

Sinkrotronsko zračenje galaksija u XXL-North polju

Bruno Šlaus

F-4062

Mentor: Vernesa Smolčić

Fizički odsjek, PMF, Bijenička c. 32, 10 000 Zagreb

19.01.2017.

Uvod

Sinkrotronsko zračenje, koje nastaje interakcijom magnetskoga polja i relativistički ubrzanih nabijenih čestica, dominantan je oblik zračenja galaksija u radio području. Proučavanjem spektara sinkrotronskoga zračenja moguće je dobiti važne informacije vezane uz emiter. Promatramo radio emisiju na frekvenciji 610 MHz unutar XXL-North polja. Koristimo podatke koji dolaze sa GMRT radio teleskopa. Podatke korigiramo eliminacijom efekta kromatske aberacije te odvajamo razlučene od nerazlučenih izvora. Korištenjem mapa u optičkom području izdvajamo nadalje sve izvore koji se sastoje od više komponenti. Računamo spektralne indekse detektiranih izvora pozivajući se na oblik spektra sinkrotronskog zračenja. Pritom koristimo podatke NVSS istraživanja na 1400 MHz. Radi različitih detekcijskih limita dvaju istraživanja javljaju se sistematska odstupanja. Nakon eliminacije ovih odstupanja crtamo histograme spektralnih indeksa. Zaključujemo da su dobiveni rezultati konzistentni s ostalim publikacijama. Uočavamo također različitosti u profilima histograma razlučenih i nerazlučenih izvora. Činjenicu da nerazlučeni izvori u prosjeku posjeduju veći broj ravnih spektara objašnjavamo time da je emisija nerazlučenih izvora u pravilu dominirana zračenjem iz njihove sredine, dok razlučeni izvori zrače iz svojih izbočina.

1 Uvod

Sinkrotronsko zračenje nastaje kada nabijene čestice relativističkih brzina bivaju akcelerirane u magnetskome polju (Carroll & Ostlie, 2007.). Ono je zaslužno za većinu detektiranog kontinuiranog zračenja u radio području. Opaža se da spektar ovakvoga zračenja za optički tanku plazmu poštuje eksponencijalni zakon:

$$S_\nu \propto \nu^{-\alpha} \quad (1)$$

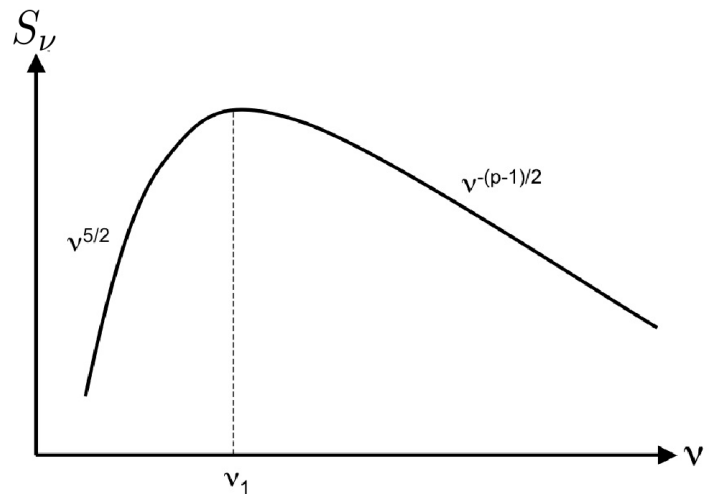
gdje je S_ν gustoća fluksa na određenoj frekvenciji ν (Condon 1992.). EkspONENT α zovemo spektralnim indeksom.

Prethodnu relaciju moguće je objasniti i teorijskim razmatranjima. Pretpostavimo da je energetska distribucija populacije nabijenih čestica zaslužnih za sinkrotronsko zračenje $n(E)$ dana eksponencijalnim zakonom:

$$n(E)dE = kE^{-p}dE \quad (2)$$

gdje je k normalizacijska konstanta, a p eksponent. Pretpostavimo li nadalje da je magnetsko polje uniformno i statičko, moguće je reproducirati relaciju (1) (Beckmann et al. 2012.), te izvesti vezu između spektralnog indeksa α i eksponenta p :

$$\alpha = \frac{p-1}{2} \quad (3)$$



Slika 1: 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: $S_\nu \propto \nu^{-(p-1)/2}$. Frekvencija ν_1 je frekvencija na kojoj plazma prelazi iz optički tanke u optički duboku.¹

