Modeliranje broja radioizvora kao funkcija toka zračenja

Pendo, Pero

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:386977

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Pero Pendo

Modeliranje broja radioizvora kao funkcija toka zračenja

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Pero Pendo

Diplomski rad

Modeliranje broja radioizvora kao funkcija toka zračenja

prof. dr. sc. Vernesa Smolčić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____
Zagreb, 2022.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vernesi Smolčić na stručnom mentorstvu i pomoći prilikom pisanja ovog rada. Također, zahvaljujem se Bruni Šlausu na pomoći, savjetima te prenesenom znanju.
Na kraju bih se zahvalio obitelji i prijateljima na podršci tijekom studija.

Sažetak

U radiovalnom području detektirano zračenje galaksija uvelike je sinkrotronsko zračenje koje nastaje kada se nabijene čestice gibaju relativističkim brzinama unutar magnetskog polja. S obzirom na proces koji uzrokuje ovo zračenje, izvori se mogu podijeliti na dvije skupine. Prva skupina su galaksije koje u svom središtu posjeduju aktivnu galaktičku jezgru (AGN galaksije). Druga skupina su galaksije s povećanom brzinom nastanka zvijezda (SF galaksije). Obje skupine izvora se detektiraju radiopregledima neba te se bilježe u kataloge izvora. Najjednostavniji način obrade podataka iz kataloga je brojanje izvora. Diferencijalni broj izvora definiran je kao broj izvora po gustoći toka zračenja po prostornom kutu. Diferencijalni broj izvora može se dobiti i iz funkcija luminoziteta. Funkcije luminoziteta daju brojčanu gustoću objekata unutar određenog intervala luminoziteta. Funkcije luminoziteta ovise o vrijednosti kozmološkog crvenog pomaka i kažemo da evoluiraju. U ovom radu se iz postojećih analitičkih modela evolucije funkcija luminoziteta računaju diferencijalni brojevi izvora za dvije spomenute populacije. Također, diferencijalni brojevi izvora se računaju i iz podataka preuzetih iz raznih kataloga. Rezultati dobiveni iz analitičkih modela i podataka slažu se unutar nepouzdanosti računa. Na najvećim vrijednostima toka zračenja brojem izvora dominiraju AGN galaksije. Podjednak doprinos broju izvora od obje populacije nalazi se na vrijednostima toka zračenja od 200 μJy. Na vrijednostima toka zračenja ispod 10 μJy udio SF galaksija je veći od 90% te one dominiraju diferencijalnim brojem izvora u ovom području.

Ključne riječi: aktivne galaktičke jezgre, galaksije s povećanom brzinom nastanka zvijezda, funkcije luminoziteta, diferencijalni brojevi izvora

Modeling of radio source counts as function of radiation flow

Abstract

Detected radio emission from galaxies is largely synchrotron emission, which is created when charged particles move with relativistic velocities inside a magnetic field. Depending on the process that is causing this emission, sources can be separated into two distinct populations. The first population are galaxies that have active galactic nuclei (AGN galaxies). The second population are star-forming galaxies (SF). Both populations are detected via radio sky surveys and categorized in source catalogues. The easiest way to process data from a catalogue is simply counting the sources. Differential source counts are defined as number of sources per unit flux density per unit solid angle. Differential source counts can also be obtained from luminosity functions. Luminosity functions give the number density of objects inside a predefined interval of luminosity. Luminosity functions depend on the cosmological redshift and it can be said that they evolve. In this paper, differential source counts for two previously mentioned populations are obtained using predefined analytical models of evolving luminosity functions. Differential source counts are also obtained from data taken from various catalogues. Results obtained from analytical models and from data are well constrained within the uncertainty of the calculation. Differential source counts are dominated by AGN galaxies at highest values of flux density. Equal contribution to the differential source counts from both types of sources is found at flux density values of 200 μJy. Below 10 μJy the fraction of SF galaxies is higher than 90% as they dominate differential source counts at these values of flux density.

Keywords: active galactic nuclei, star-forming galaxies, luminosity functions, differential source counts

Sadržaj

1 Uvod **1**

1.1 Radioastronomija 1

1.2 Sinkrotronsko zračenje 2

1.3 Aktivne galaktičke jezgre 4

1.4 Galaksije s povećanom brzinom nastanka zvijezda 7

1.5 Radiopregledi neba i diferencijalni brojevi izvora 8

1.6 Funkcije luminoziteta 11

2 Metoda **15**

2.1 Metoda klasifikacije 15

2.2 Modeli evolucije funkcija luminoziteta galaksija 16

2.3 Diferencijalni brojevi izvora iz analitičkih funkcija luminoziteta 17

2.4 Diferencijalni brojevi izvora iz podataka 20

3 Podatci **22**

3.1 COSMOS 22

3.2 3CRR 23

3.3 6CE 23

3.4 7C 24

3.5 XXL-North 24

3.6 XXL-South 25

4 Rezultati i diskusija **26**

5 Zaključak **33**

Literatura **34**

1 Uvod

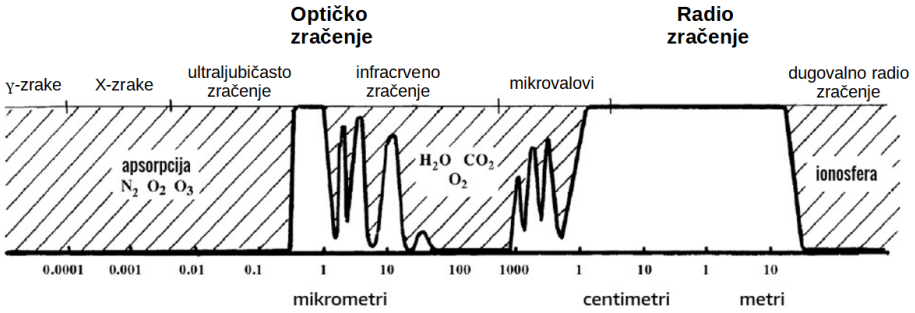
1.1 Radioastronomija

Američki fizičar i radio inženjer Karl Janski 1933. godine slučajno je otkrio jako radiozračenje koje potječe iz središta Mliječne Staze [13]. Njegovo otkriće danas smatramo početakom razvoja polja radioastronomije. U ovo vrijeme optička astronomija bila je već razvijena disciplina.

Rezultati prvih radiopregleda neba doprinijeli su mnogim novim otkrićima. Jedno od poznatijih otkrića radioastronomije pripisujemo Jocelyn Bell. Bell je 1967. godine primijetila čudan signal nepoznatog izvora kod rezultata dobivenih opažanjem teleskopom kojeg je pomogla konstruirati. Izvor ovog signala danas pripisujemo pulsarima [12].

Prednost opažanja u području radiofrekvencija dolazi zbog činjenice da je Zemljina atmosfera transparenta za ova zračenja. Ilustrativni prikaz ove transparentnosti nalazi se na slici 1.1. Nadalje, velik udio zračenja iz ostalih dijelova spektra (za razliku od radiovalova) se apsorbira ili reflektira zbog prašine prisutne u Svemiru.

Napretkom modernih teleskopa postignuta su mjerenja visoke osjetljivosti i



Slika 1.1: Ilustrativni prikaz transparentnosti Zemljine atmosfere za zračenja različitih valnih duljina. Za zračenja u dijelu optičkog i radiospektra atmosfera pokazuje visoku transparentnost. Druge frekvencije zračenja se ili apsorbiraju ili reflektiraju kroz atmosferu. Preuzeto iz [2].

razlučivosti. Razvojem interferometrijskih metoda opažanja postignute su još veće razlučivosti. Ovom metodom mjerenja se vrše većim brojem teleskopa. Signali dobiveni u pojedinim teleskopima spajaju se u jedinstveno mjerenje. Dobar primjer interferometrijskog teleskopa je Very Large Array (VLA)[1] koji se nalazi u Sjedinim

[1] `https://www.vla.nrao.edu/`

Američkim Državama. Zračenje dalekih astronomskih objekata koje se detektira u radiopodručju je uvelike sinkrotronsko zračenje [24].

1.2 Sinkrotronsko zračenje

Akcelerirane nabijene čestice emitiraju elektromagnetsko zračenje. Kod astrofizičkih izvora ovo se događa kod elektrona relativističkih brzina koji se gibaju u magnetskom polju. Elektroni kontinuirano osjećaju Lorentzovu silu te je njihova putanja spiralnog oblika.

Elektron energije $E = \gamma m_e c^2$ ima karakterističnu frekvenciju emisije [24]:

$$\nu_c = \frac{3\gamma^2 eB}{4\pi m_e c} \sim 4.2 \times 10^6 \gamma^2 \left(\frac{B}{1\text{G}}\right) \text{ Hz}, \tag{1.1}$$

gdje B označava snagu magnetskog polja, e naboj elektrona, i $m_e = 511\,\text{kev/c}^2$ masu elektrona. Energija elektrona ovisi o Lorentzovom faktoru γ koji je dan s

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}, \tag{1.2}$$

gdje je v brzina elektrona. Za frekvencije znatno ispod karakteristične frekvencije spektar pojedinog elektrona ovisi o frekvenciji kao $\sim \nu^{1/3}$. Na većim frekvencijama od karakteristične, spektar elektrona eksponencijalno pada. Spektar pojedinog elektrona prikazan je na slici 1.2.

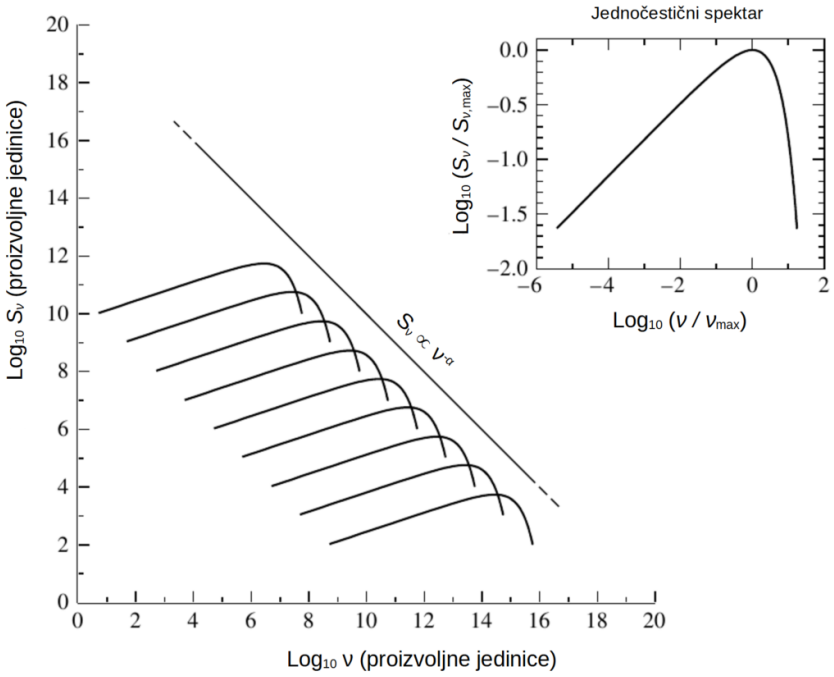
Za veliki dio radio spektra ekstragalaktičkih izvora vrijedi [5]:

$$S_\nu \sim \nu^{-\alpha}, \tag{1.3}$$

gdje je S_ν opažena monokromatska gustoća toka zračenja na frekvenciji ν, a α spektralni index. Za homogeni izvor zračenja s konstantnim magnetskim poljem B, spektar zračenja koji prati jednadžbu (1.3) može se dobiti ako za energijsku raspodjelu relativističkih elektrona vrijedi:

$$N(E)dE \propto E^{-s}dE, \tag{1.4}$$

gdje je s eksponent distribucije. Ovdje $N(E)dE$ predstavlja gustoću elektrona s energijama između E i $E + dE$. Veza između spektralnog indeksa α i eksponenta energij-



Slika 1.2: Prikaz spektra zračenja pojedinog elektrona te ukupnog spektra sinkrotronskog zračenja. Ukupni spektar se dobije sumiranjem doprinosa pojedinih elektrona. Preuzeto iz [4].

ske raspodjele s je [5]:

$$\alpha = \frac{s-1}{2}. \tag{1.5}$$

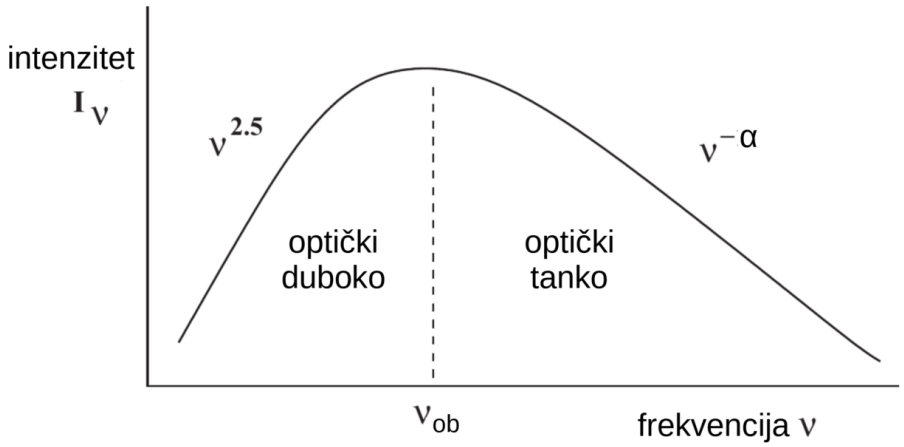
Ukupni spektar sinkrotronskog zračenja kojeg opažamo je superpozicija jednočestičnih spektara. Ovo je ilustrativno prikazano na slici (1.2).

Na spektar sinkrotronskog zračenja utječe i pojava koju nazivamo samoapsorpcija. Kod samoapsorpcije dio zračenja je odmah apsorbiran u izvoru. Ova pojava najviše utječe na dijelove spektra na niskim frekvencijama [1]. Na frekvencijama nižim od frekvencije obrata, ν_{ob}, emitirajuća plazma se nalazi u optički dubokom režimu, odnosno u dijelu spektra u kojem samoapsorpcija dolazi do izražaja. U ovom području spektar zračenja je neovisan o spektralnom indeksu i vrijedi:

$$S_\nu \propto \nu^{5/2}. \tag{1.6}$$

Suprotno, na frekvencijama većim od ν_{ob} plazma se nalazi u optički tankom režimu. Prikaz spektra sinkrotronskog zračenja s uključenim efektom samoapsorpcije nalazi se na slici 1.3.

Kako bi se proizvelo sinkrotronsko zračenje koje možemo opaziti, kao što je ra-



Slika 1.3: Prikaz ovisnosti inteziteta sinkrotronskog zračenja o frekvenciji s uključenim efektom samoapsorpcije. Na slici se primjećuju dva režima izvora. Na frekvencijama nižim od frekvencije obrata, ν_{ob}, imamo optički dubok režim gdje je prisutna samoapsorpcija, dok na frekvencijama višim od ν_{ob} imamo optički tanak režim. Preuzeto iz [2].

