istraživanja

uzorak detektiranih izvora sastojao se uglavnom od aktivnih galaktičkih jezgri. Pored vlastitih opažanja koristili smo i podatke na 1400MHz NVSS istraživanja čime smo bili u stanju odrediti nagib spektra tj. spektralne indekse. Pri računu spektralnih indeksa posvetili smo mnogo pažnje eliminaciji sistematskih odstupanja. Izračuni spektralnih indeksa bili su konzistentni s ostalim publikacijama. Posebno je bila zanimljiva razlika između spektralnih indeksa razlučenih i nerazlučenih izvora. Ova razlika upućuje na drugačiju optičku dubinu razlučenih i nerazlučenih izvora što je očekivano iz poznavanja morfologije aktivnih galaktičkih jezgri. Razlika je također konzistentna s ostalim publikacijama.

Konstruirali smo funkcije luminoziteta podijeljene na podskupove određenih crvenih pomaka za oba dijela XXL-North polja te ih usporedili s ostalim istraživanjima. Podudaranja su bila zadovoljavajuća. Relativna veličina XXL-North polja dovela je do toga da su neki od izvora posjedovali velik luminozitet. Dubina istraživanja dovela je do detekcije izvora s velikim crvenim pomakom. Slijedilo je da su stvorene funkcije luminoziteta ležale između izrazito dubokih i izrazito širokih istraživanja, te tako bile važna poveznica ovih istraživanja. Kao takve pružaju važan doprinos stvaranju funkcija luminoziteta preko velikog raspona luminoziteta što je potrebno za cjelokupno modeliranje evolucije raznih vrsta aktivnih galaktičkih jezgri kroz kozmičko vrijeme (npr. Willott et al. 2001.).

Bibliography

- [1] Astropy: A Community Python Library for Astronomy, (15.11.2017.), Astropy: a community-developed core Python package for Astronomy (Astropy Collaboration, 2013), <http://www.astropy.org/>, 1.1.2018.
- [2] Baran, N.; Smolčić, V.; Milaković, D. et al. The XXL Survey. IX. Optical overdensity and radio continuum analysis of a supercluster at $z = 0.43$. // *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 592, (2016), id.A8, 15 pp.
- [3] Baryshev, Y. V. Two fundamental cosmological laws of the Local Universe. // *International Conference Cosmology on Small Scales: Local Hubble Expansion and Selected Controversies in Cosmology 2016*, edited by Krizek and Dumin, Prague: Institute of Mathematics, Czech Academy of Sciences 2016. Str. 9-22.
- [4] Beckman V.; Shrader C. *Active Galactic Nuclei*. Weinheim, Germany : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012
- [5] Bentz, M. C. AGN Reverberation Mapping. // *ESO Workshop: Astronomy at High Angular Resolution - A Cross Disciplinary Approach held in Garching in November 2014*, eprint arXiv:1505.04805 (2015)
- [6] Bolzonella, M.; Miralles, J.-M.; Pelló, R. Photometric redshifts based on standard SED fitting procedures. // *Astronomy and Astrophysics*, Vol .363, (2000), str 476-492.
- [7] Bonato, M.; Negrello, M.; Mancuso, C. et al. Does the evolution of the radio luminosity function of star-forming galaxies match that of the star formation rate function? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 469, 2(2017), str. 1912-1923.
- [8] Bondi, M.; Ciliegi, P.; Schinnerer, E.; Smolčić, V.; Jahnke, K.; Carilli, C.; Zamorani, G. The VLA-COSMOS Survey. III. Further Catalog Analysis and the Radio Source Counts. // *The Astrophysical Journal*, Vol. 681, 2(2008), str. 1129-1135
- [9] Bondi, M.; Ciliegi, P.; Zamorani, G. et al. The VLA-VIRMOS Deep Field. I. Radio observations probing the μ Jy source population. // *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 403, (2003), str. .857-867