Prethodna razmatranja vrijede isključivo za optički tanke objekte. Relacija (1) predviđa spektar koji kontinuirano raste kako se pomičemo prema sve nižim frekvencijama. U stvarnosti spektar ima maksimum nakon kojega gustoća fluksa S_ν ponovno pada. Glavni

¹<http://www.ifa.hawaii.edu/~jpw/classes/ast622.spring2008/handouts/synchrotron.html>

razlog ove pojave je apsorpcija unutar plazme samoga emitera (samo-apsorpcija). Može se pokazati (Beckmann et al. 2012.) da su efekti samo-apsorpcije prisutni isključivo na nižim frekvencijama. U tom području (optičko dubokom) spektar ne ovisi o energetskej raspodjeli nabijenih čestica već poštuje jednostavan zakon:

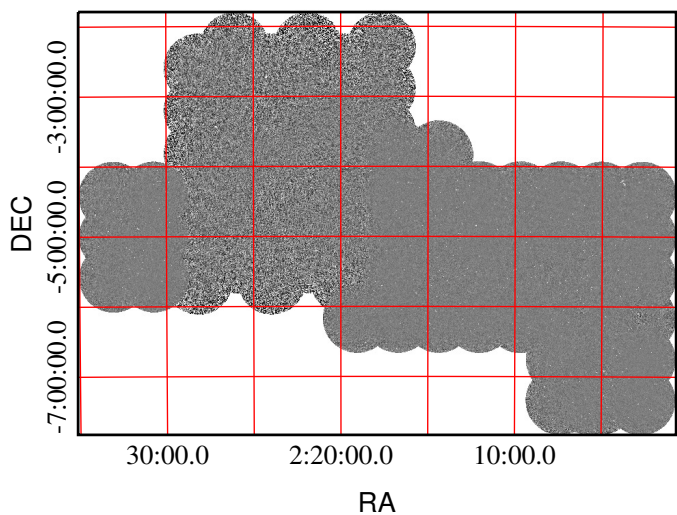
$$S_\nu \propto \nu^{5/2} \quad (4)$$

Prelaskom na više frekvencije plazma postaje optički tanka te spektar ovisi o energetskej raspodjeli nabijenih čestica (relacija 1). Spektar koji uzima u obzir efekte samo-apsorpcije prikazan je na Slici 1. Iz svega navedenog jasno je da mjerenjem spektralnih indeksa dobivamo informacije o pripadnim emiterima. Među objekte koji emitiraju sinkrotronsko zračenje spadaju i aktivne galaktičke jezgre te galaksije u kojima dolazi do stvaranja novih zvijezda.

2 Podaci

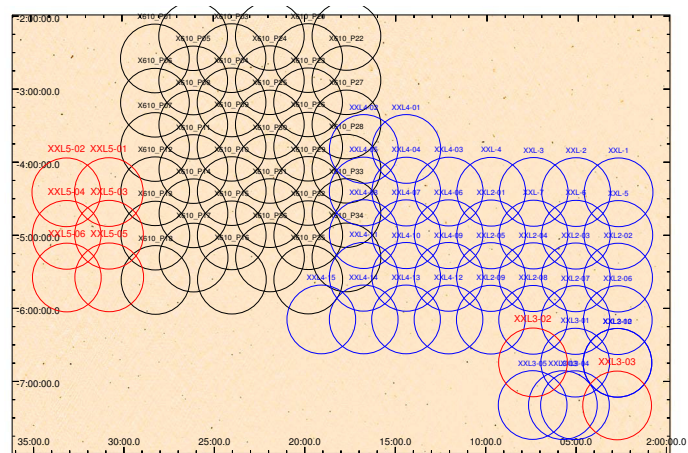
2.1 XXL-North polje

Korišteni podaci dolaze sa GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) radio teleskopa ², smještenog u Indiji (80 km sjeverno od Pune). Mjerenja su vršena na frekvenciji od 610 MHz, unutar XXL-North polja. Prikaz XXL-North polja, zajedno s koordinatama neba, nalazi se na Slici 2.



Slika 2: Prikaz XXL-North polja te koordinata položaja na nebu. RA i DEC odnose se redom na rektascenziju i deklinaciju.

