

# Polarizirano zračenje radio galaksija na niskim radio frekvencijama

Dario Barišić  
Mentor: dr. sc. Vibor Jelić, IRB

20. siječnja 2018.

## Sažetak

U ovom radu bavimo se potragom za radio galaksijama koristeći podatke o polariziranom zračenju na 150 MHz prikupljene LOFAR teleskopom u području centriranom na sjajni radio izvor 3C196 (RA =  $8^h 13^m 36^s$ , DEC =  $+48^\circ 13' 03''$ ). Od ukupno pronađenih 17 izvora iz LOFAR-ovih mjerenja njih 16 postoji u već izrađenim katalozima na drugim frekvencijama što nam je omogućilo da usporedimo intenzitete za različite frekvencije i izračunamo spektralne indekse. Dobiveni rezultati potvrđuju da je mehanizam zračenja sinkrotronsko zračenje radio galaksija. Izračunati postotci polarizacije i Faradayeve dubine pronađenih izvora su također u skladu s predviđenima, ili već postojećima.

## 1 Uvod

### 1.1 Radio izvori

Radio zračenje je jedno od područja elektromagnetskog zračenja koje je moguće direktno promatrati sa Zemlje. Razlog tome je propusnost atmosfere u području frekvencija od oko 15 MHz do 1.5 THz. Nepropusnost na nižim frekvencijama posljedica je prisutnosti slobodnih elektrona u Zemljinoj ionosferi. Tek će zračenje frekvencija dovoljno većih od frekvencija titranja plazme relativno neometano proći kroz ionosferu. Za dovoljno visoke frekvencije nepropusnost atmosfere je posljedica apsorpcije zračenja, ponajprije zbog vodene pare i molekula kisika, te drugih visoko zastupljenih spojeva.

Prema načinu nastanka zračenja, radio izvori dijele se na termalne i netermalne. Pri termalnim procesima prvenstveno mislimo na zračenje crnog tijela. Intenzitet zračenja takvog tijela u slučaju lokalne termodinamičke ravnoteže je  $I_\nu$ :

$$I_\nu = B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}), \quad (1)$$

gdje je  $B_\nu$  Planckova funkcija zračenja crnog tijela, a  $\tau_\nu$  parametar koji nazivamo optička dubina izvora koji može ovisiti i o valnoj duljini zračenja. U dugovalnoj aproksimaciji, slijedi  $I_\nu = B_\nu(T)$ , i u tom slučaju intenzitet zračenja u radio području u pravilu linearno ovisi o kvadratu frekvencije (Rayleigh-Jeansova aproksimacija). Primjer izvora koji zrači kao crno tijelo je Mjesec. Ovakvi izvori nisu polarizirani. Primjer termalnog radio izvora koji može emitirati polarizirano radio zračenje je prašina u molekularnim oblacima. Polarizacija je posljedica uređenja električno nabijenih asimetričnih čestica prašine pod utjecajem magnetskog polja.

Općenito su najjači izvori polariziranog radio zračenja oni koji zrače netermalnim procesima. Kao dominantan proces se ističe sinkrotronsko zračenje ili zakočno zračenje.

U ovom radu proučavat ćemo polarizirano sinkrotronsko zračenje radio galaksija, koje je najčešće povezano s procesima akrecije materije na supermasivne crne rupe u središtima galaksija, tzv. aktivnim galaktičkim jezgrama. Pri akreciji veći dio potencijalne i kinetičke energije je pretvoreno u zračenje, te se mogu stvoriti relativistički mlazovi materije duž osi rotacije. Prisutnost relativno jakih magnetskih polja i relativističkih čestica, objašnjava prisutnost sinkrotronskog zračenja, koje možemo istraživati u radio području elektromagnetskog spektra. U našoj analizi koristit ćemo opažanja radio galaksija u 3C196 polju, promatranih na niskim radio frekvencijama pomoću radio teleskopa LOFAR (eng. Low Frequency Array).

### 1.2 Sinkrotronsko zračenje

Sinkrotronsko zračenje je zračenje nabijene čestice koja se giba u homogenom magnetskom polju. Gibanje je određeno jednačbom:

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = \frac{e}{c}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2)$$

Bez prisutstva električnog polja, energija, a time i iznos brzine čestice su sačuvani. Lako se pokaže da je putanja čestice spirala, tj. superpozicija kružnog gibanja brzinom okomitom na smjer magnetskog polja,  $|\mathbf{v}_\perp|$ , i pravocrtnog gibanja uzduž smjera magnetskog polja brzinom  $|\mathbf{v}_\parallel|$ .