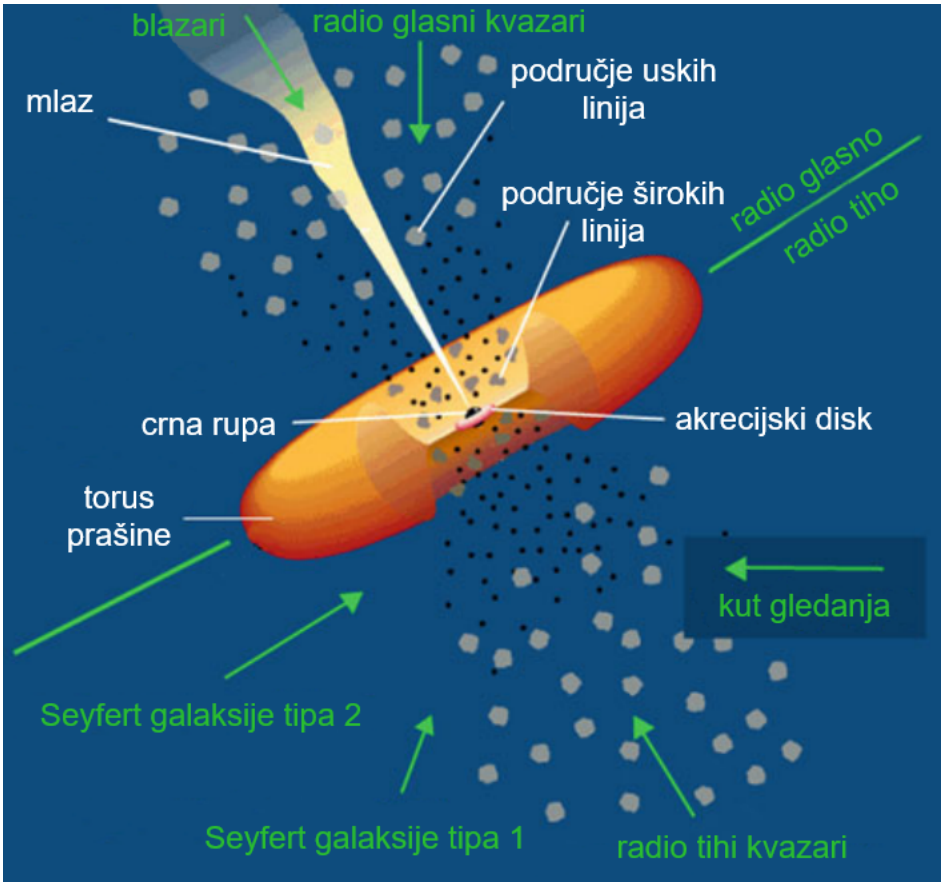
nije spomenuto, potrebne su nabijene čestice ubrzane do ultra-relativističkih brzina. Općenito se smatra da su dva procesa glavni izvori ovakvog zračenja. Prvi od ovih procesa je akrecija materijala na središnju supermasivnu crnu rupu. Ovakvu crnu rupu nazivamo aktivnom galaktičkom jezgrom, detaljnije opisanom u sljedećem poglavlju. Drugi proces je stvaranje novih zvijezda u galaksijama. U ovom procesu prisutne su kratkoživuće supernove koje mogu ubrzati nabijene čestice na vrlo visoke brzine koje onda emitiraju sinkrotronsko zračenje [2].

1.3 Aktivne galaktičke jezgre

Za gotovo sve galaksije se vjeruje da u svom središtu imaju supermasivnu crnu rupu [2]. Kada postoji akrecija materijala na središnju crnu rupu, tada govorimo o aktivnim galaktičkim jezgrama (engl. *active galactic nuclei*, AGN). Galaksije s aktivnom jezgrom se u svom spektru i luminozitetu jako razlikuju od galaksija bez aktivne jezgre. Njihovo zračenje najčešće ima doprinose u svim dijelovima elektromagnetskog spektra.

Za aktivne galaktičke jezgre postoji više različitih klasifikacija. Njihovom imenu se pripisuje velik broj objekata. Različita opažanja aktivnih galaktičkih jezgri možemo objediniti u jedan model: ujedinjeni model aktivnih galaktičkih jezgri. Ujedinjeni model aktivnih galaktičkih jezgri nastoji objasniti različita opažanja s istim fizikal-

nim objektom. Razlike u opaženim svojstvima se pripisuju različitim kutovima iz kojih se objekt promatra te različitom luminozitetu pojedinog objekta. Prikaz uje-



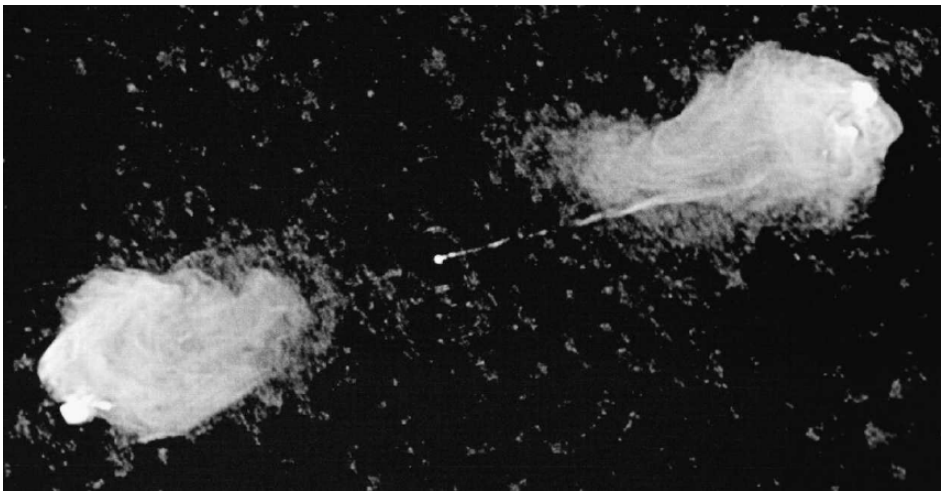
Slika 1.4: Ujedinjeni model aktivnih galaktičkih jezgri. Različiti dijelovi aktivne galaktičke jezgre označeni su bijelom bojom. Zelenom bojom naznačeni su različiti kutovi pod kojim se promatra jezgra i rezultirajuća klasifikacija objekta. U donjem dijelu slike, ispod ravnine akrecijskog diska su izvori koji ne posjeduju mlazove. Preuzeto iz [24].

dinjenog modela dan je na slici (1.4). Na slici su prikazani različiti dijelovi aktivne galaktičke jezgre, kao i neki od objekata koji se opažaju ovisno o kutu pod kojim se jezgra promatra. Cjelovita klasifikacija sadrži mnogo različitih objekata i skupina objekata [21].

U središnjem djelu aktivne galaktičke jezgre nalazi se supermasivna crna rupa na koju upada materijal s akrecijskog diska. Potencijalna gravitacijska energija upadajućeg materijala pretvara se u energiju zračenja. Zračenje koje dolazi iz ovog dijela je termalne prirode [2]. Temperatura diska obrnuto je proporcionalna njegovom radijusu te je emitirano zračenje dominantno u ultra-ljubičastom (UV) i rendgenskom području spektra. Tanki akrecijski disk okružen je torusom prašine. Infracrveno (IR) zračenje aktivnih galaktičkih jezgri dominirano je termalnim zračenjem torusa [4].

Unutarnji radijus torusa je između 1 i 10 pc, dok je vanjski radijus između 50 i 100 pc [2]. U blizini crne rupe i akrecijskog diska nalazi se područje širokih linija (engl. *broad-line region*, BLR). U ovom području nalazi se plin ioniziran UV zračenjem akrecijskog diska. Njegova točna kompozicija nije poznata. Široke spektralne linije pokazuju da se plin giba brzinama od $\sim 10\,000$ km/s [2]. Kada se aktivna galaktička jezgra gleda u ravnini akrecijskog diska, torus prašine zaklanja područje širokih linija. Na većim udaljenostima iznad diska, gdje torus ne zaklanja pogled, nalazi se područje uskih linija (engl. *narrow-line region*, NLR). Veličina ovog područja može biti od par kpc pa do nekoliko stotina kpc. Iz spektralnih linija se zaključuje da se plin u ovoj regiji giba brzinama do ~ 1000 km/s [2]. Okomito na ravninu diska postoji mogućnost nastajanja radio mlazova. Zračenje iz mlazova je jako anizotropno. Brzina čestica u mlazovima puno je veća u područjima bližim jezgri. Zračenje je tada radi relativističkih efekata povećano u mlazovima koji se gibaju prema promatraču, dok je za mlazove koji se gibaju od promatrača potisnuto. Ovisno o orijentaciji mlazova, njihovo zračenje može biti potisnuto ispod razine pozadinskog šuma te ih je tada teško detektirati. Na kraju mlazova često imamo i proširenja koja nazivamo okruglasti završetci. Ukupna linearna veličina objekata s mlazovima i okruglastim završetcima može doseći i 1 Mpc [24]. Prikaz galaksije s radiomlazovima i okruglastim završetcima se nalazi na slici (1.5).

Galaksije koje posjeduju jake radiomlazove poklapaju se uvelike s radioglasnim



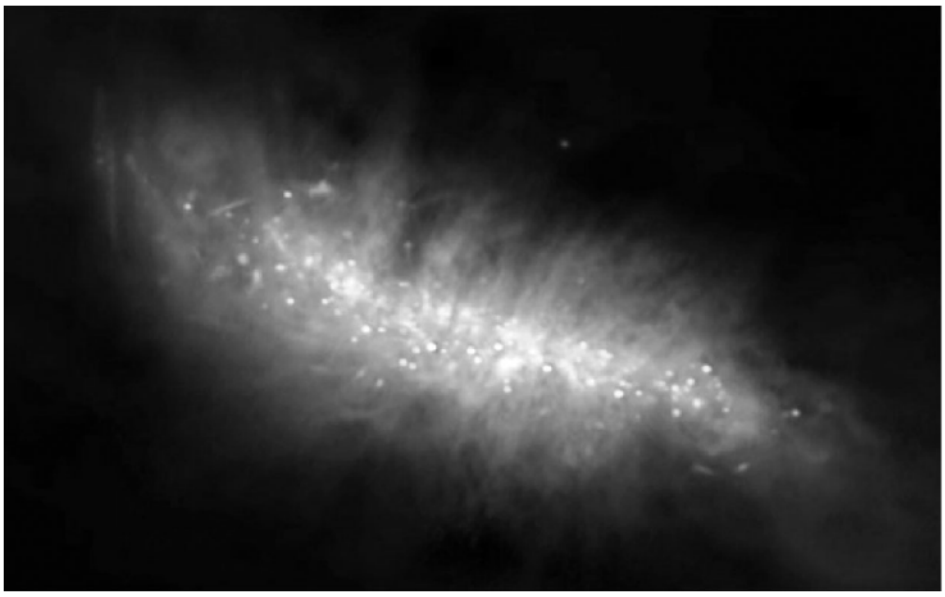
Slika 1.5: Prikaz galaksije Cygnus A snimljen teleskopom VLA. Na slici se primjećuje jedan mlaz koji povezuje jezgru s izbočinom, dva okruglasta završetka te točkasti izvor u središtu. Preuzeto iz [4].

aktivnim galaktičkim jezgrama [20]. Zračenje iz područja mlazova je sinkrotronsko

zračenje. Spektar sinkrotronskog zračenja ovisi uvelike o morfologiji objekta gdje razlikujemo proširene i kompaktne izvore. Kompaktni izvori imaju ravniji a prošireni izvori strmiji[2] spektar [14].

1.4 Galaksije s povećanom brzinom nastanka zvijezda

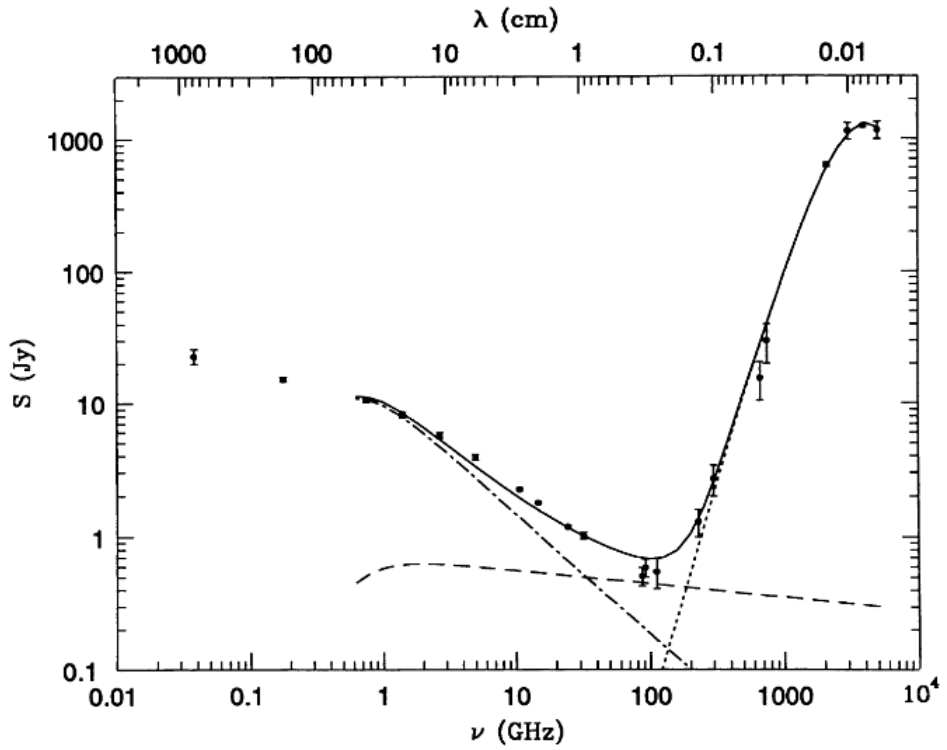
Osim galaksija koje posjeduju aktivnu galaktičku jezgru, u radiovalnom području detektiramo i galaksije s povećanom brzinom nastajanja novih zvijezda (engl. *star forming galaxies, SF)*. Karakteristična brzina nastajanja zvijezda u SF galaksijama je reda veličine od 10 do 100 $M_\odot$/god, gdje je $M_\odot$ masa Sunca. Za Mliječnu stazu ova brzina je otprilike od 1 do 5 $M_\odot$/god [16]. Najbliži primjer SF galaksije koja ima brzinu stvaranja zvijezda desetak puta veću od Mliječne staze je galaksija M82, prikazana na slici (1.6) [2]. Spektar zračenja galaksije M82 tipičan je primjer spektra SF galaksija i prikazan je na slici (1.7). Spektru doprinose tri vrste zračenja. Na nižim



Slika 1.6: Prikaz središnjeg dijela SF galaksije M82. Slika je snimljenja VLA teleskopom u radiovalnom području. Na slici se primjećuju ostatci starih eksplozija supernovi i velike količine prašine koje ih okružuju. Preuzeto iz [2].

frekvencijama u radiovalnom području dominira sinkrotronsko zračenje. Vjeruje se da visoko energetski elektroni koji su izvor sinkrotronskog zračenja nastaju kao posljedica supernovi masivnih zvijezda masa većih od ~ 8 $M_\odot$ [25]. Ovakve zvijezde imaju relativno kratak životni vijek, manji od ~ 30 milijuna godina, dok relativistički

[2]Za izvore strmijeg spektra obično se smatraju izvori sa spektralnim indeksom $\alpha > 0.5$, dok izvori ravnog spektra imaju $\alpha < 0.5$, pri čemu je α definirana kao $S_\nu \propto \nu^{\ \alpha}$, gdje je S_ν opažena monokromatska gustoća toka zračenja na frekvenciji ν.