Radi veličine promatranoga polja, teleskop je bio usmjeren na više različitih položaja (engl. pointings). Raspored usmjeravanja teleskopa dan je na Slici 3. Pojedinačna usmjerenja spojena su u jednu sliku (mozaik).



Slika 3: Raspored usmjeravanja GMRT teleskopa unutar XXL-North polja. Svaka kružnica odgovara pojedinačnom usmjeravanju. Crno obojene kružnice odgovaraju XMM-LSS potpodručju. Preuzeto iz Smolčić et al. (u pripremi).

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 pripremi). Radi toga središnji dio ima vidljivo veći šum od ostatka XXL-North polja.

Pri obradi podataka i stvaranju slike korišten je SPAM pipeline (za detalje vidjeti Intema et al. 2016.). Kod ekstrakcije kataloga korišten je PyBDSM program. Odabrani su izvori čija je maksimalna gustoća fluksa 5 puta veća od lokalnoga šuma (5σ), (za detalje oko ekstrakcije kataloga vidjeti Smolčić et al, u pripremi). Rezolucija polja iznosila je 6.5 lučnih sekundi. Šum središnjeg djela polja iznosio je oko $200 \mu\text{Jy}$, a vanjskoga oko $50 \mu\text{Jy}$.

Za potrebe naših istraživanja preuzeli smo gotov katalog ³ te kontinuiranu mapu⁴. Cjelokupan katalog sadržavao je 7640 elemenata. 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.

Radi različite osjetljivosti središnjeg i vanjskog dijela polja, razdvojili smo katalog na dva podskupa, koristeći program Topcat ⁵. Pritom smo slijedili granicu različitoga šuma. Središnji dio polja sadržavao je 819 izvora sa $S/N > 7$, a vanjski dio njih 4615.

2.2 NVSS Podaci

Pored podataka sa GMRT radio teleskopa detektiranih na frekvenciji 610 MHz, koristili smo i podatke NVSS

³Lista izvora i pripadnih podataka

⁴Mapa kontinuiranoga zračenja

⁵<http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>

²<http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/>

(The NRAO VLA Sky Survey) polja na frekvenciji 1400 MHz (Condon et al 1998.). Podaci NVSS polja detektirani su pomoću VLA teleskopa (Very Large Array)⁶, te pokrivaju veliko područje koje obuhvaća i područje XXL-North polja. Razlučivost NVSS polja manja je od GMRT polja, te iznosi 45 lučnih sekundi. Detekcijski limit NVSS polja iznosi 2.5 mJy. Podaci NVSS istraživanja javno su dostupni putem interneta⁷. Za detalje oko ekstrakcije NVSS kataloga vidjeti Condon et al (1998.).

3 Analiza i rezultati

3.1 Kromatska aberacija

Kod opažanja vršenih pomoću prijemnika konačne frekvencijske širine kanala, nužno je uzeti u obzir efekte kromatske aberacije⁸ (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.

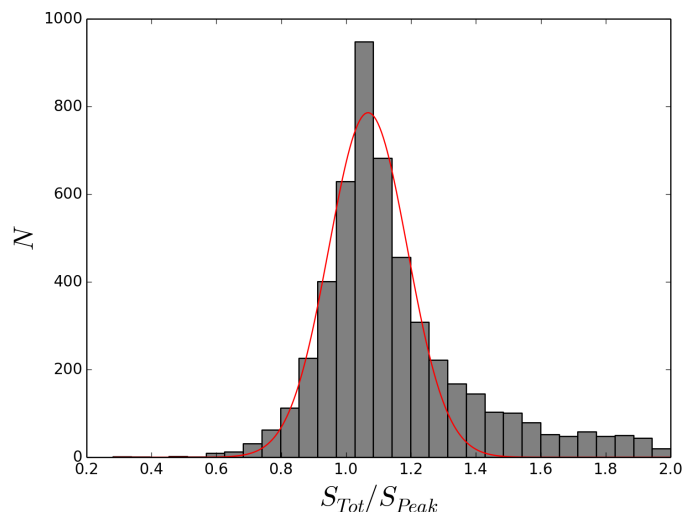
Može se pokazati da je efekt kromatske aberacije proporcionalan udaljenosti pojedinoga izvora od centra opažanja (Bondi et al. 2008.). Dodatne komplikacije javljaju se kada teleskop usmjerimo na više različitih položaja (odnosno kada promatramo mozaik). U tom slučaju u obzir se moraju uzeti sva usmjerenja teleskopa čime efekt kromatske aberacije postaje ovisan o njihovom rasporedu. Radi uniformnog rasporeda usmjerenja teleskopa (Slika 3) 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. 2017.). 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 pripisali smo efektima kromatske aberacije.