Frekvencija kruženja iznosi:

$$\omega_B = \frac{eB}{\gamma mc}, \quad (3)$$

što povlači da čestica ima i akceleraciju :

$$a_{\perp} = \omega_B v_{\perp}. \quad (4)$$

Kako bi uspjeli izvući neke zaključke o sinkrotronskom zračenju možemo početi s izrazima za Liènard-Wiechertov potencijal:

$$\left( \frac{\phi}{\mathbf{A}} \right) = \frac{q}{R - \mathbf{R} \cdot \mathbf{v}/c} \left( \frac{1}{v/c} \right), \quad (5)$$

koji se evaluiraju u "retardiranom" vremenu  $\tau$ , za koje vrijedi:

$$\tau + R(\tau)/c = t, \quad \mathbf{R} = \mathbf{x} - \mathbf{r}(\tau), \quad (6)$$

gdje su  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{x}$  i  $\mathbf{R}$  redom radijvektori položaja čestice, promatrača, te spojnica od čestice do promatrača. Iz potencijala slijede izrazi za električno i magnetsko polje:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{(R - \mathbf{R} \cdot \mathbf{v}/c)^3} \left\{ \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \left( \mathbf{R} - R \frac{\mathbf{v}}{c} \right) + \frac{\mathbf{R}}{c^2} \times \left[ \left( \mathbf{R} - R \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \times \dot{\mathbf{v}} \right] \right\}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{R}}{R} \times \mathbf{E}. \quad (8)$$

Prvi član u rješenju opada kao  $1/R^2$  i on odgovara Coulombovom članu, što je lako potvrditi ako uvrstimo  $v = 0$ . Nama je od važnosti drugi član koji opada kao  $1/R$ . Daleko od izvora možemo uvesti aproksimaciju  $\mathbf{R} = \hat{\mathbf{k}}x$ , gdje  $x$  predstavlja srednju udaljenost od izvora. Tada radijacijski član možemo zapisati kao:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{c^2 x \kappa^3} \left\{ \hat{\mathbf{k}} \times \left[ \left( \hat{\mathbf{k}} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \times \dot{\mathbf{v}} \right] \right\}, \quad (9)$$

gdje smo koristili skraćenicu:

$$\kappa = 1 - \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{v}}{R c}. \quad (10)$$

Emitirana snaga po elementu prostornog kuta jednaka je:

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2 |\mathbf{g}|^2}{4\pi c^3}, \quad (11)$$

$$g^2 = \frac{1}{\kappa^4} |\dot{\mathbf{v}}|^2 + \frac{2}{\kappa^5} (\hat{\mathbf{k}} \cdot \dot{\mathbf{v}}) (\dot{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{v}/c) - \frac{1}{\kappa^6} (1 - v^2/c^2) (\hat{\mathbf{k}} \cdot \dot{\mathbf{v}})^2. \quad (12)$$

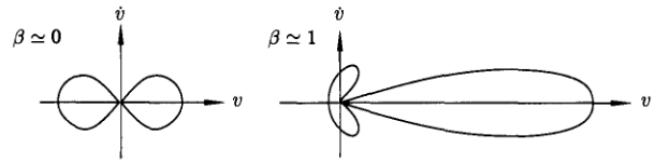
Ako odaberemo slučaj kada je akceleracija čestice okomita na njezinu brzinu i postavimo koordinatni sustav tako da brzina čestice leži na  $z$ -osi, onda smjer  $\hat{\mathbf{k}}$  ima koordinate  $(x, y, z)$  jednake  $(\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$  i izraz (11) poprima vrijednost :

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2 |\dot{\mathbf{v}}|^2}{4\pi c^3} \left[ \frac{1}{(1 - \beta \cos \theta)^4} - \frac{(1 - \beta^2) \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)^6} \right]. \quad (13)$$

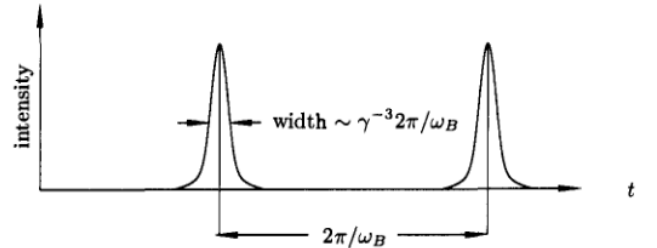
Važno je opet naglasiti da su izrazi (11) i (13) evaluirani u retardiranom vremenu. Ako želimo izračunati količinu energije izračenu u nekom konačnom vremenskom intervalu ubrzavanja od  $\tau = T_1$  do  $\tau = T_2$  u sustavu čestice, koristimo :

$$W = \int_{t=T_1+R(T_1)/c}^{t=T_2+R(T_2)/c} \frac{dP}{d\Omega} dt = \int_{\tau=T_1}^{\tau=T_2} \frac{dP}{d\Omega} \frac{dt}{d\tau} d\tau. \quad (14)$$

Ovdje se pojavljuje dodatan faktor  $dt/d\tau = 1 - \beta \cos \theta$ . U svakom slučaju angularna distribucija snage za relativističke elektrone ( $\beta \approx 1$ ) se koncentrira u mali kut  $\Delta\theta$  oko smjera gibanja nabijene čestice. Konkretnije, iz jednadžbe (13) razvojem funkcija  $\cos \theta$  i  $\sin \theta$  u red može se pokazati da vrijedi  $\Delta\theta \sim \gamma^{-1}$ . Očito promatrač može zabilježiti zračenje samo kada se nalazi unutar toga kuta. Dakle, zračenje do promatrača dolazi u pulsevima, vremenski razmaknutima periodom kruženja nabijene čestice  $2\pi/\omega_B$ , a pulsevi imaju širinu  $\Delta t \sim \gamma^{-3} 2\pi/\omega_B$ . Dodatan faktor od  $\gamma^{-2}$  potječe od toga što se vremenski razmak za promatrača  $\Delta t$ , razlikuje od onog za česticu  $\Delta\tau$ , za faktor  $(1 - \beta \cos \theta)^{-1} \sim \gamma^{-2}$ .