Slika 1.7: Opaženi spektar zračenja od radiovalnog do infracrvenog područja SF galaksije M82. Sinkrotronsko zračenje koje je predstavljeno točkasto crtkanom linijom dominira na nižim frekvencijama. Zakočno zračenje (crtkana linija) najznačajniji doprinos daje na frekvencijama oko 100 GHz. Na višim frekvencijama (točkasta linija) dominira zračenje emitirano iz prašine. Ukupno zračenje prikazano je punom linijom. Preuzeto iz [6].

elektroni imaju životni vijek od ~ 100 milijuna godina. Opažanja u radiovalnom području zbog toga promatraju relativno nedavna stvaranja zvijezda. Na frekvencijama od ~ 100 GHz značajan doprinos daje zakočno zračenje. Zakočno zračenje nastaje u oblacima ioniziranog vodika koji okružuju zvijezde. Na još višim frekvencijama dominira termalno zračenje koje nastaje kada se zračenje zvijezda apsorbira i ponovno emitira u okolnoj prašini.

1.5 Radiopregledi neba i diferencijalni brojevi izvora

Astronomski pregledi neba osmišljeni su kako bi mapirali dijelove neba, umjesto da se fokusiraju na određeni objekt. Rezultat pregleda neba su katalozi astronomskih objekata. Katalozi sadrže popis detektiranih izvora te dodatne prikupljene informacije o samim izvorima [26]. Ovisno o potrebi, dijelovi neba koji se promatraju mogu pokrivati relativno velike ili male prostorne kutove na nebu. Pregledi koji promatraju manje prostorne kutove na nebu detektiraju relativno puno udaljenije izvore.

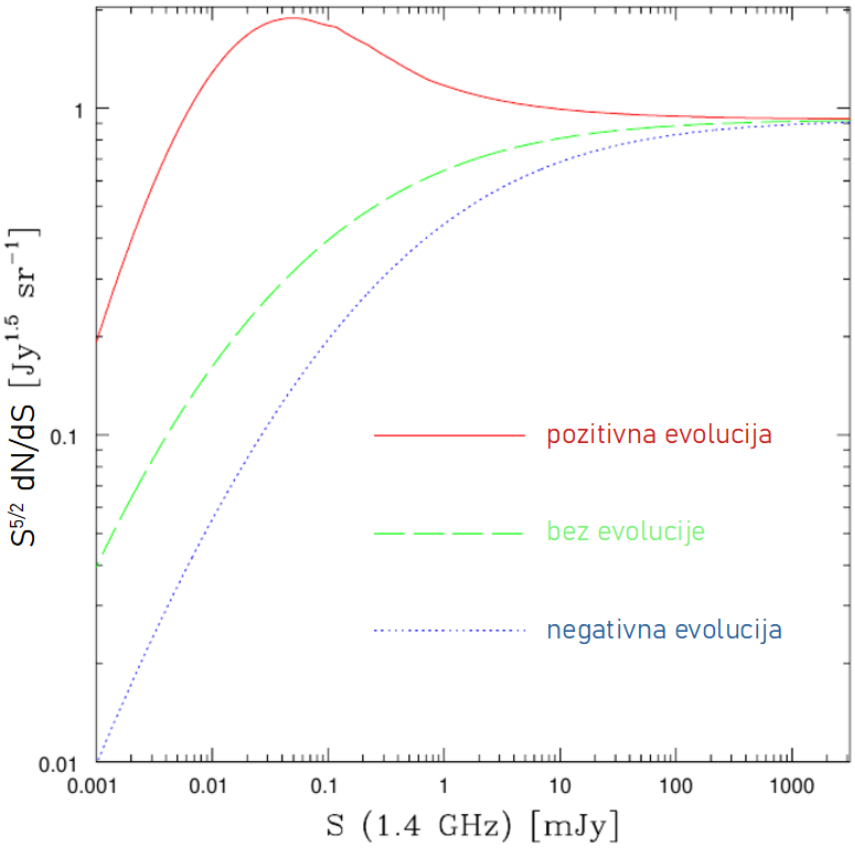
Ovakve preglede nazivamo još i duboki pregledi. Cilj dubokih pregleda najčešće je proučavanje stvaranja i evolucije galaksija [10]. Također, pregledi se mogu razlikovati i po frekvencijama elektromagnetskog zračenja kojeg detektiraju. Moderni pregledi najčešće promatraju zračenja iz više različitih dijelova elektromagnetskog spektra kako bi se prikupilo što više informacija o izvorima.

Radiopregledi neba, kao što i sama riječ sugerira, opažaju zračenja iz radiovalnog područja elektromagnetskog spektra. Glavna prednost radiopregleda neba proizlazi iz činjenice da intenzitet radiozračenja dalekih astronomskih objekata uvelike ostaje nepromijenjen u propagaciji kroz medije na putu do detekcije. Iz tog razloga moguće je provesti radiopreglede s homogenom osjetljivošću na velikim dijelovima neba. Neki od ranijih i poznatijih kataloga dobiveni radiopregledima su 3C i 4C katalozi [10].

Najjednostavniji način na koji se mogu obraditi podatci radiopregleda neba je brojanje izvora unutar pregleda. Brojanje izvora ne zahtijeva nikakvo dodatno znanje o izvorima, kao što su njihova udaljenost ili luminozitet, sve što je potrebno je njihov opaženi tok zračenja. Iako vrlo jednostavno, brojanje izvora može dati vrlo korisne informacije o različitim populacijama izvora, kao i o geometriji svemira. Dobar primjer je rezultat Rylea i Clarkea [23] koji su dobili znatno odstupanje opaženog broja ekstragalaktičkih radioizvora od predviđanja tada prihvaćenog stacionarnog modela svemira.

Diferencijalni broj izvora, dN/dS, definiran je kao broj izvora po gustoći toka zračenja po steradijanu. U ravnom Euklidskom, homogeno popunjenom svemiru, gustoća toka zračenja, S, opada s udaljenošću, D, kao D^{-2}. Broj izvora, N, s udaljenošću raste kao D^3. Ovisnost broja izvora o gustoći toka zračenja u ovakvom svemiru je $N \propto S^{-3/2}$. Za diferencijalni broj izvora ova ovisnost je $dN/dS \propto S^{-5/2}$. Diferencijalni broj izvora najčešće se normalizira s očekivanim brojem izvora u Euklidskom svemiru te se prikazuje veličina $S^{5/2}dN/dS$. Oblik i nagib diferencijalnog broja izvora ovisi o funkcijama luminoziteta i evoluciji funkcija luminoziteta populacija koje se razmatraju [20]. Slika (1.8) prikazuje normalizirani diferencijalni broj izvora u ovisnosti o gustoći toka zračenja. Krivulje su dobivene iz funkcija luminoziteta za koje su pretpostavljene različite evolucije. Crvena krivulja predstavlja pozitivnu evoluciju[3], zelena krivulja slučaj bez evolucije, a plava krivulja negativnu

[3]Pozitivna evolucija u ovom kontekstu znači da je brojčana gustoća populacije veća na većem

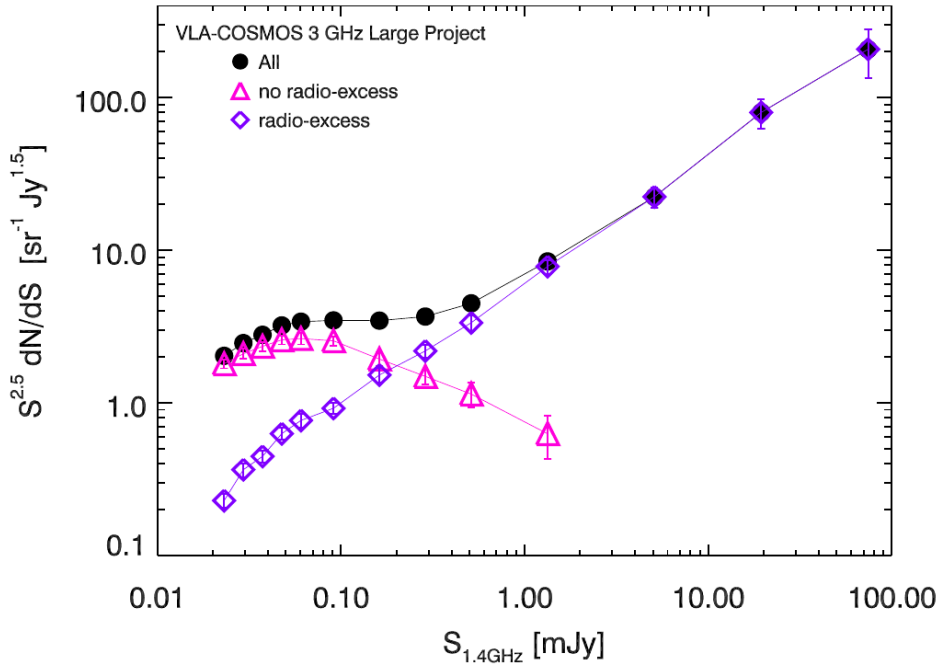


Slika 1.8: Normalizirani diferencijalni brojevi izvora u ovisnosti o gustoći toka zračenja. Brojevi izvora dobiveni su iz funkcija luminoziteta za koje su pretpostavljene različite evolucije. Puna crvena linija predstavlja pozitivnu evoluciju, točkasta plava negativnu evoluciju, a isprekidana zelena slučaj bez evolucije. Preuzeto iz [24].

evoluciju. S obzirom na to da su prikazani normalizirani brojevi izvora, krivulje bez nagiba bi odgovarale Euklidskom slučaju bez evolucije. To je istinito samo za brojeve izvora s tokom zračenja > 100 mJy. Na manjim vrijednostima toka zračenja u izražaj dolazi geometrija svemira, što je vidljivo s padom krivulje bez evolucije. Negativna evolucija dodatno pojačava pad krivulje, dok pozitivna evolucija djeluje suprotno.

Na slici (1.9) prikazani su normalizirani diferencijalni brojevi izvora dobiveni VLA-COSMOS 3 GHz radiopregledom neba [26]. Izvori su podijeljeni na dvije skupine. Prva skupina izvora su SF galaksije (trokuti). SF galaksije dominiraju diferencijalnim brojem izvora na najnižim gustoćama toka zračenja. Druga skupina su izvori s aktivnom galaktičkom jezgrom (AGN galaksije). Njihov najveći doprinos je na većim gustoćama toka zračenja.

crvenom pomaku, odnosno u prošlosti. Suprotno vrijedi za negativnu evoluciju.



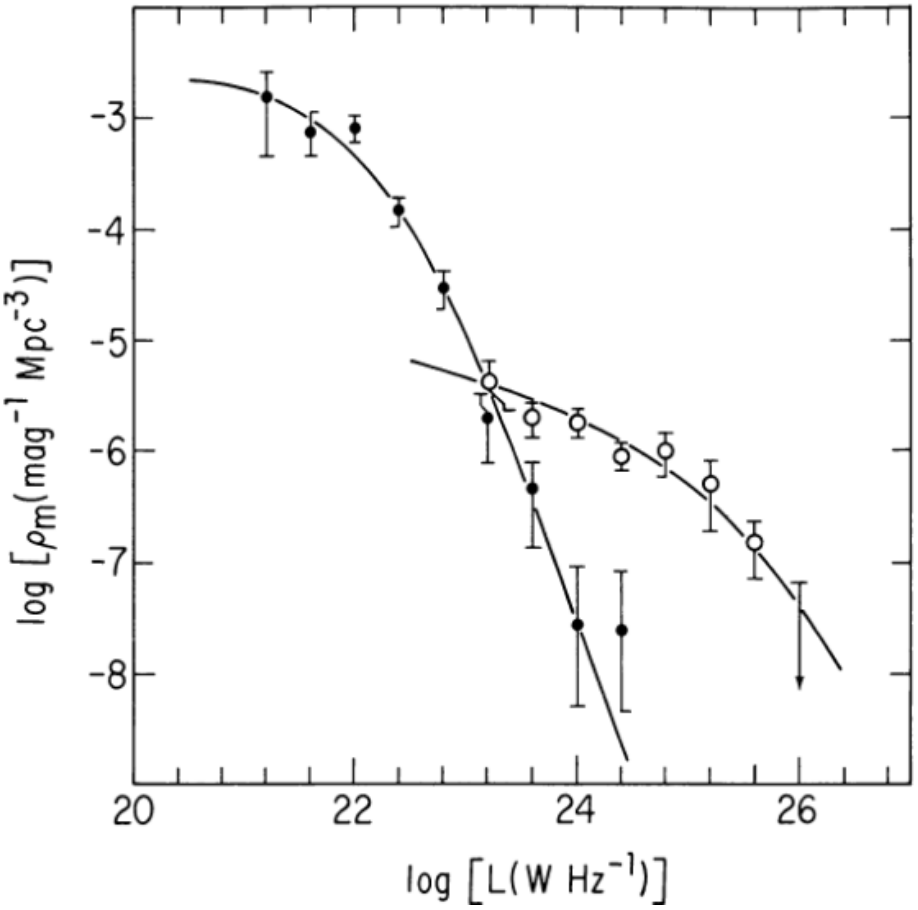
Slika 1.9: Normalizirani diferencijalni brojevi izvora u ovisnosti o gustoći toka zračenja dobiveni u sklopu VLA-COSMOS 3 GHz radiopregleda neba. Izvori su podijeljeni na dvije skupine. Trokutima su označene SF galaksije. Kvadratima su označene galaksije koje sadrže aktivnu galaktičku jezgru. Crnom bojom i krugovima označen je ukupan broj izvora. Sa slike se može vidjeti da SF galaksije dominiraju diferencijalnim brojem izvora na manjim vrijednostima gustoće toka zračenja. Preuzeto iz [26].

1.6 Funkcije luminoziteta

Funkcije luminoziteta (engl. *luminosity functions*, LF) daju uvid u distribuciju objekata neke klase s obzirom na njihov luminozitet [8]. Konkretnije, one daju brojčanu gustoću objekata unutar određenog intervala luminoziteta. Veličina $\Phi(L)dL$ daje gustoću objekata luminoziteta L unutar intervala luminoziteta dL, gdje je $\Phi(L)$ funkcija luminoziteta. Ukupna gustoća objekata može se dobiti integriranjem $\Phi(L)dL$ po svim vrijednostima luminoziteta.

Funkcije luminoziteta mogu dati uvid u evoluciju i prostornu distribuciju promatranih objekata. Evolucija astronomskih objekata odvija se na vremenskim skalama značajno većim od vremena opažanja svemira. Kako bi se dobio uvid u evoluciju, potrebno je opažati izvore na velikom rasponu udaljenosti počevši od lokalnog svemira. Tako efektivno gledamo u prošlost. Za određivanje udaljenosti objekata u dubokom svemiru najčešće se koristi kozmološki crveni pomak (engl. *redshift*). Kozmološki crveni pomak nastaje kao posljedica izotropnog širenja svemira. Spektar izvora na većim udaljenostima će zbog širenja svemira biti više pomaknut prema crvenom.