Pri određivanju vrha histograma koristili smo prilagodbu Gaussove funkcije (Slika 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.

3.2 Razlučeni i nerazlučeni izvori

Pri daljnjim razmatranjima korisno je razlikovati razlučene od nerazlučenih izvora. Izvore smatramo ra-



Slika 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 Gausiana nalazi se na 1.06, što ukazuje na odstupanje uzrokovano kromatskom aberacijom.

zlučenima kada su veći od rezolucijskog elementa (Smolčić et al. 2017.). 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.). Nacrtali smo graf omjera integriranog i maksimalnoga fluksa kao funkcije omjera signala i šuma (Slika 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.):

$$\frac{S_{Tot}}{S_{Peak}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{(S/N)^\beta}} \quad (5)$$

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 $\beta = 0.9$.

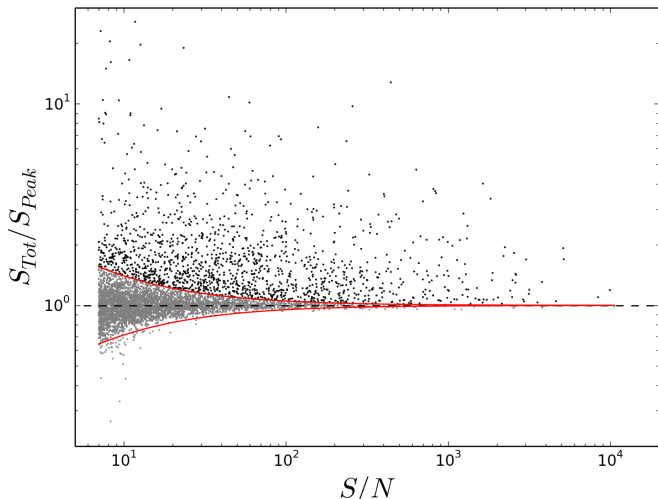
Pretpostavimo li da greške koje potječu od šuma s jednakom vjerojatnošću mogu povećati i smanjiti omjer integriranog i maksimalnoga fluksa (Miller et al. 2013.), zrcaljenjem ove funkcije oko apscise obuhvatili smo sve izvore pod utjecajem šuma. Njih smo smatrali nerazlučenima te im otada nadalje integrirani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

⁶<http://www.vla.nrao.edu/>

⁷<http://www.cv.nrao.edu/nvss/>

⁸http://gmrt.ncra.tifr.res.in/gmrt_hpage/Users/doc/WEBLF/LFRA/node91.html

maksimalnoga fluksa ne može pripisati isključivo šumu.



Slika 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.

Sa grafa se također može uočiti da je korekcija za kromatsku aberaciju uzeta korektno jer ne postoji sistematski odmak podataka od pravca $S_{Tot}/S_{Peak} = 1$.

3.3 Učestalost pogrešnih detekcija

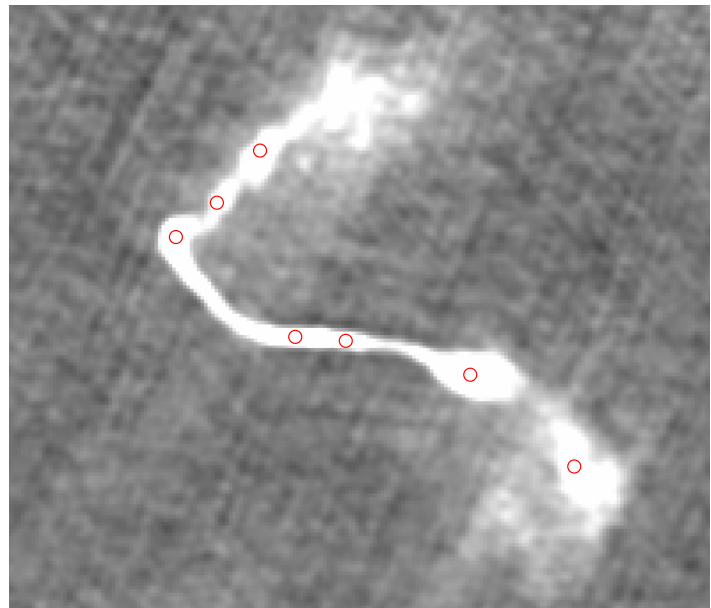
Kako bismo proučili količinu pogrešnih detekcija pri ekstrakciji korištenoga kataloga, koristili smo dodatni katalog koji je nastao iz invertirane mape kontinuiranog zračenja (mape gdje su fluksevi pomnoženi sa -1) uz iste postavke ekstrakcije. Kako u stvarnosti ne postoje izvori s negativnom emisijom, sve izvore detektirane iz inverzne mape pripisujemo posljedicama šuma (Smolčić et al. 2017.). 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.