- [10] Bunn, E. F.; Hogg, D. W. The kinematic origin of the cosmological redshift. // American Journal of Physics, Volume 77, 8(2009), str. 688-694.
- [11] Burbidge, G. R. On Synchrotron Radiation from Messier 87. // Astrophysical Journal, Vol. 124, (1956), str. 416-430.
- [12] Calistro Rivera, G.; Lusso, E.; Hennawi, J. F.; Hogg, D. W. AGNfitter: A Bayesian MCMC Approach to Fitting Spectral Energy Distributions of AGNs. // The Astrophysical Journal, Vol. 833, 1(2016), article id. 98, 20 pp.
- [13] Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey, (31.10.2012), Canada-France-Hawaii Telescope, <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/>, 1.1.2018.
- [14] Carroll B. W.; Ostlie D, A. An introduction to modern astrophysics. 2nd ed. San Francisco : Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley, 2007.
- [15] Condon, J. J. Radio emission from normal galaxies // Annual review of astronomy and astrophysics. Vol. 30, (1992), str. 575-611.
- [16] Condon, J. J. Radio Luminosity Functions. // Extragalactic radio sources: proceedings of the 175th Symposium of the International Astronomical Union 1995. / edited by Ekers, Fanti and Padrielli. Bologna: Kluwer Academic Publishers, 1996. Str. 535-541.
- [17] Condon, J. J. The 1.4 gigahertz luminosity function and its evolution. // Astrophysical Journal, Vol. 338, 1(1989), str. 13-23..
- [18] Condon, J. J.; Cotton, W. D.; Greisen, E. W.; Yin, Q. F.; Perley, R. A.; Taylor, G. B.; Broderick, J. J. The NRAO VLA Sky Survey. // The Astronomical Journal, Vol. 115, 5(1998), str. 1693-1716.
- [19] Copeland, E. J.; Sami, M.; Tsujikawa, S. Dynamics of Dark Energy. // International Journal of Modern Physics D, Vol. 15, 11(2006), str. 1753-1935.
- [20] Cosmic Evolution Survey (COSMOS), (6.10.2017.), California Institute of Technology, <http://cosmos.astro.caltech.edu/>, 1.1.2018.
- [21] Delhaize, J.; Smolčić, V.; Delvecchio, I. et al. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: The infrared-radio correlation of star-forming galaxies and AGN to $z \leq 6$. // Astronomy & Astrophysics, Volume 602, (2017), id.A4, 17 pp.

- [22] Donoso, E.; Best, P. N.; Kauffmann, G. Evolution of the radio-loud galaxy population. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 392, 2(2009), str. 617-629.
- [23] Essential Radio Astronomy, (14.03.2016), National Radio Astronomy Observatory, http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/ERA_old.shtml, 1.1.2018.
- [24] Geijo, E. M.; Torres, S.; Isern, J.; García-Berro, E. The white dwarf luminosity function - I. Statistical errors and alternatives. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 369, 4(2006), str. 1654-1666.
- [25] Giant Metrewave Radio Telescope, Tata Institute of Fundamental Research, <http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/>, 1.1.2018.
- [26] Gruppioni, C.; Pozzi, F.; Rodighiero, G.; Delvecchio, I. et al. The Herschel PEP/HerMES luminosity function - I. Probing the evolution of PACS selected Galaxies to $z \sim 4$. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 432, 1(2013), str. 23-52.
- [27] Hubble, E. A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 15, 3(1929), str. 168-173.
- [28] Intema, H. T.; Jagannathan, P.; Mooley, K.; Frail, D. A. The GMRT 150 MHz all-sky radio survey. First alternative data release TGSS ADR1. // *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 598, (2017), id.A78, 28 pp.
- [29] Kimball, A. E.; Ivezić, Ž. A Unified Catalog of Radio Objects Detected by NVSS, First, WENSS, GB6, and SDSS. // *The Astronomical Journal*, Vol. 136, 2(2008), str. 684-712.
- [30] Kimball, A. E.; Kellermann, K. I.; Condon, J. J.; Ivezić, Ž.; Perley, R. A. The Two-component Radio Luminosity Function of Quasi-stellar Objects: Star Formation and Active Galactic Nucleus. // *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 739, 1(2011), L29 5 pp.
- [31] Krzesinski, J.; Kleinman, S. J.; Nitta, A.; Hügelmeier, S.; Dreizler, S.; Liebert, J.; Harris, H. A hot white dwarf luminosity function from the Sloan Digital Sky Survey. // *Astronomy and Astrophysics*, Volume 508, 1(2009), str.339-344

- [32] Lee, C.-H. Accurate spectroscopic redshift of the multiply lensed quasar PSOJ0147 from the Pan-STARRS survey. // *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 605, (2017), id.L8, 4 pp.
- [33] Mauch, T.; Sadler, E. M. Radio sources in the 6dFGS: local luminosity functions at 1.4GHz for star-forming galaxies and radio-loud AGN. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 375, 3(2007), str. 931-950.
- [34] McAlpine, K.; Jarvis, M. J.; Bonfield, D. G. Evolution of faint radio sources in the VIDEO-XMM3 field. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 436, 2(2013), str. 1084-1095.
- [35] Miller, N. A.; Bonzini, M.; Fomalont, E. B. et al. The Very Large Array 1.4 GHz Survey of the Extended Chandra Deep Field South: Second Data Release. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 205, 2(2013), article id. 13, 15 pp.
- [36] Mohan, N.; Rafferty, D. PyBDSF: Python Blob Detection and Source Finder. // *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1502.007 (2015)
- [37] Netzer, H. Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei. // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 53, (2015), str. 365-408
- [38] Padovani, P.; Bonzini, M.; Kellermann, K. I.; Miller, N.; Mainieri, V.; Tozzi, P. Radio-faint AGN: a tale of two populations. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 452, 2(2015), str. 1263-1279
- [39] Perley, R. A.; Butler, B. J. Integrated Polarization Properties of 3C48, 3C138, 3C147, and 3C286. // *The Astrophysical Journal Supplement*, Vol. 206, 2(2013), article id. 16, 7 pp.
- [40] Prandoni, I.; Gregorini, L.; Parma, P.; de Ruiter, H. R.; Vettolani, G.; Wieringa, M. H.; Ekers, R. D. The ATESP radio survey. II. The source catalogue. // *Astronomy and Astrophysics Supplement*, Vol. 146, (2000), str. 41-55
- [41] Radio emission from gamma-ray flare sources discovered by fermi-lat, (05.10.2016.), WIREDSpace, <http://wiredspace.wits.ac.za/handle/10539/20362>, 1.1.2018.