Ograničavanjem na dovoljno male raspone udaljenosti izvora određene populacije, može se izračunati njihova funkcija luminoziteta za određenu epohu. Izračunom funkcija luminoziteta u različitim epohama dobiva se uvid u evoluciju populacije. Kažemo da funkcije luminoziteta evoluiraju. Postoje dva jednostavna modela evolucije funkcija luminoziteta: evolucija prostorne gustoće te evolucija luminoziteta [28]. Prikaz tipične funkcije luminoziteta za dvije različite populacije nalazi se na slici

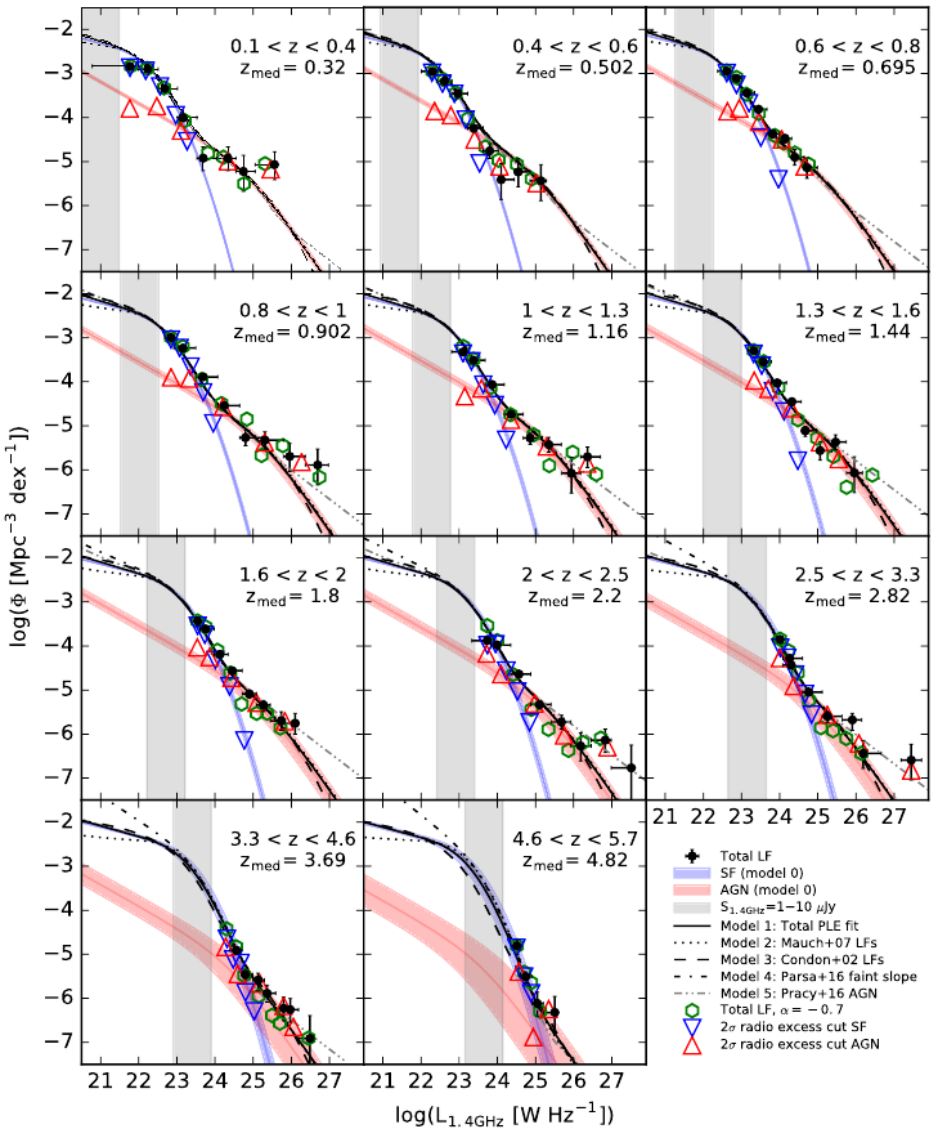


Slika 1.10: Lokalne funkcije luminoziteta za galaksije s aktivnom jezgrom (prozirni kružići) te galaksije s proizvodnjom zvijezda (puni kružići). Funkcije luminoziteta su dobivene na frekvenciji od 1.4 Ghz. Preuzeto iz [7].

(1.10). Evolucija luminoziteta odgovarala bi pomaku točaka u smjeru osi apscise, dok evolucija prostorne gustoće odgovara pomaku točaka u smjeru ordinate. Često se koriste i kompleksniji modeli koji uključuju obje vrste evolucije [32].

Kod određivanja funkcija luminoziteta moguće su razne poteškoće. Kako bi se odredili luminoziteti izvora potrebno je znati njihovu udaljenost. Udaljenost se dobije, kao što je ranije spomenuto, određivanjem crvenog pomaka. Za određivanje crvenog pomaka izvora potrebna su spektroskopska mjerenja u optičkim području koja za tamne izvore ili izvore detektirane u drugim dijelovima spektra često nisu

dostupna. Također, kako bi se dobio statistički reprezentativan uzorak, potrebno je mjerenja vršiti za dovoljno velik volumen svemira. Razlog tome su lokalne nehomogenosti gustoće izvora u svemiru na prostornim skalama od ~ 135 Mpc [24].



Slika 1.11: Prikaz ukupnih funkcija luminoziteta za različite vrijednosti crvenog pomaka. Kružićima su označene vrijednosti funkcija luminoziteta koje su dobivene V_{max} metodom iz kataloga COSMOS polja. Pune crne krivulje predstavljaju funkcije luminoziteta za ukupan broj izvora dobivene evolucijom lokalne funkcije luminoziteta. Lokalna funkcija luminoziteta je opisana analitičkim modelom i dobivena je prilagodbom na podatke iz kataloga. Plavom linijom su prikazani rezultati modela za SF galaksije, dok su crvenom bojom prikazani rezultati modela za AGN galaksije. Preuzeto iz [19].

Na slici (1.11) prikazani su moderni rezultati dobiveni za funkcije luminoziteta na temelju radiopregleda neba [19]. Funkcije luminoziteta dobivene su na različite načine. Kružićima su prikazane vrijednosti funkcija luminoziteta koje su dobivene metodom maksimalnog volumena (V_{max}) iz kataloga izvora COSMOS polja. V_{max} me-

todom se za svaki izvor računa maksimalni volumen u kojem se izvor može opaziti te se istovremeno uzimaju u obzir popravci zbog kompletnosti kataloga i nehomogenog pozadinskog šuma [18]. Punom crnom linijom prikazane su funkcije luminoziteta dobivene analitičkim modelom evolucije lokalne funkcije luminoziteta. Lokalna funkcija luminoziteta dobivena je prilagodbom krivulje na podatke iz kataloga i opisuje distribuciju izvora u lokalnom svemiru, odnosno na malim vrijednostima crvenog pomaka. Crvenim i plavim krivuljama prikazane su evoluirane funkcije luminoziteta za AGN i SF galaksije, respektivno. Detaljniji opis modela iz kojih su dobivene funkcije luminoziteta dan je u 2. poglavlju. Za sve vrijednosti crvenog pomaka vrijedi da na nižim luminozitetima dominiraju SF galaksije.

Cilj ovog rada je da se na temelju postojećih modela evolucije funkcija luminoziteta dobiju diferencijalni brojevi izvora. Brojevi izvora će biti podijeljeni na dvije populacije: SF i AGN galaksije. Posebna pozornost je dana rezultatima na najnižim vrijednostima gustoća toka zračenja na kojima će budući radiopregledi neba moći detektirati izvore. U 2. poglavlju detaljnije su opisani analitički modeli evolucije funkcija luminoziteta te metoda kojom se iz modela i podataka dobiju diferencijalni brojevi izvora. U 3. poglavlju opisani su svi radiopregledi neba i katalozi korišteni u radu kako bi se usporedili dobiveni rezultati. U 4. poglavlju prezentirani su dobiveni rezultati te je na kraju u 5. poglavlju dan kratak zaključak.

2 Metoda

U ovom će poglavlju biti opisana metoda klasifikacije izvora na AGN i SF galaksije. Objašnjeni će biti modeli funkcija luminoziteta koji se koriste kako bi se dobili diferencijalni brojevi izvora. Također, detaljno će biti opisana metoda kojom su se dobili diferencijalni brojevi izvora iz funkcija luminoziteta te iz podataka preuzetih unutar kataloga. Svi izračuni su napravljeni uz pomoć programskog jezika `Python`[4].

2.1 Metoda klasifikacije

Modeli evolucije daju funkcije luminoziteta za dvije ranije spomenute populacije izvora: SF i AGN galaksije. Ovakvom podjelom izvori se dijele na dvije skupine ovisno o tome koji fizikalni mehanizam proizvodi detektirano radiozračenje. Klasifikacija izvora na SF i AGN galaksije zahtjeva, osim mjerenja u radiovalnom području, i mjerenja spektra izvora na drugim valnim duljinama. Za klasifikaciju izvora korištena je takozvana metoda viška radioemisije (engl. *radio excess*). Ovom metodom uspoređuje se radiovalno zračenje s brzinom stvaranja zvijezda (engl. *star-forming rate,* SFR) dobivenom mjerenjima u infracrvenom dijelu spektra [9]. Uvjet metode je

$$\log\left(\frac{L_{1.4\,\mathrm{GHz}}[\mathrm{WHz}^{-1}]}{\mathrm{SFR}_{\mathrm{IR}}[M_{\odot}\,\mathrm{yr}^{-1}]}\right) > a(1+z)^{b}, \tag{2.1}$$

gdje su $L_{1.4\,\mathrm{GHz}}$ luminozitet izvora na frekvenciji od 1.4 GHz, $\mathrm{SFR}_{\mathrm{IR}}$ brzina formiranja zvijezda, z crveni pomak i parametri $a = 22.0$, $b = 0.013$. Galaksije za koje vrijedi jednadžba (2.1) 80% svog zračenja u radiovalnom području emitiraju procesima vezanim uz aktivnu galaktičku jezgru. Doprinos aktivnih galaktičkih jezgri ukupnom radiovalnom zračenju odgovara pomaku od maksimuma distribucije dane jednadžbom (2.1) za dani z. Maksimum ove distribucije ovisi o crvenom pomaku. Za veće vrijednosti z maksimum distribucije se također nalazi na većim vrijednostima. Zbog pomaka maksimuma potrebno je da metoda klasifikacije ovisi o z. Treba još napomenuti kako galakasije čije je zračenje ispod navedene granice još uvijek mogu posjedovati aktivnu galaktičku jezgru, no većina njihovog radiovalnog zračenja dolazi od procesa vezanih uz proizvodnju novih zvijezda. Ovakav način klasifikacije preuzet je iz ranijih radova [26].

[4] https://www.python.org/

2.2 Modeli evolucije funkcija luminoziteta galaksija

Općeniti model evolucije funkcije luminoziteta preuzet je iz [19] te je oblika

$$\Phi(L, z, \alpha_L, \beta_L, \alpha_D, \beta_D) = (1+z)^{\alpha_D + z\cdot\beta_D} \times \Phi_0 \left[\frac{L}{(1+z)^{\alpha_L + z\beta_L}}\right], \tag{2.2}$$

gdje je Φ_0 lokalna funkcija luminoziteta, α_L i β_L su parametri koji opisuju evoluciju luminoziteta te su α_D i β_D parametri koji opisuju evoluciju prostorne gustoće. Član u uglatoj zagradi u jednadžbi (2.2) predstavlja ovisnost kojom se luminozitet o kojem lokalna funkcija luminoziteta ovisi mijenja s crvenim pomakom. Koristit će se jednostavan model evolucije u kojem se uzima u obzir samo evolucija luminoziteta. Kod ovakvog modela parametri α_D i β_D u jednadžbi (2.2) su odabrani da budu jednaki nuli te je ona onda oblika

$$\Phi(L, z, \alpha_L, \beta_L) = \Phi_0 \left[\frac{L}{(1+z)^{\alpha_L + z\beta_L}}\right]. \tag{2.3}$$

Oblik lokalne funkcije luminoziteta je različit za SF i AGN populacije galaksija. Evolucija ovisi o tipu populacije. Za SF galaksije koristi se lokalna funkcija luminoziteta oblika [18]

$$\Phi_0^{\text{SF}}(L) = \Phi_\star^{\text{SF}} \left(\frac{L}{L_\star}\right)^{1-\alpha} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}\log^2\left(1+\frac{L}{L_\star}\right)\right], \tag{2.4}$$

gdje su $\Phi_\star^{\text{SF}} = 3.55\times10^{-3}\text{Mpc}^{-3}\text{dex}^{-1}$, $L_\star = 1.85\times10^{21}\text{WHz}^{-1}$, $\alpha = 1.22$ i $\sigma = 0.63$. Prilagodbom ovakvog oblika lokalne funkcije luminoziteta dobiju se parametri $\alpha_L^{\text{SF}} = 3.16$ i $\beta_L^{\text{SF}} = -0.32$ koji najbolje opisuju model evolucije čistog luminoziteta [19]. Dodatni eksponenti postavljeni su na parametre α_L i β_L kako bi se znalo za koju populaciju vrijede. Konačni model koji opisuje evoluciju za SF galaksije dan je s

$$\Phi(L, z, \alpha_L^{\text{SF}}, \beta_L^{\text{SF}}) = \Phi_0^{\text{SF}} \left[\frac{L}{(1+z)^{\alpha_L^{\text{SF}} + z\beta_L^{\text{SF}}}}\right]. \tag{2.5}$$

Za AGN galaksije koristi se lokalna funkcija luminoziteta oblika [15]

$$\Phi_0^{\text{AGN}}(L) = \frac{\Phi_\star^{\text{AGN}}}{\left(\frac{L_\star}{L}\right)^{\alpha} + \left(\frac{L_\star}{L}\right)^{\beta}}, \tag{2.6}$$

gdje su $\Phi_\star^{\text{AGN}} = \frac{1}{0.4}10^{-5.5}$ $\text{Mpc}^{-3}\text{dex}^{-1}$, $L_\star = 10^{24.59}$ WHz^{-1}, $\alpha = -1.27$ i $\beta = -0.49$. Parametri koji najbolje opisuju model čiste evolucije luminoziteta za AGN populaciju

su $\alpha^{\text{AGN}} = 2.88$ i $\beta^{\text{AGN}} = -0.84$ [19]. Model evolucije AGN populacije je

$$\Phi(L, z, \alpha_L^{\text{AGN}}, \beta_L^{\text{AGN}}) = \Phi_0^{\text{AGN}} \left[\frac{L}{(1+z)^{\alpha_L^{\text{AGN}} + z\beta_L^{\text{AGN}}}} \right]. \tag{2.7}$$

Model evolucije funkcije luminoziteta za ukupnu populaciju dobiven je spajanjem dva modela za SF i AGN galaksije te je oblika

$$\begin{aligned} &\Phi(L, z, \alpha_L^{\text{SF}}, \beta_L^{\text{SF}}, \alpha_L^{\text{AGN}}, \beta_L^{\text{AGN}}) = \\ &\quad \Phi_0^{\text{SF}} \left[\frac{L}{(1+z)^{\alpha_L^{\text{SF}} + z\beta_L^{\text{AGN}}}} \right] + \Phi_0^{\text{AGN}} \left[\frac{L}{(1+z)^{\alpha_L^{\text{AGN}} + z\beta_L^{\text{AGN}}}} \right]. \end{aligned} \tag{2.8}$$

Čista evolucija luminoziteta u modelu opisana je s dva parametra za SF populaciju te dva parametra za AGN populaciju. Evolucija također ovisi i o crvenom pomaku.