3.4 Izvori od više komponenti

Pri ekstrakciji kataloga, veliki izvori difuzne strukture mogu greškom biti upisani u katalog kao veći broj elemenata (komponenti) (Smolčić et al. 2017.). Primjer ovakvoga izvora prikazan je na Slici 6. Želimo li da svaki element kataloga odgovara točno jednome radio emiteru, nužno je identificirati ovakve izvore.

Vizualno smo proučili sve izvore korištenoga GMRT kataloga. Pritom smo koristili javno dostupne mape u optičkom području CFHTLS polja (Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey)⁹, te radio mape dobivene pomoću GMRT-a. Uz poznavanje morfologije radio emitera (Miley G., 1980.), vizualnom inspekcijom izvora u radio i optičkom području, procijenili smo koji se izvori sastoje od više komponenti. Izdvojili smo 171 komponenti u središnjem dijelu XXL-North polja te 516 u vanjskom.



Slika 6: Primjer velikoga izvora XXL-North polja, snimljenoga na frekvenciji 610 MHz, kojemu odgovara 7 elemenata kataloga. Crvenim kružićima označene su pojedine komponente izvora. Preuzeto iz GMRT kontinuirane mape.

3.5 Računanje spektralnih indeksa

Pri računu spektralnih indeksa koristili smo podatke na dvjema različitim frekvencijama: GMRT podatke na 610 MHz te NVSS podatke na 1400 MHz. U slučaju kada detektirani izvor predstavlja zasebnu populaciju elektrona, njegov spektar zračenja dobro je opisan modelom sinkrotronskog zračenja diskutiranim u uvodu (Slika 1). 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 daljnjih razmatranja 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) dobi-

⁹<http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHLS/>

vamo:

$$\alpha = -\frac{\log S_2 - \log S_1}{\log \nu_2 - \log \nu_1} \quad (6)$$

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

3.6 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 (radius povezivanja) uspoređivali smo broj podudaranja GMRT polja s nasumičnim i pravim NVSS poljem (Slika 7).

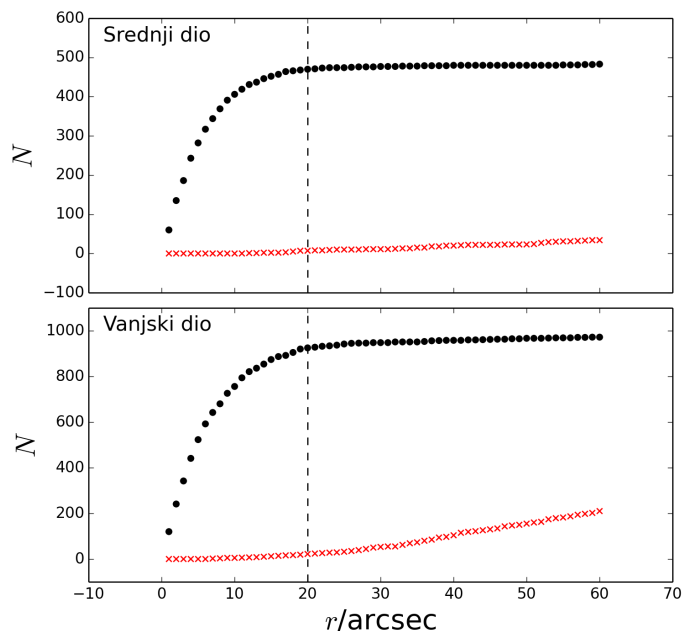
Povezivanje izvora GMRT polja s poljem nasumičnih izvora simulira neželjene efekte slučajnoga podudaranja. Radius povezivanja birali smo pazeći da ovi efekti ne igraju veliku ulogu, istovremeno pokušavajući dobiti što veći broj podudaranja s pravim NVSS poljem. Odabrali smo radius od 20 lučnih sekundi, 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.