- [42] Radio Properties of Quasars, (27.06.2014), CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Cambridge/Cambridge1_3_1.html, 1.1.2018.
- [43] Sadler, E. M.; Cannon, R. D.; Mauch, T. et al. Radio galaxies in the 2SLAQ Luminous Red Galaxy Survey - I. The evolution of low-power radio galaxies to $z \approx 0.7$. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 381, 1(2007), str. 211-227.
- [44] Sadler, E. M.; Jackson, C. A.; Cannon, Russell D. Radio sources in the 2dF Galaxy Redshift Survey - II. Local radio luminosity functions for AGN and star-forming galaxies at 1.4 GHz. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 329, 1(2002), str. 227-245.
- [45] SAOImage DS9, (31.10.2017), Smithsonian Astrophysical Observatory, <http://ds9.si.edu/site/Home.html>, 1.1.2018.
- [46] Schmidt, M. Space Distribution and Luminosity Functions of Quasi-Stellar Radio Sources. // Astrophysical Journal, Vol. 151, (1968), str.393 .
- [47] Smolčić, V.; Delvecchio, I.; Zamorani, G. et al. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Multiwavelength counterparts and the composition of the faint radio population. // Astronomy & Astrophysics, Vol. 602, (2017), id.A2, 21 pp.
- [48] Smolčić V.; Intema H.; Šlaus B. et al. The XXL Survey: XXIX. GMRT 610 MHz continuum observations. // u postupku recenzije
- [49] Smolčić, V.; Novak, M.; Bondi, M. et al. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Continuum data and source catalog release. // Astronomy & Astrophysics, Vol. 602, (2017), id.A1, 19 pp.
- [50] Smolčić, V.; Novak, M.; Delvecchio, I. et al. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Cosmic evolution of radio AGN and implications for radio-mode feedback since $z \approx 5$. // Astronomy & Astrophysics, Vol. 602, (2017), id.A6, 13 pp.
- [51] Smolčić, V.; Zamorani, G.; Schinnerer, E. et al. A Radio View of the Sky: the Cosmic History of Star-Forming and AGN Galaxies. // The Starburst-AGN Connection. ASP Conference Series, Vol. 408, proceedings of the conference held

27-31 October 2008, at Shanghai Normal University, Shanghai, China / edited by Wang, Yang, Luo, and Chen. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009., str. 116-122.

- [52] Tadhunter, C. An introduction to active galactic nuclei: Classification and unification. // *New Astronomy Reviews*, Vol. 52, 6(2008), str. 227-239.
- [53] Tasse, C.; Cohen, A. S.; Röttgering, H. J. A. New results from the low-frequency counterpart of the XMM large scale structure survey. // *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 456, 2(2006), str.791-800.
- [54] Tasse, C.; Röttgering, H. J. A.; Best, P. N.; Cohen, A. S.; Pierre, M.; Wilman, R. GMRT observations of the XMM large scale structure survey field. // *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 471, 3(2007), str. 1105-1116
- [55] The NRAO VLA Sky Survey, (18.06.2012), National Radio Astronomy Observatory, <http://www.cv.nrao.edu/nvss/>, 1.1.2018.
- [56] Thompson A. R.; Moran J. M.; Swenson G. W. Jr. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. 3rd ed. Cham, Switzerland : Springer International Publishing AG, 2017.
- [57] TOPCAT: Tool for Operations on Catalogues And Tables, (7.11.2017), <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>, 1.1.2018.
- [58] Urry, C. M.; Padovani, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol.107, (1995), str. 803-845.
- [59] Willott, C. J.; Rawlings, S.; Blundell, K. M.; Lacy, M.; Eales, S. A. The radio luminosity function from the low-frequency 3CRR, 6CE and 7CRS complete samples. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 322, 3(2001), str. 536-552.
- [60] Welcome to the Very Large Array, (15.03.2017.), National Radio Astronomy Observatory, <http://www.vla.nrao.edu/>, 1.1.2018.

- [61] XXL PROJECT, (1.1.2018), Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe, http://irfu.cea.fr/en/Phoce/Vie_des_labos/Ast/alltec.php?id_ast=3015, 1.1.2018.
- [62] Yuan, Z.; Wang, J.; Zhou, M.; Mao, J. A Mixture Evolution Scenario of the AGN Radio Luminosity Function. // The Astrophysical Journal, Volume 820, 1(2016), id. 65, 7 pp.