Analiziran je i dodatni model za AGN populaciju koji također koristi čistu evoluciju luminoziteta [33]. Model je dan kao

$$\Phi(L, z) = \Phi_0^{\text{AGN}} \frac{(1+z_c)^{p_1} + (1+z_c)^{p_2}}{\left(\frac{1+z_c}{1+z}\right)^{p_1} + \left(\frac{1+z_c}{1+z}\right)^{p_2}}, \tag{2.9}$$

gdje je

$$z_c = \begin{cases} z_c^* & , \, L > L_a \\ z_c^* \cdot \left(\frac{L}{L_a}\right)^a & , \, L < L_a. \end{cases} \tag{2.10}$$

Vrijednosti parametara su $z_c^* = 2.01$, $L_a = 10^{27.92}$ WHz^{-1}, $a = 0.40$, $p_1 = 3.59$ i $p_2 = -0.25$. Lokalna funkcija luminoziteta dana je s

$$\Phi_0^{\text{AGN}}(L) = \Phi_\star^{\text{AGN}} \left(\frac{L}{L_\star}\right)^{1-\alpha} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \log^2\left(1 + \frac{L}{L_\star}\right)\right], \tag{2.11}$$

gdje su $\Phi_\star^{\text{AGN}} = 10^{-3.91}$ Mpc^{-3}dex^{-1}, $L_\star = 10^{22.26}$ WHz^{-1}, $\sigma = 1.41$ i $\alpha = 1.39$.

2.3 Diferencijalni brojevi izvora iz analitičkih funkcija luminoziteta

Kako bi se iz modela evolucije opisanih jednadžbama u prethodnom poglavlju dobili diferencijalni brojevi izvora treba se prisjetiti da funkcije luminoziteta daju gustoću izvora u određenim intervalima luminoziteta. Broj izvora, ΔN, unutar inter-

vala luminoziteta $\Delta \log L$ i sferne ljuske volumena ΔV može se dobiti kao

$$\Delta N = \Phi(L, z) \Delta V \Delta \log L, \tag{2.12}$$

gdje je $\Phi(L, z)$ funkcija luminoziteta. Ovaj izraz se može još i proširiti s intervalom crvenog pomaka Δz te je tada jednadžba (2.12) oblika

$$\Delta N = \Phi(L, z) \frac{\Delta V}{\Delta z} \Delta \log L \, \Delta z. \tag{2.13}$$

Veličina $\Delta V / \Delta z$ predstavlja diferencijalni sugibajući volumen. Sugibajući volumen opisuje volumen za koji gustoća objekata koji se gibaju Hubbleovim tokom i ne evoluiraju ostaje ista s crvenim pomakom. Kako bi se izračunao sugibajući diferencijalni volumen potrebno je definirati kozmološke parametre. Kroz ovaj rad koristi se Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker kozmologija bez zakrivljenosti te vrijednosti parametara $H_0 = 70$ km s^{-1}Mpc^{-1}, $\Omega_m = 0.3$ i $\Omega_\lambda = 0.7$, gdje je H_0 Hubbleova konstanta, Ω_m bezdimenzionalni parametar gustoće materije te Ω_λ bezdimenzionalni parametar gustoće vakuuma.

Račun broja izvora u jednadžbi (2.13) započinje definicijom raspona gustoće toka zračenja, ΔS. Maksimalna vrijednost toka zračenja, $S_{\text{max}} = 10^2$ Jy, uzeta je tako da dobiveni brojevi izvora dobro opisuju već poznate rezultate dobivene iz radiopregleda neba za najsjajnije izvore. Minimalna vrijednost toka zračenja, $S_{\text{min}} = 10^{-7.5}$ Jy, definirana je tako da opisuje rezultate na vrijednostima na kojima će budući planirani radiopregledi neba moći detektirati izvore. Rasponi gustoće toka zračenja definirani su tako da logaritamski budu jednake veličine. Ovaj korak je potreban kako bi se u svakom definiranom rasponu nalazilo barem nekoliko izvora. Za puno rjeđe najsjajnije izvore ovo je posebno bitno kako ne bi dobili raspone bez izvora. Također, kako bi se što bolje pratio analitički oblik evolucije dan jednadžbom (2.8) treba uzeti dovoljno velik broj raspona. Ovakvim odabirom raspona detalji krivulje koja opisuje funkciju luminoziteta bit će bolje reproducirani u rezultatima diferencijalnog broja izvora. U idućem koraku potrebno je definirati raspone crvenog pomaka. Crveni pomaci se uzimaju od lokalnog svemira na vrijednosti $z = 0$ do $z = 6$ sa širinom raspona od $\Delta z = 0.001$.

Nakon definicije raspona kreće se od najnižeg raspona crvenog pomaka, Δz, te se određuje njegova srednja vrijednost $\overline{\Delta z}$. Iz $\overline{\Delta z}$ računa se diferencijalni sugibajući vo-

lumen koristeći "python biblioteku" `Astropy`[5]. Za svaki pojedini raspon Δz definirani su svi rasponi ΔS od S_{min} do S_{max}. Svim rasponima ΔS odredi se logaritamska sredina $\overline{\Delta S}$. Iz $\overline{\Delta S}$ računaju se luminoziteti izvora. Zbog udaljenosti izvora pri izračunu luminoziteta trebamo uzeti u obzir efekte širenja svemira. Luminozitet izvora u vlastitom sustavu izvora dobivamo iz

$$L_\nu = S_\nu \frac{4\pi D_L^2}{(1+z)^{1+\alpha}}, \tag{2.14}$$

gdje je L_ν luminozitet izvora na frekvenciji ν, S_ν tok zračenja na frekvenciji ν, α spektralni indeks izvora, a D_L je luminozitetna udaljenost (engl. *luminosity distance*). Luminozitetna udaljenost izvora definirana je preko njegovog bolometrijskog luminoziteta L i toka zračenja S kao

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi S}}. \tag{2.15}$$

Za fiksni odabir kozmoloških konstanti, luminozitetna udaljenost D_L je funkcija crvenog pomaka $D_L(z)$. Za izračun luminozitetne udaljenosti za dani crveni pomak koristi se "python biblioteka" `astropy`. Za spektralni indeks uzeta je vrijednost $\alpha = -0.7$ koja odgovara prosječnoj vrijednosti izvora detektiranih na frekvenciji od 3 GHz u COSMOS polju [27]. Kada se odrede luminoziteti računa se funkcija luminoziteta za AGN, SF i ukupnu populaciju izvora. Za SF populaciju dobiveni luminoziteti se prvo evoluiraju prema ovisnosti danoj u jednadžbi (2.5) te se zatim uvrštavaju u lokalnu funkciju luminoziteta danom jednadžbom (2.4). Sličan postupak provodi se i za AGN populaciju te ukupnu populaciju. U sljedećem koraku računa se logaritamska širina raspona luminoziteta. Iz granica svakog ΔS raspona odrede se luminoziteti prema ranije opisanom postupku. Logaritamska širina raspona se zatim dobije iz razlike dobivenih luminoziteta kao

$$\Delta \log L = \log L_{\text{gore}} - \log L_{\text{dolje}}, \tag{2.16}$$

gdje L_{gore} i L_{dolje} označavaju luminozitete dobivene iz gornje i donje granice ΔS raspona, respektivno. Sada se mogu odrediti brojevi izvora ΔN u pojedinom rasponu ΔS prema jednadžbi (2.13). Isti postupak se ponavlja za sve definirane raspone

[5] `http://www.astropy.org/`

crvenog pomaka.

Sada je za svaki raspon Δz poznat ΔN u svakom definiranom rasponu ΔS. Kako bi se dobili diferencijalni brojevi izvora potrebno je znati ukupan ΔN u svakom definiranom rasponu ΔS. Sada se za pojedini raspon ΔS zbrajaju brojevi izvora po svim rasponima Δz. Kao krajnji rezultat dobiju se ukupni brojevi izvora za svaki definirani raspon ΔS. Idući korak je normalizacija brojeva izvora. Za svaki pojedini raspon ΔS računa se njegova širina kao

$$\Delta S = S_{\text{gore}} - S_{\text{dolje}} \tag{2.17}$$

gdje S_{gore} i S_{dolje} označavaju gornju i donju granicu ΔS raspona, respektivno. Dobiveni broj izvora u svakom rasponu ΔS dijeli se s izračunatom širinom raspona. Rezultat se zatim množi s $\overline{\Delta S}^{\,2.5}$, gdje je $\overline{\Delta S}$ od prije izračunata logaritamska sredina raspona. Rezultat su diferencijalni brojevi izvora normalizirani s očekivanim brojem izvora u Euklidskom ravnom svemiru.

2.4 Diferencijalni brojevi izvora iz podataka

Kako bi se provjerili rezultati diferencijalnih brojeva izvora dobiveni iz analitičkih modela evolucija funkcija luminoziteta potrebno je iz kataloga izdvojiti uzorke za AGN i SF populacije galaksija. Izvorima iz kataloga preuzima se vrijednost gustoće toka zračenja izmjerena na frekvenciji ν. Rezultati se prikazuju na frekvenciji od 1.4 GHz pa je potrebno skalirati vrijednosti. Gustoću toka zračenja izvora na frekvenciji od 1.4 GHz, $S_{1.4\,\text{GHz}}$, može se dobiti kao

$$S_{1.4\,\text{GHz}} = \left(\frac{1.4\,\text{GHz}}{\nu\ [\text{GHz}]}\right)^{\alpha} S_{\nu}, \tag{2.18}$$

gdje je S_{ν} gustoća toka zračenja na frekvenciji ν te α spektralni indeks izvora. Iz kataloga se za sve izvore iščitava spektralni indeks. Izvorima kojima spektralni indeks nije poznat dodjeljuje se vrijednost $\alpha = -0.7$. Zatim se prateći jednadžbu (2.18) računa $S_{1.4\,\text{GHz}}$. U sljedećem koraku izvori se klasificiraju na dvije populacije: AGN i SF galaksije. Koristi se metoda viška radiovalnog zračenja opisana u 2.1 poglavlju. Izvori za koje je određen višak radiovalnog zračenja identificiraju se kao AGN galaksije, dok su ostali izvori identificirani kao SF galaksije.

Kada su poznate AGN i SF populacije te njihova gustoća toka zračenja na frekvenciji od 1.4 GHz računaju se diferencijalni brojevi izvora. U prvom koraku definiraju se rasponi toka zračenja ΔS. Iz ukupne populacije odredi se maksimalna, $S^{\text{max}}_{1.4\,\text{GHz}}$, i minimalna, $S^{\text{min}}_{1.4\,\text{GHz}}$, vrijednost toka zračenja. Vrijednosti tokova zračenja između $S^{\text{min}}_{1.4\,\text{GHz}}$ i $S^{\text{max}}_{1.4\,\text{GHz}}$ podijele se na raspone jednakih logaritamskih veličina. Svim rasponima se odredi gornja i donja granica te im se izračuna širina oduzimajući donju granicu raspona od gornje. Također, svakom rasponu se odredi logaritamska sredina $\overline{\Delta S}$. U sljedećem koraku se za svaki ΔS raspon odredi broj izvora, ΔN, za svaku populaciju pojedinačno. Dobiveni broj izvora u svakom rasponu se podjeli sa širinom odgovarajućeg raspona i efektivnom površinom odgovarajućeg polja. Dobivena veličina $\Delta N/\Delta S/A_{\text{ef}}$ daje broj izvora unutar intervala gustoće toka zračenja po prostornom kutu. U zadnjem koraku potrebno je rezultat normalizirati s obzirom na broj izvora očekivan u ravnom Euklidskom svemiru. Vrijednost $\Delta N/\Delta S/A_{\text{ef}}$ se za svaki raspon množi s odgovarajućom vrijednosti $(\overline{\Delta S})^{2.5}$. Konačan rezultat su diferencijalni brojevi izvora dN/dS.

Za dobivene vrijednosti potrebno je još izračunati statističku nepouzdanost. Za sve raspone u kojima se nalazi više od 50 izvora pretpostavlja se Poissonova statistika te se nepouzdanost, σ, za diferencijalni broj izvora računa kao

$$\sigma = \frac{\sqrt{\Delta N}}{A_{\text{ef}}\Delta S}\ \left(\overline{\Delta S}\right)^{2.5}. \tag{2.19}$$

Za raspone u kojima je broj izvora 50 ili manje, izračun pouzdanosti mjerenja provodi se na način opisan u [11]. Za broj izvora unutar raspona se iz tablica u radu preuzimaju vrijednosti koje odgovaraju gornjoj ΔN_{max} i donjoj ΔN_{min} granici broja izvora s pouzdanošću od 1σ Gaussove distribucije. Iz ΔN_{min} i ΔN_{max} računaju se diferencijalni brojevi izvora dN_{min}/dS i dN_{max}/dS koji odgovaraju donjoj i gornjoj granici dN/dS, respektivno. Gornja granica nepouzdanosti se dobije oduzimanjem dN_{max}/dS od dN/dS dok se donja granica nepouzdanosti dobije oduzimanjem dN/dS od dN_{min}/dS.