Slika 1: Angularna distribucija zračenja u  $x$ - $z$  ravnini u slučaju kada je akceleracija čestice okomita na njezinu brzinu za  $\beta \ll 1$  (lijevo) i za  $\beta \approx 1$  (desno). (Preuzeto iz [1])



Slika 2: Vremenski uzorak primljenih pulseva sinkrotronskog zračenja. (Preuzeto iz [1])

Frekventna ovisnost zračenja jednog relativističkog elektrona dobije se Fourierovom analizom pulsa. Ovdje ćemo samo napisati rezultat:

$$P(\nu) = \sqrt{3} \frac{e^3 B \sin \alpha}{m c^2} \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\nu/\nu_c}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta, \quad (15)$$

gdje je  $\alpha$  kut između putanje čestice i magnetskog polja,  $K_{5/3}$  modificirana Besselova funkcija reda  $5/3$ , a  $\nu_c =$

$3/2\gamma^2\nu_B \sin \alpha$  kritična frekvencija. Općenito je polarizacija sinkrotronskog zračenja u nekom trenutku eliptična, ali kako kut elipse rotira zajedno s česticom, vremenski usrednjena polarizacija je zapravo linearna. Postotak linearne polarizacije iznosi:

$$p = \frac{G(x)}{F(x)}, \quad (16)$$

gdje je  $F(x) = x \int_x^\infty K_{5/3}(t)dt$ ,  $G(x) = xK_{2/3}$  i  $x = \nu/\nu_c$ . Postotak polarizacije može poprimiti vrijednosti od 0.5 do 1.

Sva dosadašnja razmatranja su se odnosila na zračenje jednog relativističkog elektrona. Ako imamo neki ansambl relativističkih elektrona, emisivnost iznosi:

$$\epsilon(\nu) = \int P(\nu, E)N(E)dE. \quad (17)$$

Iz mjerenja pokazalo se da se energijska distribucija elektrona može modelirati kao:

$$N(E)dE = KE^{-\delta}dE, \quad E_1 < E < E_2. \quad (18)$$

Ukratko ćemo istaknuti samo najbitnije rezultate koji slijede. Detaljnija analiza može se naći u [2].

Emisivnost ima oblik  $\epsilon \sim \nu^{-n}$ , uz  $n = 1/2(\delta - 1)$ . Parametar  $n$  se često naziva spektralnim indeksom. U slučaju homogenog magnetskog polja intenzitet iznosi:

$$I(\nu) = 0.933a(n)KLB^{n+1} \left( \frac{6.26 \cdot 10^9}{\nu/GHz} \right)^n Jyrad^{-2}, \quad (19)$$

$$a(n) = 2^{n-1} \frac{n+5/3}{n+1} \Gamma\left(\frac{3n+1}{6}\right) \Gamma\left(\frac{3n+5}{6}\right),$$

a polarizacija je i dalje linearna s postotkom od  $p = (n+1)/(n+5/3)$ .

### 1.3 Faradayeva rotacija

Prilikom prolaska polariziranog elektromagnetskog vala kroz međuzvezdanu materiju u prisutstvu magnetskog polja dolazi do zakretanja smjera njegove polarizacije. Kut zakreta proporcionalan je:

$$\Delta\Phi \sim \left(\frac{\lambda}{m}\right)^2 \int_0^{L/pc} \left(\frac{B_{\parallel}}{Gauss}\right) \left(\frac{N_e}{cm^{-3}}\right) d\left(\frac{z}{pc}\right), \quad (20)$$

gdje je  $B_{\parallel}$  komponenta magnetskog polja paralelna smjeru propagacije vala,  $N_e$  gustoća slobodnih elektrona u međuzvezdanoj materiji, a  $L$  prevaljeni put. Dobro definirana ovisnost kuta zakreta o frekvenciji omogućuje definiciju Faradayeve dubine, kao konstante proporcionalnosti:

$$RM = 8.1 \cdot 10^5 \int_0^{L/pc} \left(\frac{B_{\parallel}}{Gauss}\right) \left(\frac{N_e}{cm^{-3}}\right) d\left(\frac{z}{pc}\right). \quad (21)$$

Promatrani kut polarizacije jednak je  $\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi$ , gdje je  $\Phi_0$  intrinzični emitirani kut polarizacije sinkrotronskog zračenja. Mjerenjem razlike u kutovima zakreta za različite frekvencije možemo izračunati Faradayevu dubinu izvora.