3.7 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 po definiciji moraju biti detektirani unutar oba istraživanja (GMRT i NVSS). Činjenica da NVSS ima viši detekcijski limit (2.5 mJy) od GMRT polja, 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 8). Jasno je vidljivo da radi detekcijskog limita NVSS polja, u području niskih flukseva, biva odrezan nezanemariv udio spektralnih indeksa.



Slika 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).

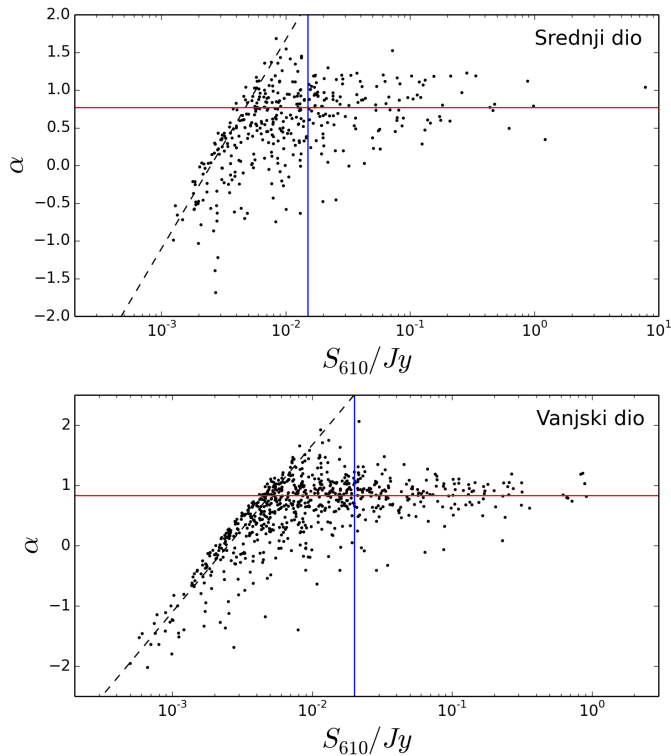
Srednju vrijednost spektralnoga indeksa možemo izračunati zadržavajući se u području flukseva gdje sistematska odstupanja nisu izražena. Za središnji dio XXL-North polja to je područje gdje integrirani fluks GMRT polja iznosi više od 15 mJy. Srednja vrijednost spektralnoga indeksa tada iznosi $\alpha = 0.77$. Za vanjski dio XXL-North polja to je područje fluksa većega od 20 mJy, pri čemu srednji spektralni indeks iznosi $\alpha = 0.83$.

Ovakve vrijednosti spektralnoga 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 et al. 2008.).

3.8 Eliminacija sistematskih odstupanja i crtanje histograma spektralnih indeksa

Odstupanja radi detekcijskoga limita moguće je uočiti i usporedbom integriranih flukseva dvaju istraživanja (Slika 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 (6), 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 4.74 mJy za središnji dio XXL-North polja te 5.00 mJy za vanjski.