3 Podatci

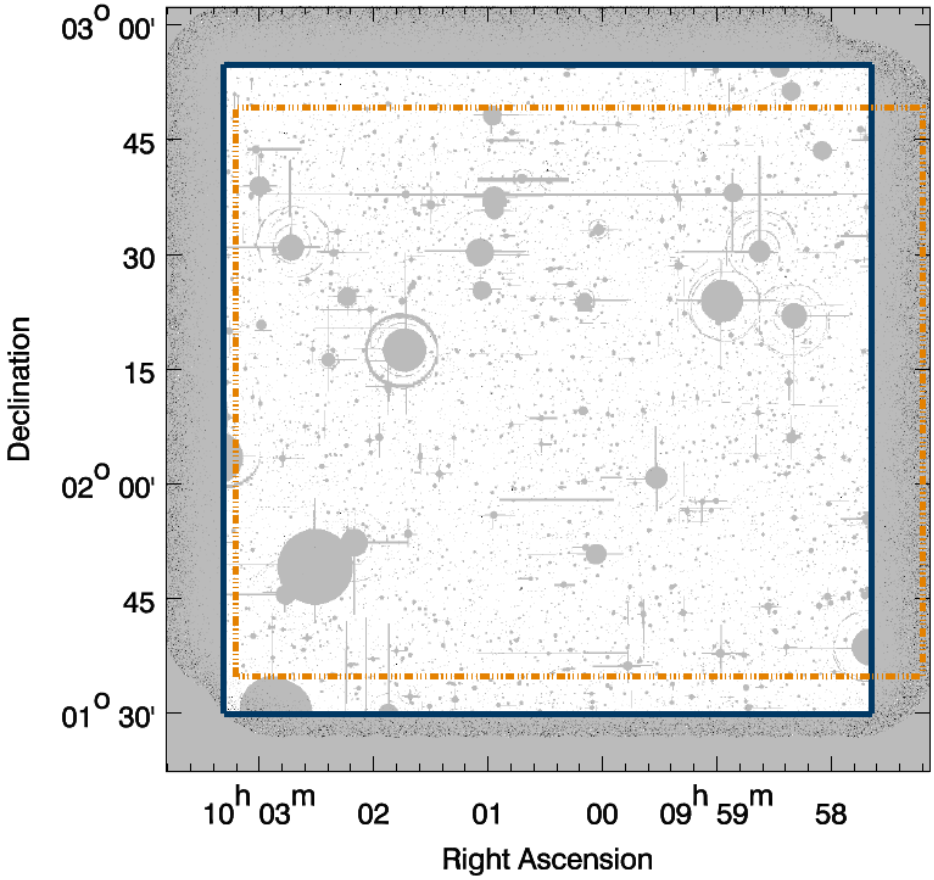
U ovom poglavlju opisani su radiopregledi neba i katalozi korišteni u radu iz čijih podataka su dobiveni diferencijalni brojevi izvora.

3.1 COSMOS

Podatci iz COSMOS polja dobiveni su u sklopu VLA-COSMOS 3GHz radiopregleda neba [26]. Ukupna opažanja trajala su 384 sata te su provedena u S pojasu frekvencija (od 2 do 4 GHz) teleskopom VLA. Snimljena je ukupna površina COSMOS polja od $\sim$ 2 deg^2 sa 192 različita usmjerenja teleskopa. Osjetljivost mjerenja iznosila je 2.3 μJy po zraci s uobičajenim 5σ detekcijskim limitom od 11.5 μJy po zraci. Konačni katalog sadrži $10\,830$ izvora. Od ukupnog broja izvora za njih 67 je utvrđeno kako su to izvori s više komponenti. Za ove objekte opažene su najmanje dvije odvojene radiokomponente koje pripadaju istom izvoru. Kompletnost kataloga je procijenjena Monte Carlo simulacijama. Katalog je 60% kompletan ispod 20 μJy, 95% kompletan iznad 40 μJy te se pretpostavlja 100% kompletnost iznad 100 μJy. Usporedbom kataloga dobivenih s opažanjima na 3 GHz i 1.4 GHz te identifikacijom istih izvora, određeni su spektralni indeksi $2\,530$ izvora. Za ostale izvore pretpostavljena je vrijednost spektralnog indeksa $\alpha = -0.7$ koja odgovara prosječnoj vrijednosti za cijelu populaciju na 3 GHz.

Cijeli katalog javno je dostupan u COSMOS IPAC/IRSA bazi podataka[6]. Nakon preuzimanja kataloga prvo je potrebno odbaciti izvore detektirane unutar maskiranih područja. Maskirana područja COSMOS polja prikazana su sivom bojom na slici 3.1. U ovim područjima postoji prisutnost sjajnih ili saturiranih izvora u optičkom dijelu spektra. Unutar kataloga odabiru se svi izvori s parametrom "COSMOS2015 masked area flag" jednkim nuli. Ovakvim odabirom svi izvori iz maskiranog područja se odbacuju. Ukupan broj radioizvora smanjuje se s $10\,830$ na $8\,696$ te je sada ukupna efektivna površina polja $A_{\text{ef}} = 1.77$ deg^2. Daljnji postupak kojim su dobiveni diferencijalni brojevi izvora opisan je u poglavlju 2.4.

[6] `https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/cosmos.html`



Slika 3.1: Mozaik VLA-COSMOS 3 GHz radopregleda neba. Područja mozaika su zasivljena zbog prisutnosti saturiranih ili sjajnih izvora u optičkom dijelu spektra. Izvori detektirani unutar ovih područja posebno su označeni unutar kataloga. Preuzeto iz [26].

3.2 3CRR

Opažanja su provedena pomoću Cambridge interferometra na frekvenciji od 178 MHz s detekcijskim limitom od 10.9 Jy. Ukupna površina polja je 13886.3deg^2. Crveni pomak je poznat za sva 173 izvora unutar kataloga. Srednja vrijednost spektralnog indeksa za cijeli katalog je $\alpha \sim -0.67$.

Kako bi se dobili diferencijalni brojevi izvora i nepouzdanosti iz kataloga primijenjen je analogan postupak kao i u 2.4 poglavlju. Svi izvori unutar kataloga su AGN galaksije.

3.3 6CE

Opažanja su provedena pomoću Cambridge Low-Frequency Synthesis teleskopa na frekvenciji od 151 MHz s ukupnom površinom od 338.13 deg^2. Detektirani izvori imaju gustoću toka zračenja u rasponu od 2 Jy $< S_{151\,\text{MHz}} <$ 3.93 Jy. Ukupni broj

izvora u katalogu je 59. Crveni pomak određen je za sve osim 3 izvora. Srednji spektralni indeks kataloga je $\alpha \sim -0.51$.

Analognim postupkom kao i u 2.4 poglavlju dobiju se diferencijalni brojevi izvora i nepouzdanosti. AGN galaksije su jedina populacija koja se pojavljuje u katalogu.

3.4 7C

Opažanja 7C polja su također provedena pomoću Cambridge Low-Frequency Synthesis teleskopa na frekvenciji of 151 MHz. Broj detektiranih izvora je 128. Polje je podijeljeno na tri regije: 7C-I, 7C-II i 7C-III. Ukupna površina polja je 72.22 deg^2. Crveni pomak je određen za sve izvore u potonjim optičkim i gotovo infracrvenim (engl. *near-infrared*, NIR) pregledima neba. Spektralni indeksi su određeni koristeći polikromatske radiovalne gustoće toka zračenja.

Diferencijalni brojevi izvora i nepouzdanosti su dobivene postupkom opisanim u 2.4 poglavlju. Svi izvori unutar kataloga pripadaju AGN populaciji.

3.5 XXL-North

Podatci XXL-North polja su opaženi s Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) radio teleskopom koji se nalazi u Indiji. Mjerenja su vršena na frekvenciji od 610 MHz i podijeljena su na dva dijela polja. Unutarnji dio polja (XMM-LSS polje) je površine 11.9 deg^2. Osjetljivost mjerenja u ovom području je 200 μJy po zraci [30]. Vanjski dio polja je površine 18.5 deg^2 te mjerenja u ovom području imaju bolju osjetljivost od 45 μJy po zraci [29]. Ukupan broj izvora iz oba dijela polja je $5\,434$. Spektralni indeksi izvora dobiveni su usporedbom kataloga s katalogom izvora opaženih na frekvenciji od 1.4 GHz u sklopu NRAO Very Large Array Sky Survey radiopregleda neba. Izračunati srednji spektralni indeks za populaciju iz središnjeg dijela polja je $\alpha = -0.65$, a za vanjski dio $\alpha = -0.75$.

Iz kataloga se izdvojila čista AGN populacija. To je postignuto odbacivanjem svih izvora čiji je izračunati tok zračenja na frekvenciji od 1.4 GHz manji od 1 mJy. Diferencijalni brojevi izvora i nepouzdanosti se nadalje dobiju analognim postupkom kao i u 2.4 poglavlju.

3.6 XXL-South

XXL-South polje je opaženo s Australia Telescope Compact Array (ATCA) na frekvenciji od 2.1 GHz [3]. Ukupna površina polja je 25 deg^2 te je osjetljivost mjerenja ~ 41 μJy po zraci. Ukupan katalog se sastoji od 6287 izvora od kojih 48 ima dvije ili više komponenti. Spektralni indeksi izvora su dobiveni povezivanjem izvora s izvorima u katalogu dobivenim sa Sydney University Molonglo Sky Survey (SUMSS) radiopregledom neba na frekvenciji od 0.843 GHz. Izračunati srednji spektralni indeks je $\alpha \sim -0.75$.

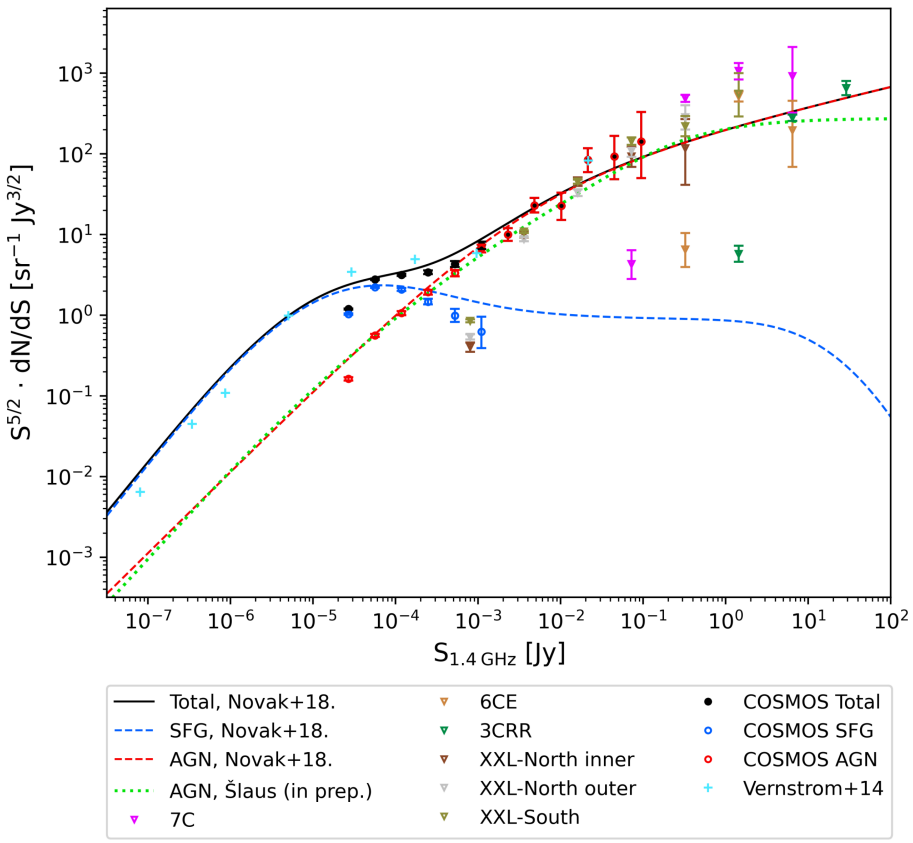
Kao i za XXL-North katalog izdvojena je AGN populacija izvora tako da se odbace svi izvori s tokom zračenja na frekvenciji od 1.4 GHz manjim od 1 mJy. Zatim se postupkom opisanim u 2.4 poglavlju računaju diferencijalni brojevi izvora i pripadajuće nepouzdanosti.

4 Rezultati i diskusija

Metodom opisanom u poglavlju 2.3 dobiveni su diferencijalni brojevi izvora iz ranije spomenutih analitičkih modela evolucije funkcija luminoziteta te su prikazani na slici 4.1. Na najvećim vrijednostima S dominantna je AGN populacija izvora koja je opisana s dvije krivulje: crvena crtkana i zelena točkasta krivulja. Crvena crtkana krivulja dobivena je iz modela evolucije opisanog jednadžbom (2.7), a zelena točkasta krivulja iz modela evolucije opisanog s jednadžbama (2.9) i (2.10). Dva modela dobro se slažu od najnižih vrijednosti S pa sve do $S \approx 2$ Jy. Na najvećim vrijednostima S zelena krivulja daje niže brojeve izvora. Ovo odstupanje možemo pridijeliti različitim modelima evolucije. Model evolucije funkcija luminoziteta opisan crvenom krivuljom dobiven je prilagodbom na podatke iz VLA-COSMOS 3GHz radiopregleda neba [28] [19]. Mjerenja ovog radiopregleda prilagođena su za opažanje tamnijih izvora (opažene vrijednosti $S_{1.4\,\mathrm{GHz}}$ su od $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} \approx 18.4\ \mu$Jy do $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} \approx 0.14$ Jy). Mali broj opaženih sjajnih izvora doprinosi nepouzdanosti modela evolucije AGN populacije za najveće vrijednosti luminoziteta, odnosno nepouzdanosti broja izvora za najveće vrijednosti S. Model opisan zelenom krivuljom je prilagođen ne samo na podatke iz COSMOS polja već i na podatke iz drugih radiopregleda neba (3CRR, 6CE, 7C, XXL-North, XXL-South) u kojima je opažen veći broj sjajnijih izvora [33].

Crna puna krivulja opisuje diferencijalni broj izvora ukupne populacije i dobivena je iz analitičkog modela opisanog jednadžbom (2.8). Krivulja prati AGN galaksije od najvećih vrijednosti S sve do $S \approx 1$mJy. Na ovoj vrijednosti S ukupnoj populaciji počinju doprinositi i SF galaksije koje su opisane plavom crtkanom krivuljom dobivenom iz modela opisanog jednadžbom (2.5). Doprinos SF galaksija raste s manjim vrijednostima S te na najmanjim vrijednostima one potpuno dominiraju brojem izvora. Kalibracija koda kojim se dobivaju diferencijalni brojevi izvora napravljena je prema modelima preuzetim iz [19]. Dobiveni rezultati pokazuju vrlo dobro slaganje.

Na slici 4.1 prikazani su također rezultati dobiveni obradom podataka iz prije navedenih kataloga. Za AGN populaciju podatci iz COSMOS polja (prazni crveni kružići) vrlo dobro prate krivulje dobivene iz analitičkih modela. Veće odstupanje podataka od krivulja se primjećuje na vrijednostima $S > 0.1$ Jy. Odstupanja od krivulja su za većinu točaka ograničena unutar izračunate nepouzdanosti. Za SF galaksije brojevi izvora dobiveni podatcima iz COSMOS polja prikazani su plavim kružićima.



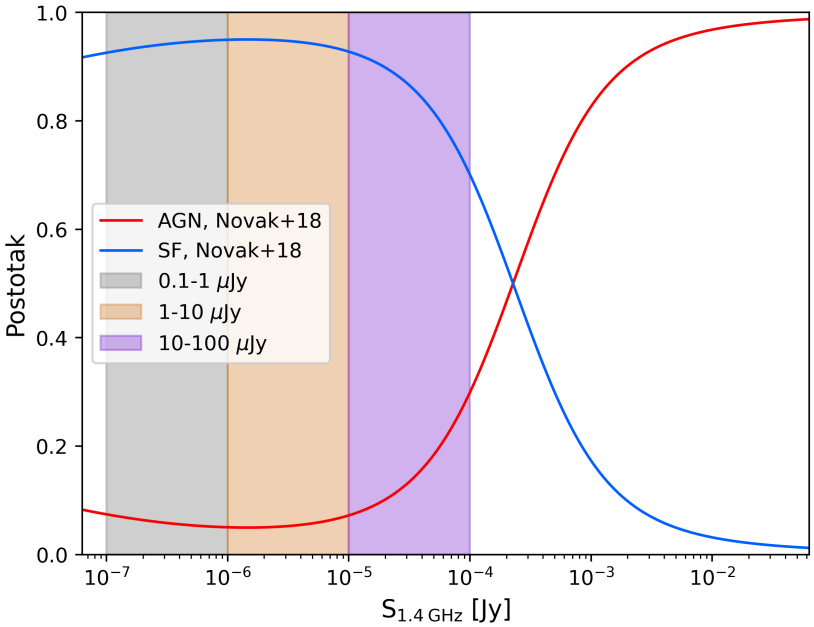
Slika 4.1: Diferencijalni brojevi izvora dobiveni metodama opisanim u 2. poglavlju iz različitih analitičkih modela evolucije funkcija luminoziteta te iz podataka različitih kataloga naznačenih u legendi.