## 2 Podaci

### 2.1 LOFAR 3C196 polje

Pri detekciji polariziranog radio zračenja na raspolaganju imamo LOFAR-ova mjerenja 3C196 polja [3]. LOFAR za mjerenja koristi mrežu od preko 100 000 radio antena, organiziranih u stanice, te raspoređenih po cijeloj Nizozemskoj i većem dijelu Europe. 3C196 polje je centrirano oko sjajnog radio izvora 3C196 s koordinatama  $RA = 8^h13^m36^s$  i  $DEC = +48^\circ13'03''$ . Za analizu koristimo gotove RM kocke, tj. slike ukupnog polariziranog zračenja dane na različitim Faradayevim dubinama. Također, imamo podatke o ukupnom zračenju za isto područje. Prva RM kocka ima razlučivost od 3 lučne minute i pokriva Faradayeve dubine od  $-25$  do  $+25 rad/m^2$ , a druga ima razlučivost od jedne lučne minute i pokriva Faradayeve dubine od  $-10 rad/m^2$  do  $+10 rad/m^2$ . Rezolucija RM kocki po Faradayevoj dubini je  $1 rad/m^2$ . Razlučivost slike ukupnog zračenja je 45 lučnih sekundi.

### 2.2 Katalozi

Dobivene rezultate iz LOFAR-ovih mjerenja usporedit ćemo s već postojećim katalozima radio izvora promatranih na drugim radio frekvencijama. U tu svrhu istražili smo podatke iz NVSS kataloga na 1.4 GHz [4], VLSS kataloga na 74 MHz [5], WENSS kataloga na 325 MHz [6], i FIRST kataloga na 1.4 GHz [7]. Za svaki radio izvor u katalozima dani su podaci kao što su koordinate, ukupni i polarizirani intenzitet zračenja, veličina izvora (mala i velika os elipse kojom je izvor opisan), te za određene izvore Faradayeva dubina izmjerena na 1.4 GHz.

## 3 Analiza i rezultati

### 3.1 Opažanja i kalibracija

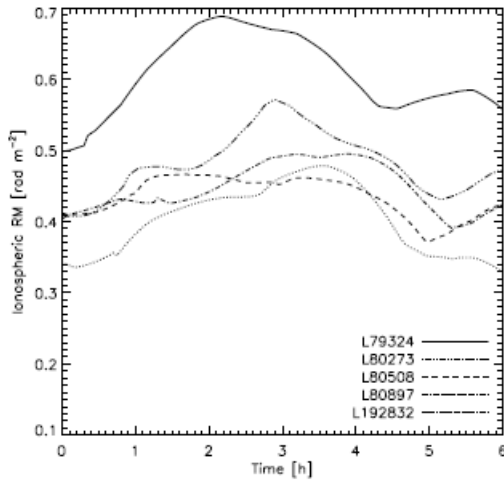
Podaci koje smo koristili u daljnjoj analizi bazirani su na mjerenju L80508 obavljenom 16.12.2012. godine pomoću LOFAR-ovih HBA antena (eng. High Band Antenna) smještenih većinom u Nizozemskoj. Podaci su prikupljeni u području između 115 MHz i 189 MHz. Frekvencijsko područje mjerenja podijeljeno je u 380 pojaseva s širinom od 195.3125 kHz. Svaki takav pojas je nadalje podijeljen u 64 kanala. Integracijsko vrijeme je 2s, dok je ukupno vrijeme promatranja bilo 6h.

Prvi dio obrade podataka uključuje tzv. "data flagging", što znači da ne uzimamo u obzir dio podataka koji je kontaminiran interferencijama povezanim s zemaljskim radio izvorima. Radio frekventna interfencija je osobito zastupljena na frekvencijama većim od 177 MHz, dok u prosjeku iznosi samo

3%. Nakon toga se podaci usrednjuju po kanalima za svaki od 380 pojasa posebno. Sljedeći korak je kalibracija. Prvo je napravljena pozicijski neovisna kalibracija posebno za svaki pojas prema 3C196 izvoru. Poznati intenzitet 3C196 izvora omogućuje ispravljanje grešaka fekventne ovisnosti intenziteta i greške u fazi zbog ionosfere. Nakon toga primjenjena je pozicijski ovisna kalibracija pomoću 3C196 izvora i dodatnih 8 svijetlih izvora u blizini. Time se ispravljaju vremenske varijacije u polariziranom intenzitetu i vremenski pomaci u ionosferi koji ovise o poziciji.

### 3.2 Korekcija za ionosferu

Prije izrade slika potrebno je uračunati i pomak u Faradayevoj dubini zbog slobodnih elektrona u ionosferi. Posebno zbog činjenice da postoje osjetne varijacije gustoće slobodnih elektrona na vremenskoj skali manjoj od ukupnog vremena prikupljanja podataka. Postoje modeli koji predviđaju varijacije u Faradayevoj dubini, a bazirani su na mjerenjima pomoću GPS sustava satelita. Na Slici 3. prikazane su varijacije u Faradayevoj dubini tijekom više mjerenja za različite noći. Naše mjerenje L80508 prikazano je iscrtkanom linijom, te pokazuje relativno male varijacije tijekom noći koje mogu rezultirati pomakom Faraday spektra do 1 rad/m<sup>2</sup>.



Slika 3: Vremenske varijacije u Faradayevoj dubini za ionosferu tijekom više različitih mjerenja. (Preuzeto iz [3].)