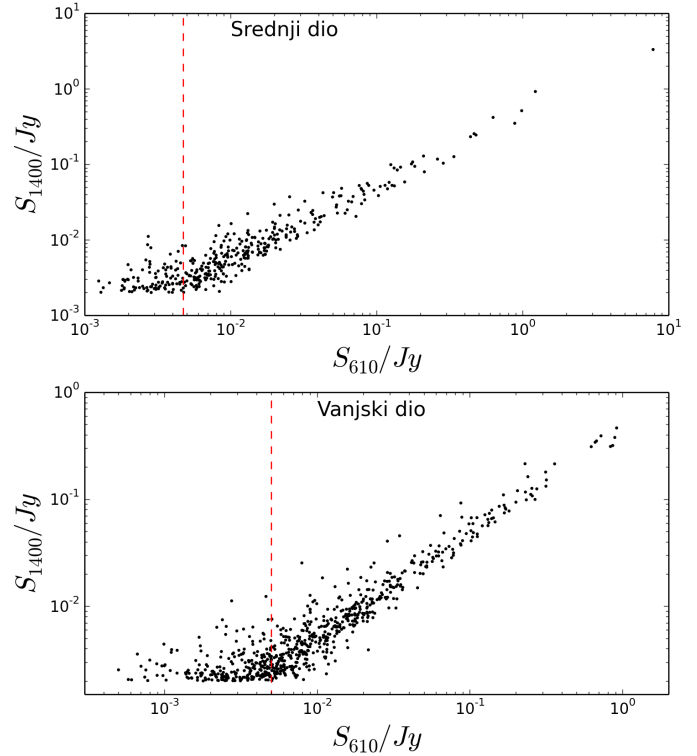
Slika 8: Grafovi spektralnoga indeksa α u ovisnosti o integriranome fluksu GMRT polja S_{610} , za središnji i vanjski dio XXL-North polja. Kosa crtkana crna linija prikazuje detekcijski limit NVSS polja (2.5 mJy). Jasno je uočljivo da, radi detekcijskog limita, točke u gornjem lijevom djelu grafa bivaju 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.

Ovime efektivno odvajamo dio točaka u području slabih flukseva koje odstupaju od očekivanoga pravca. Te točke eliminirali smo iz daljnjih razmatranja.

Nakon izdvajanja izvora od više komponenti, te točaka koje stvaraju sistematska odstupanja vezana uz detekcijski limit, preostala su 294 izvora u središnjem dijelu, te 490 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 10.

Uočili smo da dobiveni histogrami imaju vrh u području pozitivnih spektralnih indeksa, iz čega se dade zaključiti da spektri većine promatranih izvora poštuju eksponencijalni zakon relacije (1). Srednje vrijednosti spektralnih indeksa (prikazane na Slici 10) konzistentne su s očekivanjima iz literature (Kimball et al. 2008., Tasse et al. 2007.).

Histogrami za razlučene i nerazlučene izvore pokazuju



Slika 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 (vidjeti tekst za detalje).

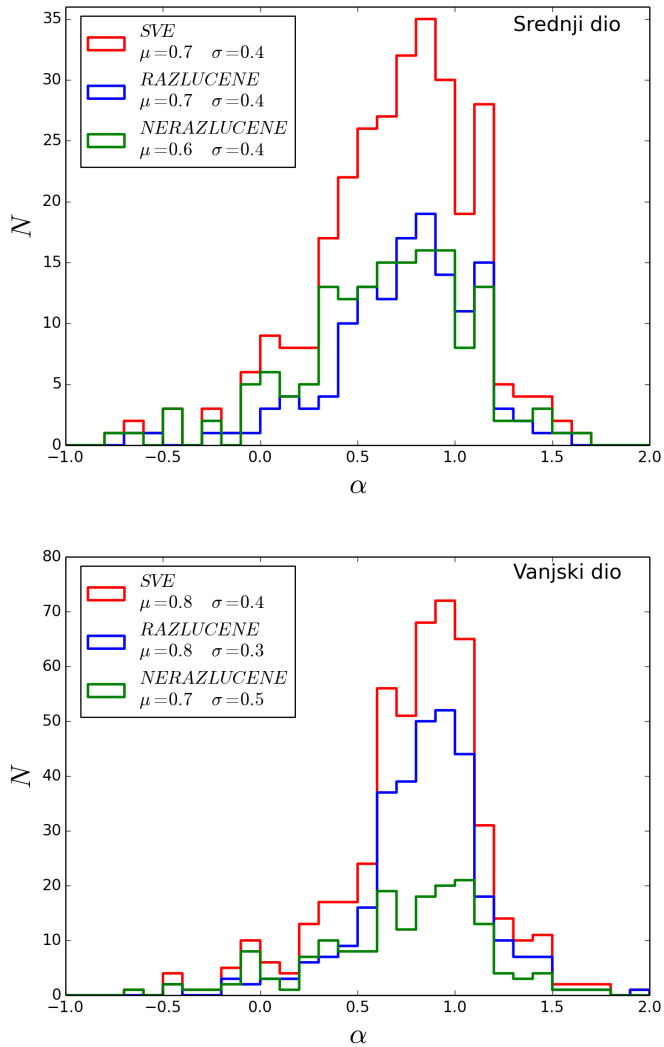
određene različitosti. Nerazlučeni izvori (za oba dijela XXL-North polja) u prosjeku češće posjeduju ravan spektar ($\alpha < 0.5$). Nasuprot tome, razlučeni izvori imaju prosječno strmije spektre. Ovaj trend također je u skladu s drugim istraživanjima (Kimball et al. 2008., Tasse et al. 2007.).