Na vrijednostima S većim od 1 mJy nema detektiranih SF izvora. Za sve podatke iz pojedinih kataloga postoji pad diferencijalnog broja izvora za najniže raspone S. Ovo se može objasniti činjenicom da se podatci za najniže raspone S nalaze ispod detekcijskog limita odgovarajućih radiopregleda. Zbog doprinosa pozadinskog šuma možemo očekivati kako će se na ovim vrijednostima S detektirati broj izvora manji od stvarnog. Ovo se posebno očituje za izvore iz 3CRR, 6CE i 7C kataloga. Točke dobivene iz ovih kataloga koje odgovaraju najnižem rasponu gustoće toka zračenja najviše odstupaju od analitičkih modela.

Rezultati dobiveni iz analitičkih modela evolucije uspoređeni su i s rezultatima iz [31]. U tom radu dobiveni su diferencijalni brojevi izvora $P(D)$ analizom provedenom na dubokim opažanjima u polju Lockman Hole. $P(D)$ analiza daje pouzdane rezultate za brojeve tamnih izvora jer nije pod utjecajem odstupanja uzrokovanih zbog nepotpunosti mjerenja. Rezultati su u dobrom slaganju. Najveća odstupanja su na vrijednostima S od 10 μJy do 200 μJy. $P(D)$ analiza je napravljena na polju

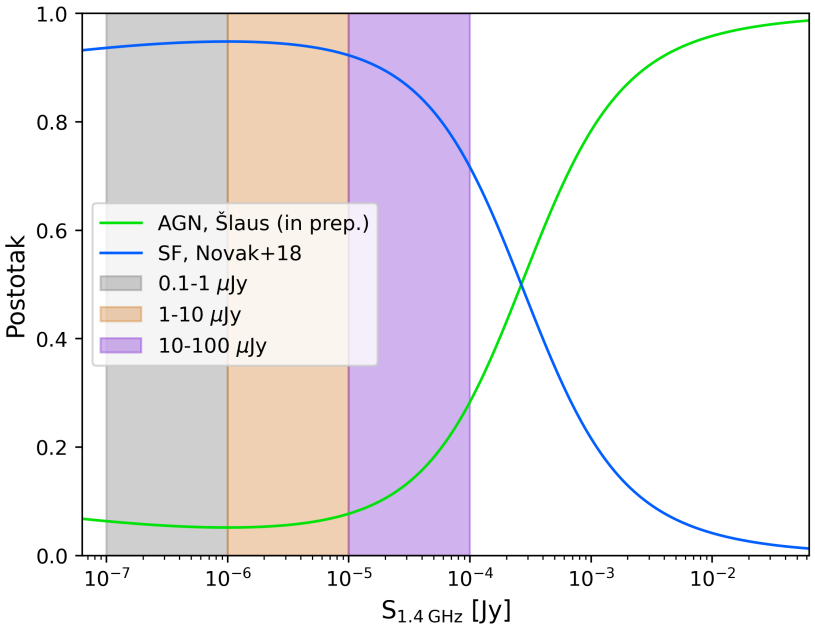
površine 0.02 deg^2. Zbog male veličine polja nehomogenost gustoće izvora na kozmološkim skalama može imati značajan doprinos te objasniti odstupanja rezultata.

Udjeli svake populacije u ovisnosti o S prikazani su na slikama 4.2 i 4.3 kako bi se bolje mogao predočiti doprinos pojedine populacije diferencijalnom broju izvora. Na slici 4.2 prikazan je udio SF i AGN populacija dobiven na temelju mo-



Slika 4.2: Udio zasebnih populacija izvora prikazan u ovisnosti o gustoći toka zračenja S. Ukupan broj izvora dobiven je iz modela opisanog jednadžbom (2.8) koji je preuzet iz [19]. AGN galaksije opisane su crvenom krivuljom, dok su SF galaksije opisane plavom krivuljom. Različitim bojama osjenčano je nekoliko raspona S u kojima je visok udio SF galaksija.

dela preuzetog iz [19] i opisanog jednadžbom (2.8). Dobiveni udio je konzistentan s rezultatom iz [19]. Udio prikazan na slici 4.3 dobiven je modelirajući ukupan broj izvora kao zbroj AGN populacije opisane modelom evolucije preuzetim iz [33] (jednadžbe (2.9) i (2.10)) i SF populacije opisane modelom preuzetim iz [19] (jednadžba (2.5)). Krivulje na obje slike prate isti trend. Na vrijednostima toka zračenja većim od $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} \approx$ 1 mJy dominiraju AGN galaksije. Za manje vrijednosti $S_{1.4\,\mathrm{GHz}}$ doprinos AGN populacije opada, dok isti za SF populaciju raste. Na vrijednosti $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} \approx 0.2$ mJy obje populacije podjednako doprinose broju izvora. SF galaksije postižu udio veći od 90% te dominiraju brojevima izvora za vrijednosti $S_{1.4\,\mathrm{GHz}}$ manje od 10 μJy. Za još manje vrijednosti $S_{1.4\,\mathrm{GHz}}$ njihov udio ostaje otprilike konstantan. Ovaj rezultat koristan je za buduće teleskope i radiopreglede neba s detekcijskim limi-



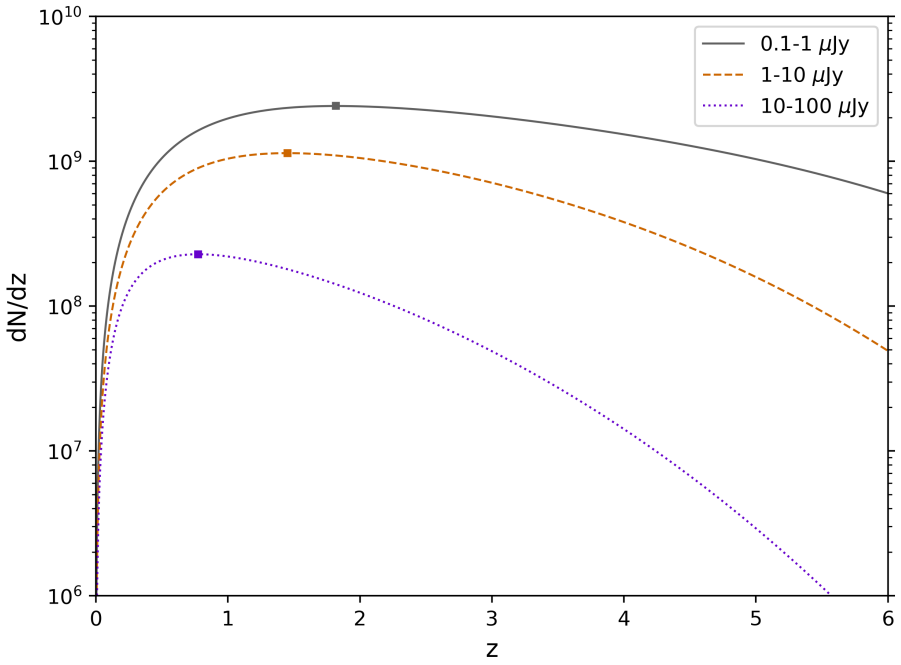
Slika 4.3: Udio zasebnih populacija izvora prikazan u ovisnosti o gustoći toka zračenja S. Ukupan broj izvora je zbroj AGN populacije (zelena krivulja) opisane modelom evolucije preuzetim iz [33] (jednadžbe (2.9) i (2.10)) te SF populacije (plava krivulja) opisane modelom evolucije preuzetim iz [19] (jednadžba (2.5)). Različitim bojama osjenčano je nekoliko raspona S u kojima je visok udio SF galaksija.

tom ispod $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} = 10\,\mu$Jy. Odbacivanjem svih izvora detektiranih s $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} > 10\,\mu$Jy dobiva se uzorak sastavljen od najmanje 90% SF galaksija. Ovakvom jednostavnom metodom se samo na temelju radiovalnog zračenja može stvoriti uzorak izvora u kojem je detektirano zračenje nastalo procesima vezanim za nastanak novih zvijezda.

Na slikama 4.2 i 4.3 različitim bojama osjenčana su područja toka zračenja na kojima je udio izvora dominiran SF galaksijama. Na slici 4.4 unutar ovih područja prikazana je raspodjela broja SF izvora unutar raspona z u ovisnosti o z. Rezultat je dobiven na temelju modela evolucije SF galaksija opisanog jednadžbom (2.5). Za buduće duboke radiopreglede neba model predviđa da će raspodjela SF izvora s tokovima zračenja nižim od 1 μJy imati svoj maksimum na vrijednosti $z \approx 2$. Ovaj rezultat je u skladu s rezultatom iz [19].

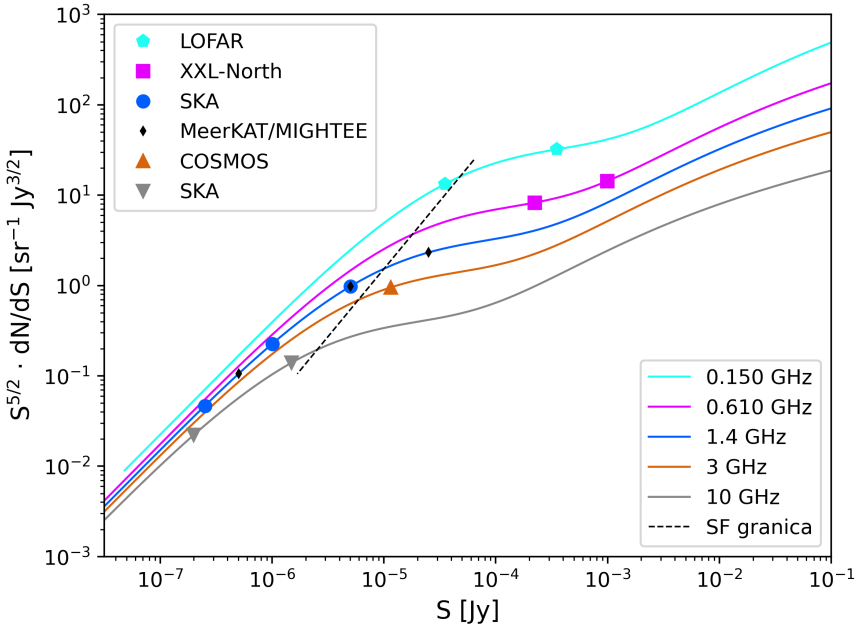
Dobiveni diferencijalni brojevi izvora iz analitičkih modela preračunati su i na druge frekvencije ν. Gustoća toka zračenja na frekvenciji ν dobivena je iz jednadžbe (2.18). Diferencijalni brojevi izvora na frekvenciji ν dobiju se sličnim izrazom

$$\left[S^{5/2}dN/dS\right]_{\nu} = \left(\frac{\nu\,[\mathrm{GHz}]}{1.4\,\mathrm{GHz}}\right)^{1.5\alpha} \cdot \left[S^{5/2}dN/dS\right]_{1.4\,\mathrm{GHz}}, \tag{4.1}$$



Slika 4.4: Raspodjela diferencijalnog broja SF galaksija unutar raspona z u ovisnosti o z za tri različita raspona S. Raspodjela je dobivena koristeći model evolucije opisan jednadžbom (2.5). Maksimumi raspodjela označeni su kvadratima.

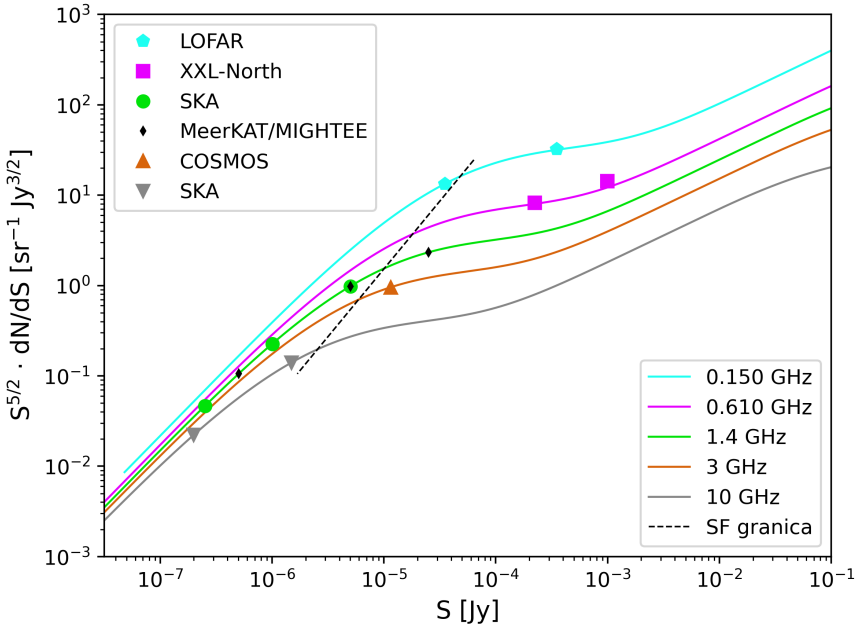
gdje je $\left[S^{5/2}dN/dS\right]_\nu$ broj izvora na frekvenciji ν, $\left[S^{5/2}dN/dS\right]_{1.4\,\mathrm{GHz}}$ broj izvora na frekvenciji od 1.4 GHz, a α spektralni index. Za spektralni indeks pretpostavlja se vrijednost $\alpha = -0.7$. Ovakav jednostavan račun vrijedit će u većini slučajeva gdje je glavni doprinos radiovalnom zračenju sinkrotronsko zračenje te je spektar opisan jednadžbom (1.3). Na niskim frekvencijama (ispod 150 MHz) račun bi mogao odstupati zbog pojave samoapsorpcije, dok je na frekvencijama većim od 10 GHz moguć doprinos zakočnog zračenja. Diferencijalni brojevi izvora preračunati za različite frekvencije ν prikazani su na slikama 4.5 i 4.6. Brojevi izvora prikazani na slici 4.5 dobiveni su koristeći model evolucije opisan jednadžbom (2.8) te zatim skalirani na druge frekvencije. Rezultat je u skladu s rezultatom iz [19]. Brojevi izvora prikazani na slici 4.6 dobiveni su kao zbroj AGN populacije opisane modelom preuzetim iz [33] (jednadžbe (2.9) i (2.10)) te SF populacije dobivene iz modela preuzetog iz [19] (jednadžba (2.5)). Također, na slikama su prikazani i detekcijski limiti raznih teleskopa te granica $S = 10\,\mu$Jy ispod koje SF galaksije dominiraju brojem izvora. Plavim kvadratima prikazana je osjetljivost postignuta radiopregledom XXL-North polja s teleskopom GMRT koji je opisan u poglavlju 3.5. Narančastim trokutima prikazana je osjetljivost postignuta radiopregledom COSMOS polja teleskopom VLA na



Slika 4.5: Diferencijalni brojevi izvora ukupne populacije dobiveni modelom opisanim jednadžbom (2.8) preračunati za tokove zračenja na različitim frekvencijama ν. Crnom isprekidanom linijom prikazana je vrijednost $S = 10$ μJy koja predstavlja granicu ispod koje SF galaksije dominiraju brojem izvora. Prikazani su i detekcijski limiti spomenutih postojećih i planiranih budućih radiopregleda neba.

frekvenciji $\nu = 3$ GHz (poglavlje 3.1). Za usporedbu su u tablici 4.1 prikazani i detekcijski limiti drugih postojećih (LOFAR[7], MeerKAT/MIGHTEE[8]) i budućih planiranih radiopregleda neba i teleskopa [17] [22]. Jedan od tih teleskopa je i *Square Kilometre Array* (SKA)[9]. Po završetku svoje gradnje teleskop SKA će postizati osjetljivosti značajno bolje od dosadašnjih teleskopa. Sa slike 4.3 vidi se kako su detekcijski limiti budućih planiranih radiopregleda SKA teleskopom na vrijednostima S manjim od 10 μJy. Na temelju prijašnjeg rezultata može se očekivati da će se na najnižim vrijednostima gustoće toka zračenja SKA teleskopom opažati gotovo samo SF populacija galaksija.