### 3.3 Izrada slika u svim Stokes parametrima i RM sinteza

Nakon kalibracije i korekcije za ionosferu slijedi izrada slika za svaki pojas u svim Stokes parametrima (I,Q,U,V). Ovisno o korištenim podacima danim za različite razmake između antena (eng. baseline) dobivamo slike različitih rezolucija. Ako koristimo mjerenja antena na međusobno malom razmaku dobit ćemo visoko osjetljive slike male kutne rezolucije, no ako uključimo i mjerenja udaljenih antena dobit

ćemo slike slabije osjetljivosti, ali veće kutne rezolucije. Za proučavanje linearne polarizacije uzimamo slike od Q i U parametara od oko 310 frekvencijskih pojaseva koji imaju približno jednake amplitude šuma, i primjenom RM sinteze dobivamo RM kocke. Princip dobivanja RM kocki zasniva se na jednadžbi :

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\Phi) e^{2i\Phi\lambda^2} d\Phi, \quad (22)$$

gdje je  $P(\lambda^2)$  kompleksni ukupni polarizirani intenzitet na valnoj duljini  $\lambda$ , a  $F(\Phi)$  kompleksni polarizirani intenzitet po jedinici Faradayeve dubine. Eksponencijalna funkcija uvodi rotaciju koja je proporcionalna Faradayevoj dubini i kvadratu valne duljine što je i u skladu s (20) i (21). Kompleksni ukupni polarizirani intenzitet je veličina koju mjerimo, konkretnije ona je jednaka :

$$P = Q + iU. \quad (23)$$

Veličina koju želimo dobiti je  $F(\Phi)$  jer upravo ona daje raspodjelu intenziteta po Faradayevim dubinama. Dakle, suočavamo se s problemom invertiranja jednadžbe (22). Iako jednadžba (22) ima oblik Fourierovog transformata, ne možemo primijeniti inverz Fourierovog transformata jer ne možemo znati vrijednosti polarizacije za  $\lambda < 0$ , niti imamo vrijednosti polarizacije za sve pozitivne valne duljine. No, uvođenjem težinske funkcije  $W(\lambda^2)$  možemo dobiti približan inverz.  $W(\lambda^2)$  je različita nuli u svim točkama za koje postoje mjerenja, za sve ostale točke iščezava. Detaljan izvod i rasprava sadržani su u [8]. Ovdje ćemo samo navesti krajnji rezultat. Aproximativna raspodjela polariziranog intenziteta po Faradayevim dubinama jednaka je :

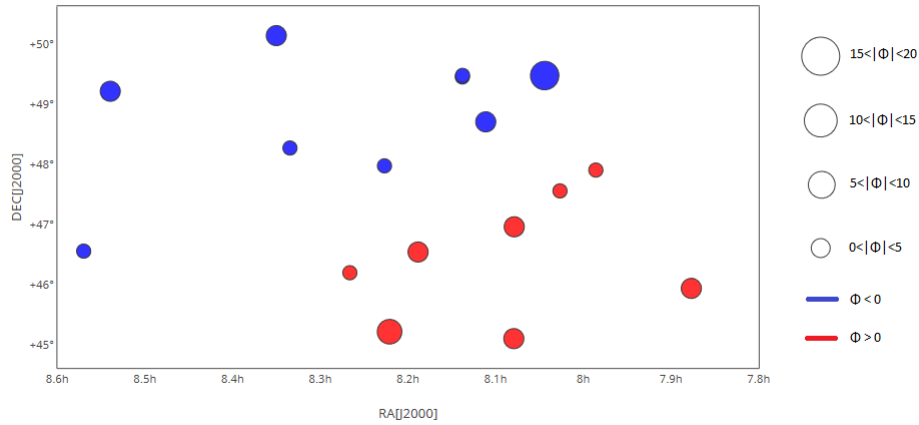
$$\tilde{F}(\Phi) = K \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}(\lambda^2) e^{-2i\Phi\lambda^2} d\lambda^2, \quad (24)$$

gdje je  $\tilde{P}(\lambda^2) = W(\lambda^2)P(\lambda^2)$  mjerena polarizacija, a konstanta K jednaka :

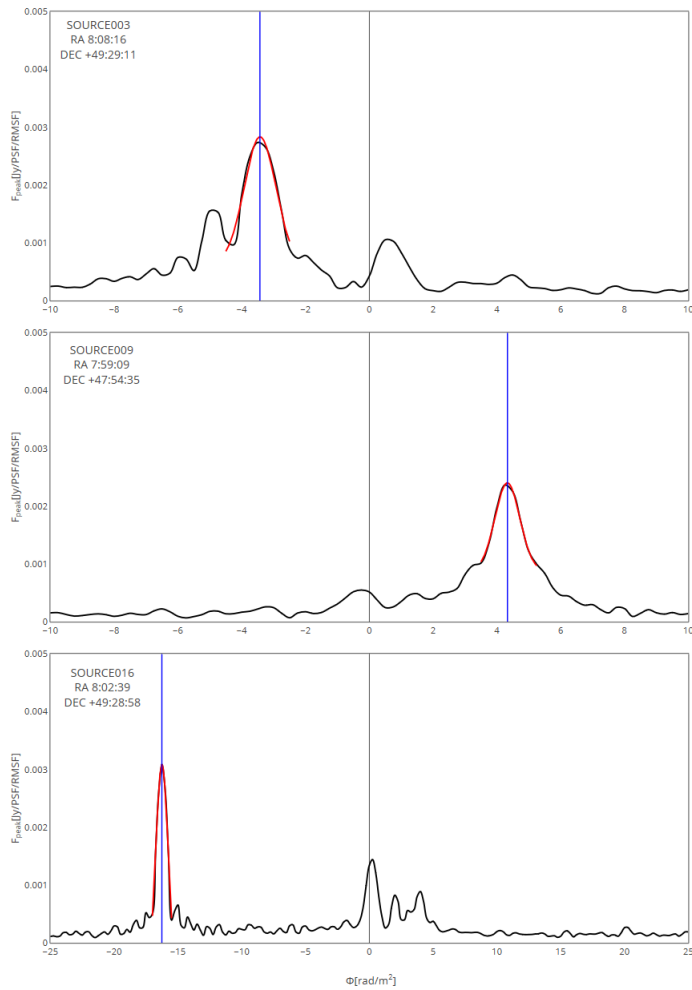
$$K = \left( \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) d\lambda^2 \right)^{-1}. \quad (25)$$