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., podneseno u A&A). 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 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 spektra¹⁰.

Prošireni izvori zrače dominantno iz optički tankih izbočina (engl. lobe). Spektri ovakvih izvora u prosjeku

¹⁰https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Cambridge/Cambridge1_3_1.html



Slika 10: *Histogrami spektralnih indeksa za srednji i vanjski dio XXL-North polja. Posebno su prikazane vrijednosti za razlučene (plavo) i nerazlučene (zeleno) izvore. U legendi su prikazane izračunate srednje vrijednosti μ i standardne devijacije σ .*

su strmiji. Radi razlika u veličini, kompaktni izvori većinom su nerazlučeni, dok su prošireni većinom razlučeni.

4 Zaključak

Proučavali smo zračenje unutar XXL-North polja detektirano pomoću GMRT radio teleskopa. Detekcije su vršene na frekvenciji od 610 MHz. Emisija na ovim frekvencijama posljedica je sinkrotronskoga zračenja.

Eliminirali smo efekte kromatske aberacije te odvojili razlučene od nerazlučenih izvora. Pomoću kataloga nastaloga iz invertirane mape, izmjerili smo količinu pogrešnih detekcija. Zaključili smo da pogrešne detekcije ne igraju veliku ulogu u korištenim mjerenjima. Koristeći mape u optičkom području odredili smo izvore koji se sastoje od više komponenti, te ih izbacili iz daljnjih

razmatranja.

Najviše pažnje posvetili smo računanju spektralnih indeksa promatranih izvora. Pritom smo koristili podatke NVSS istraživanja na 1400 MHz. Podudarajuće izvore unutar dvaju istraživanja odabrali smo na osnovi njihove međusobne udaljenosti. Kako NVSS ima viši detekcijski limit od GMRT polja, u izračunima spektralnih indeksa javila su se sistematska odstupanja. Veliku pažnju posvetili smo eliminaciji ovih odstupanja.

Konačne izračune spektralnih indeksa prezentirali smo u obliku histograma. Napravili smo distinkciju između razlučenih i nerazlučenih izvora. Uočili smo da nerazlučeni izvori posjeduju veći broj ravnih spektara, dok su spektri razlučenih izvora strmiji. Ovakav trend objasnili smo pozivanjem na saznanja o aktivnim galaktičkim jezgrama. Spektri se razlikuju jer nerazlučeni izvori u pravilu zrače dominantno iz svoje sredine, dok je emisija razlučenih izvora dominirana zračenjem iz izbočina.

5 Zahvale

Zahvaljujem se profesorici Smolčić i njenom timu na uloženom vremenu i pomoći pri izradi ovoga seminara.

6 Literatura

- [1] Beckmann V., Shrader C., Active Galactic Nuclei, WILEY-VCH, Weinheim, 2012.
- [2] Bondi M., Ciliegi P., Schinnerer E., 2008., ApJ, 681, 1129
- [3] Bondi M., Ciliegi P., Zamorani G., 2003., A&A, 403, 857
- [4] Carrol B.W., Ostlie D.A., An Introduction to Modern Astrophysics, Second edition, Pearson Education, 2007.
- [5] Condon J.J., 1992., ARAA, 30, 575
- [6] Condon J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W., 1998., AJ, 115, 1693
- [7] Intema H. T., Jagannathan P., Mooley K. P., 2016., prihvaćeno u A&A
- [8] Kimball A. E., Ivezić Ž., 2008., ApJ, 136, 684
- [9] Miley G., 1980., ARAA, 18, 165
- [10] Miller N. A., Bonzini M., Fomalont E. B., 2013., ApJS, 205, 13
- [11] Prandoni I., Gregorini L., Parma P., 2000., A&A, 146, 31
- [12] Smolčić V., Novak M., Bondi M., 2017., prihvaćeno u A&A
- [13] Tasse C., Röttgering H.J.A., Best P.N., et al. 2007. A&A, 471, 1105