[7]Low Frequency Array
[8]Meer Karoo Array Telescope
[9]Square Kilometre Array



Slika 4.6: Diferencijalni brojevi izvora dobiveni kao zbroj AGN (jednadžbe (2.9) i (2.10)) i SF (jednadžba (2.5)) populacije preračunati za tokove zračenja na različitim frekvencijama ν. Crnom isprekidanom linijom prikazana je vrijednost $S = 10\mu$Jy koja predstavlja granicu ispod koje SF galaksije dominiraju brojem izvora. Prikazani su i detekcijski limiti spomenutih postojećih i planiranih budućih radiopregleda neba.

Radiopregled	Frekvencija [MHz]	Detekcijski limit [μJy po zraci]
LOFAR Tier 1	15-65, 120-180	350
LOFAR Tier 3	150	35
SKA Wide	1400	5
SKA Deep	1400	1
SKA Ultra Deep	1400	0.25
MeerKAT/MIGHTEE Tier 1	1400	25
MeerKAT/MIGHTEE Tier 2	1400	5
MeerKAT/MIGHTEE Tier 3	1400	0.5
SKA Deep	10 000	1.5
SKA Ultra Deep	10 000	0.2

Tablica 4.1: Prikaz raznih planiranih radiopregleda neba s frekvencijama na kojima će opažati izvore. Prikazani su i očekivani 5σ detekcijski limiti. Vrijednosti su preuzete iz [17] [22].

5 Zaključak

Na temelju postojećih analitičkih modela evolucije funkcija luminoziteta računali su se diferencijalni brojevi izvora. Izvori su podijeljeni na dvije populacije ovisno o tome u kojem fizikalnom procesu nastaje radiovalno zračenje. Prva populacija su galaksije u kojima radiovalno zračenje nastaje u procesima vezanim za aktivnu galaktičku jezgru. Za ovu populaciju preuzeta su dva različita modela evolucije funkcija luminoziteta. Druga populacija su galaksije u kojima radiovalno zračenje nastaje u procesima vezanim za nastajanje novih zvijezda. Za ovu populaciju korišten je jedan analitički model evolucije funkcija luminoziteta. Diferencijalni brojevi izvora dobiveni su još i iz podataka koji su preuzeti iz raznih kataloga.

Rezultati dobiveni iz analitičkih modela dobro se slažu s rezultatima dobivenim upotrebom podataka iz kataloga. Najveća odstupanja dvaju rezultata su na vrijednostima toka zračenja većim od 0.1 Jy. Nepouzdanosti podataka dobivenih iz kataloga na ovim vrijednostima toka zračenja dobro ograničavaju krivulje dobivene iz analitičkih modela. Dva korištena modela za AGN populaciju daju konzistentne rezultate do vrijednosti toka zračenja $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} \approx 2$ Jy. Na većim vrijednostima toka zračenja postoji odstupanje krivulja koje je pripisano korištenju različitih modela evolucije funkcija luminoziteta. Ukupni diferencijalni brojevi izvora zračenja na većim vrijednostima toka zračenja dominirani su AGN populacijom izvora, dok na najnižim vrijednostima dominiraju SF galaksije. Iz analitičkih modela dobiveno je da je ukupan doprinos broju izvora od SF i AGN populacije podjednak na $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} \approx 200\ \mu$Jy. Nadalje, pokazano je kako je ukupan udio SF populacije veći od 90% za vrijednosti toka zračenja manje od $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} \approx 10\ \mu$Jy u skladu s rezultatima u literaturi. Model evolucije za SF galaksije predviđa da će budući opaženi izvori s $S_{1.4\,\mathrm{GHz}} < 1\ \mu$Jy maksimum svoje raspodjele postizati na vrijednostima crvenog pomaka z ≈ 2. Diferencijalni brojevi izvora ukupne populacije dobiveni iz analitičkog modela skalirani su i na druge vrijednosti frekvencija zračenja. Rezultat ukazuje kako će budući radiopregledi neba s visokom osjetljivošću na najnižim vrijednostima toka zračenja detektirati gotovo samo SF galaksije.

Bibliography

[1] Volker Beckmann and Chris R. Shrader. *Active Galactic Nuclei*. 2012.

[2] Bernard F Burke, Francis Graham-Smith, and Peter N Wilkinson. *An introduction to radio astronomy*. Cambridge University Press, 2019.

[3] Andrew Butler, Minh Huynh, Jacinta Delhaize, Vernesa Smolčić, Anna Kapińska, Dinko Milaković, Mladen Novak, Nikola Baran, Andrew O'Brien, Lucio Chiappetti, Shantanu Desai, Sotiria Fotopoulou, Cathy Horellou, Chris Lidman, and Marguerite Pierre. The XXL Survey. XVIII. ATCA 2.1 GHz radio source catalogue and source counts for the XXL-South field. , 620:A3, November 2018.

[4] Bradley W Carroll and Dale A Ostlie. *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press, 2017.

[5] J. J. Condon. Radio emission from normal galaxies. , 30:575–611, January 1992.

[6] J. J. Condon. Radio emission from normal galaxies. , 30:575–611, January 1992.

[7] JJ Condon. Radio luminosity functions. In *The Interpretation of Modern Synthesis Observations of Spiral Galaxies*, volume 18, pages 113–123, 1991.

[8] JJ Condon. Radio luminosity functions. In *Extragalactic Radio Sources*, pages 535–540. Springer, 1996.

[9] I. Delvecchio, V. Smolčić, G. Zamorani, C. Del P. Lagos, S. Berta, J. Delhaize, N. Baran, D. M. Alexander, D. J. Rosario, V. Gonzalez-Perez, O. Ilbert, C. G. Lacey, O. Le Fèvre, O. Miettinen, M. Aravena, M. Bondi, C. Carilli, P. Ciliegi, K. Mooley, M. Novak, E. Schinnerer, P. Capak, F. Civano, N. Fanidakis, N. Herrera Ruiz, A. Karim, C. Laigle, S. Marchesi, H. J. McCracken, E. Middleberg, M. Salvato, and L. Tasca. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: AGN and host-galaxy properties out to z $\lesssim$ 6. , 602:A3, June 2017.

[10] S George Djorgovski, AA Mahabal, AJ Drake, MJ Graham, and Ciro Donalek. Sky surveys. *Planets, Stars, and Stellar Systems*, 2:223–281, 2013.

[11] N. Gehrels. Confidence Limits for Small Numbers of Events in Astrophysical Data. , 303:336, April 1986.

[12] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, and R. A. Collins. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source (Reprinted from Nature, February 24, 1968). , 224(5218):472, November 1969.

[13] Karl G Jansky. Radio waves from outside the solar system. *Nature*, 132(3323):66–66, 1933.

[14] Amy E Kimball and Željko Ivezić. A unified catalog of radio objects detected by nvss, first, wenss, gb6, and sdss. *The Astronomical Journal*, 136(2):684, 2008.

[15] Tom Mauch and Elaine M. Sadler. Radio sources in the 6dFGS: local luminosity functions at 1.4 GHz for star-forming galaxies and radio-loud AGN. , 375(3):931–950, March 2007.

[16] Tom Muxlow, R. J. Beswick, A. M. S. Richards, and H. J. Thrall. Starburst galaxies. In Willem Baan, Rafael Bachiller, Roy Booth, Patrick Charlot, Phil Diamond, Mike Garrett, Xiaoyu Hong, Justin Jonas, Andrzej Kus, Franco Mantovani, Andrzej Marecki, Hans Olofsson, Wolfgang Schlueter, Merja Tornikoski, Na Wang, and Anton Zensus, editors, *Proceedings of the 8th European VLBI Network Symposium*, page 31, January 2006.

[17] Ray P. Norris, J. Afonso, D. Bacon, Rainer Beck, Martin Bell, R. J. Beswick, Philip Best, Sanjay Bhatnagar, Annalisa Bonafede, Gianfranco Brunetti, Tamás Budavári, Rossella Cassano, J. J. Condon, Catherine Cress, Arwa Dabbech, I. Feain, Rob Fender, Chiara Ferrari, B. M. Gaensler, G. Giovannini, Marijke Haverkorn, George Heald, Kurt Van der Heyden, A. M. Hopkins, M. Jarvis, Melanie Johnston-Hollitt, Roland Kothes, Huib Van Langevelde, Joseph Lazio, Minnie Y. Mao, Alejo Martínez-Sansigre, David Mary, Kim Mcalpine, E. Middelberg, Eric Murphy, P. Padovani, Zsolt Paragi, I. Prandoni, A. Raccanelli, Emma Rigby, I. G. Roseboom, H. Röttgering, Jose Sabater, Mara Salvato, Anna M. M. Scaife, Richard Schilizzi, N. Seymour, Dan J. B. Smith, Grazia Umana, G. B. Zhao, and Peter-Christian Zinn. Radio Continuum Surveys with Square Kilometre Array Pathfinders. , 30:e020, March 2013.

[18] M. Novak, V. Smolčić, J. Delhaize, I. Delvecchio, G. Zamorani, N. Baran, M. Bondi, P. Capak, C. L. Carilli, P. Ciliegi, F. Civano, O. Ilbert, A. Karim, C. Laigle, O. Le Fèvre, S. Marchesi, H. McCracken, O. Miettinen, M. Salvato, M. Sargent, E. Schinnerer, and L. Tasca. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Cosmic star formation history since z 5. , 602:A5, June 2017.

[19] Mladen Novak, Vernesa Smolčić, E Schinnerer, G Zamorani, IVAN Delvecchio, MARCO Bondi, and J Delhaize. Constraints on submicrojansky radio number counts based on evolving vla-cosmos luminosity functions. *Astronomy & Astrophysics*, 614:A47, 2018.

[20] Paolo Padovani. The faint radio sky: radio astronomy becomes mainstream. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 24(1):1–61, 2016.

[21] Paolo Padovani, DM Alexander, RJ Assef, B De Marco, P Giommi, RC Hickox, GT Richards, V Smolčić, E Hatziminaoglou, V Mainieri, et al. Active galactic nuclei: what's in a name? *The Astronomy and Astrophysics Review*, 25(1):1–91, 2017.

[22] I. Prandoni and N. Seymour. Revealing the Physics and Evolution of Galaxies and Galaxy Clusters with SKA Continuum Surveys. In *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*, page 67, April 2015.

[23] M. Ryle and R. W. Clarke. An examination of the steady-state model in the light of some recent observations of radio sources. , 122:349, January 1961.

[24] Peter Schneider. *Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction*. Springer, 2014.

[25] Vernesa Smolcic. *The faint radio population in the VLA-COSMOS Survey: Star forming galaxies and active galactic nuclei*. PhD thesis, 2007.

[26] Vernesa Smolčić, IVAN Delvecchio, G Zamorani, Nikola Baran, Mladen Novak, J Delhaize, E Schinnerer, S Berta, MARCO Bondi, Paolo Ciliegi, et al. The vla-cosmos 3 ghz large project: Multiwavelength counterparts and the composition of the faint radio population. *Astronomy & Astrophysics*, 602:A2, 2017.

[27] V. Smolčić, M. Novak, M. Bondi, P. Ciliegi, K. P. Mooley, E. Schinnerer, G. Zamorani, F. Navarrete, S. Bourke, A. Karim, E. Vardoulaki, S. Leslie, J. Delhaize, C. L. Carilli, S. T. Myers, N. Baran, I. Delvecchio, O. Miettinen, J. Banfield, M. Baloković, F. Bertoldi, P. Capak, D. A. Frail, G. Hallinan, H. Hao, N. Herrera Ruiz, A. Horesh, O. Ilbert, H. Intema, V. Jelić, H. R. Klöckner, J. Krpan, S. R. Kulkarni, H. McCracken, C. Laigle, E. Middleberg, E. J. Murphy, M. Sargent, N. Z. Scoville, and K. Sheth. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Continuum data and source catalog release. , 602:A1, June 2017.

[28] V. Smolčić, M. Novak, I. Delvecchio, L. Ceraj, M. Bondi, J. Delhaize, S. Marchesi, E. Murphy, E. Schinnerer, E. Vardoulaki, and G. Zamorani. The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Cosmic evolution of radio AGN and implications for radio-mode feedback since z 5. , 602:A6, June 2017.

[29] Vernesa Smolčić, Huib Intema, Bruno Šlaus, Somak Raychaudhury, Mladen Novak, Cathy Horellou, Lucio Chiappetti, Jacinta Delhaize, Mark Birkinshaw, Marco Bondi, Malcolm Bremer, Paolo Ciliegi, Chiara Ferrari, Konstantinos Kolokythas, Chris Lidman, Sean L. McGee, Ray Norris, Marguerite Pierre, Huub Röttgering, Cyril Tasse, and Wendy Williams. The XXL Survey. XXIX. GMRT 610 MHz continuum observations. , 620:A14, December 2018.

[30] C. Tasse, H. J. A. Röttgering, P. N. Best, A. S. Cohen, M. Pierre, and R. Wilman. GMRT observations of the XMM large scale structure survey field. , 471(3):1105–1116, September 2007.

[31] T. Vernstrom, Douglas Scott, J. V. Wall, J. J. Condon, W. D. Cotton, E. B. Fomalont, K. I. Kellermann, N. Miller, and R. A. Perley. Deep 3 GHz number counts from a P(D) fluctuation analysis. , 440(3):2791–2809, May 2014.

[32] Zunli Yuan, Jiancheng Wang, Ming Zhou, and Jirong Mao. A mixture evolution scenario of the agn radio luminosity function. *The Astrophysical Journal*, 820(1):65, 2016.

[33] Bruno Šlaus. (in prep.).