### 3.4 Detekcija radio galaksija u polarizaciji, te izračun njihovog postotka polarizacije

Kako bi pojednostavili potragu za polariziranim radio izvorima, podatke o intenzitetu zračenja vizualizirali smo pomoću programa SAOImage DS9 [9] iz kojega smo dobili i ovisnost intenziteta polariziranog zračenja o Faradayevoj dubini za proizvoljnu regiju. Vrhovi u intenzitetu potencijalna su naznaka radio izvora. Uzimali smo u obzir samo one vrhove čiji je intenzitet barem 4 puta veći od prosječnog intenziteta, tj. instrumentalnog šuma, po svim Faradayevim

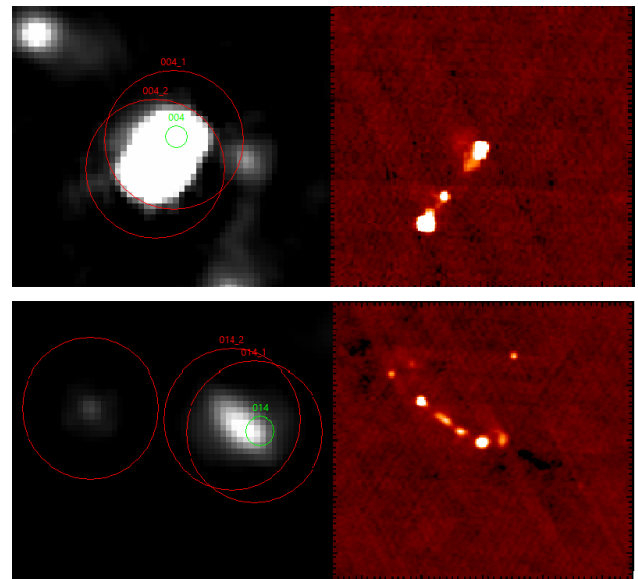


Slika 4: Raspodjela radio izvora po koordinatama i Faradayevim dubinama : koordinate središta kruga odgovaraju koordinatama radio izvora, veličina kruga povezana je s apsolutnom vrijednošću Faradayeve dubine, a boja kruga ovisi o tome je li Faradayeva dubina pozitivna ili negativna.

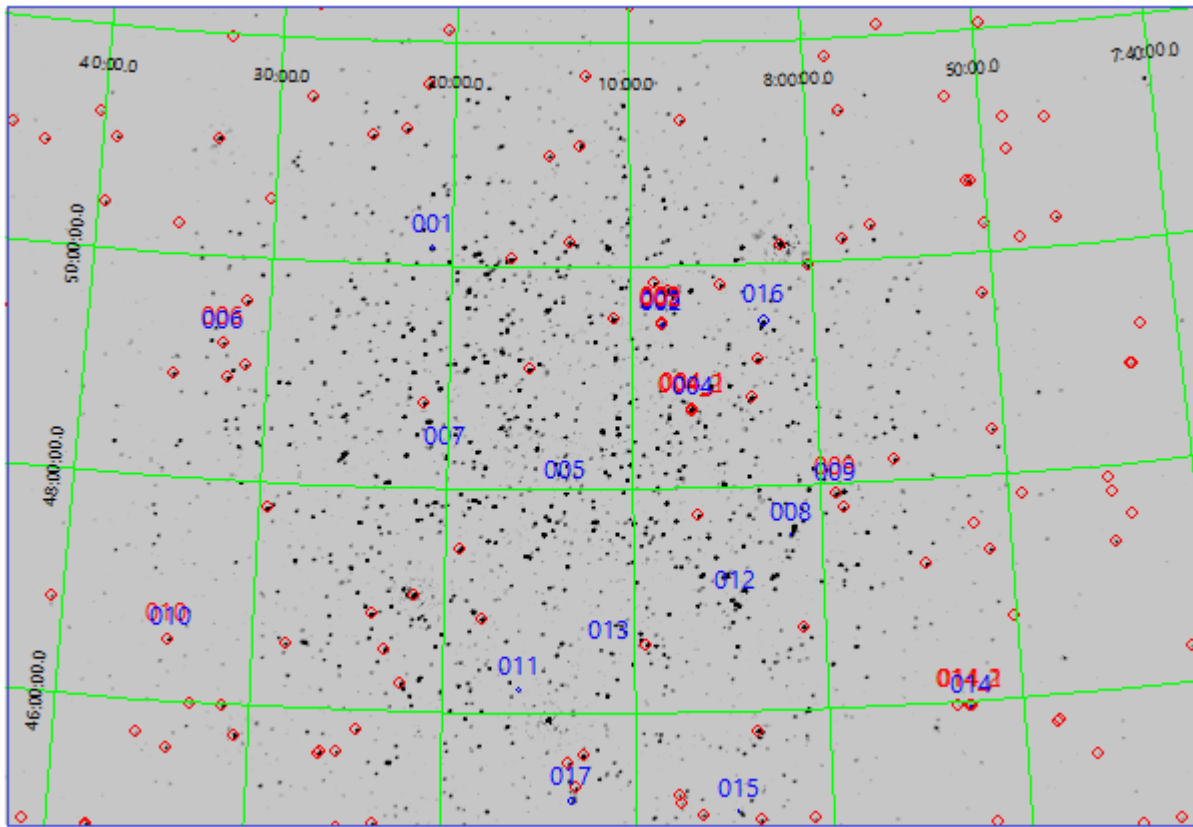


Slika 5: Intenzitet polariziranog zračenja u ovisnosti o Faradayevoj dubini za 3 različita izvora, crvene linije su Gaussijan prilagodbe na vrhove u intenzitetu, a plava linija odgovara Faradayevoj dubini za koju je intenzitet maksimalan

dubinama za istu regiju. Odbacili smo bilo kakve potencijalne izvore u rasponu Faradayevih dubina od  $-2 \text{ rad/m}^2$  do  $+2 \text{ rad/m}^2$  zbog velike instrumentalne polarizacije u tom području. Pronašli smo ukupno 17 radio izvora. Kako bi preciznije odredili njihove Faradayeve dubine, na vrhove smo prilagodili Gaussijan. Slika 4. prikazuje sve izvore s njihovim pripadajućim koordinatama i Faradayevim dubinama, a Slika 5. ovisnosti intenziteta o Faradayevoj dubini za 3 različita izvora.



Slika 6: Više bliskih izvora u NVSS-ovom katalogu (razl.  $45''$ ) prikazanih crvenim krugovima na lijevom dijelu slike, i u FIRST katalogu (razl.  $5''$ ) na desnom dijelu slike, vidimo kao jedinstveni izvor u LOFAR-ovim mjerenjima (razl.  $60''$ ). prikazan zelenim krugom na lijevom dijelu slike



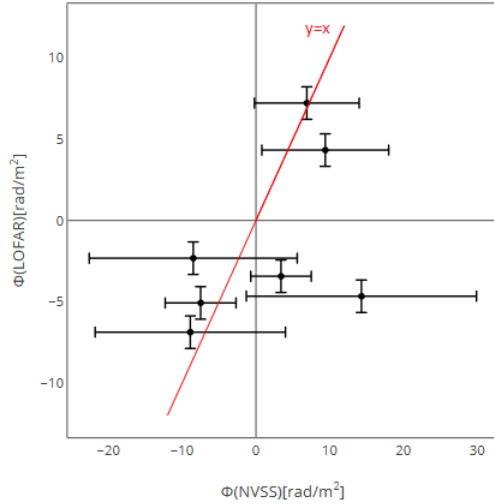
Slika 7: Prikaz izvora iz NVSS-ovog kataloga i onih pronađenih iz LOFAR-ovog mjerenja, u slici ukupnog intenziteta zračenja 3C196 polja : Plavo su pronađeni izvori iz LOFAR-ovih mjerenja, a crveno izvori iz NVSS kataloga

Kako bi usporedili karakteristike pronađenih polariziranih radio izvora, u SAOImage DS9 smo učitali sve njihove pozicije, te pozicije polariziranih radio izvora na 1.4GHz iz NVSS kataloga koji se nalaze u području 3C196 polja. Primjetili smo da na pozicijama nekih izvora koje smo pronašli postoji više bliskih izvora u NVSS katalogu. Takvi rezultati upućuju na to da se radi o radio galaksijama, koje mogu posjedovati više izvora zračenja (jezgra + repovi). Razlog tome je što iz LOFAR-ovih mjerenja u većini slučajeva vidimo samo jedan izvor nedovoljno dobra kutna razlučivost. U prilog tomu da se zaista radi o radio galaksijama idu i podaci, odnosno slike pojedinih područja iz FIRST kataloga na 1.4 GHz, koji ima 12 puta bolju rezoluciju od LOFAR-ovih mjerenja na 150 MHz.. Na Slici 6. prikazani su neki od primjera, a na Slici 7. nalaze se svi pronađeni izvori iz LOFAR-ovih mjerenja, i oni iz NVSS-ovog kataloga u 3C196 polju.

Za sve pronađene polarizirane radio izvore smo pomoću programa SAOImage DS9 očitali i vrijednosti srednjeg polariziranog intenziteta zračenja i srednjeg ukupnog intenziteta zračenja. Njihov omjer daje postotak polarizacije izvora. U dodatku u Tablici 1. su dani svi izvori s koordinatama, postotcima polarizacije i Faradayevim dubinama.

### 3.5 Usporedba s katalogima na drugim frekvencijama i spektralni indeksi

Naposlijetku smo naša mjerenja na 150 MHz usporedili s mjerenjima na drugim frekvencijama, u ukupnom intenzitetu, polarizaciji i Faradayevim dubinama. U Tablici 1., osim LOFAR-ovih mjerenja za polarizaciju i Faradayevu dubinu izvora, nalaze se i mjerenja iz NVSS-ovog kataloga na 1.4 GHz. Graf na Slici 8. prikazuje odnos Faradayevih dubina iz LOFAR-ovih i NVSS-ovih mjerenja. Koristeći podatke o ukupnom intenzitetu zračenja za različite frekvencije, prema formuli (19) izračunali smo spektralne indekse izvora uz primjenu linearne regresije na ovisnost logaritma intenziteta o logaritmu frekvencije. Rezultati su prikazani u Tablici 2. u dodatku. Prosječna vrijednost dobivenih spektralnih indeksa je 1.00.



Slika 8: Točke na grafu predstavljaju pronađene izvore iz LOFAR-ovih mjerenja koji postoje i u NVSS katalogu, na x-osi je F.d. izvora iz NVSS kataloga, na y-osi F.d. izvora iz LOFAR-ovih mjerenja, a crvena linija je pravac  $y=x$ .

## 4 Rasprava i zaključak

Istraživali smo polarizirano sinkrotronsko zračenje radio galaksija na niskim radio frekvencijama. Pronađene radio galaksije smo prvo usporedili s izvorima iz NVSS-ovog kataloga na 1.4 GHz. Faradayeve dubine izvora iz LOFAR-ovih mjerenja slažu se unutar pogrešaka mjerenja s Faradayevim dubinama navedenim u katalogu. Pritom je važno naglasiti da je pogreška pri određivanju Faradayevih dubina iz LOFAR-ovih mjerenja samo  $1 \text{ rad}/\text{m}^2$  što je višestruko preciznije od podataka iz NVSS kataloga.

Zatim smo usporedili i rezultate izračunatih postotaka polarizacije izvora iz LOFAR-ovih mjerenja na 150 MHz s onim iz NVSS-a na 1.4 GHz. Utvrdili smo da su postotci polarizacije izvora manji ili jednaki pri nižim frekvencijama u odnosu na više frekvencije. U prosjeku je polarizacija na 150 MHz za faktor 1.91 manja od one na 1.4 GHz. To je i očekivan rezultat s obzirom da je Faradayeva rotacija izraženija pri nižim frekvencijama, pa će time i Faradayeva depolarizacija biti veća.

Naposlijetku smo usporedili ukupne intezitete zračenja izvora dobivenih LOFAR-ovim mjerenjima na 150 MHz s katalogima na drugim frekvencijama. To nam je omogućilo izračunavanje spektralnih indeksa izvora. Dobiveni spektralni indeksi kreću se između 0.57 i 1.39 s prosječnom vrijednošću od 1.00. Vrijednosti spektralnih indeksa radio zračenja između -2 i 0 ukazuju na termalnu emisiju zračenja, dok pozitivne vrijednosti ukazuju na netermalne procese kao što je npr. sinkrotronsko zračenje.

## Literatura

- [1] Frank H. Shu : The Physics of Astrophysics
- [2] Wilson, Rohlfs, Hüttemeister : Tools of Radio Astronomy
- [3] V. Jelić et al. 2015 : Linear polarization structures in LOFAR observations of the interstellar medium in the 3C196 field
- [4] NVSS Rotation Measures Catalogue : <http://www.ucalgary.ca/ras/rmcatalogue>
- [5] VLSS - VLA Low-Frequency Sky Survey Discrete Source Catalog : <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/radiocatalog/vlss.html>
- [6] WENSS - Westerbork Northern Sky Survey : <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/all/wenSS.html>
- [7] FIRST Catalog : <http://first.astro.columbia.edu/cgi-bin/searchfirst>
- [8] Brentjens, de Bruyn 2005 : Faraday Rotational Measure Synthesis
- [9] SAOImage DS9 : <http://ds9.si.edu/site/Home.html>

## 5 Dodatak : Tablice

IZVOR	RA [J2000]	Dec [J2000]	$\Phi$ (LOFAR) [rad/m <sup>2</sup> ]	F <sub>peak</sub> (LOFAR) [mJy/PSF/RMSF]	F <sub>int</sub> (LOFAR) [mJy]	POLARIZACIJA (LOFAR)[%]	$\Phi$ (NVSS) [rad/m <sup>2</sup> ]	F <sub>peak</sub> (NVSS) [mJy/PSF/RMSF]	F <sub>int</sub> (NVSS) [mJy]	POLARIZACIJA (NVSS)[%]
001	8:21:01	+50:08:55	-6.13	0.91	126.06	2.66	-----	-----	-----	-----
002	8:08:17	+49:27:37	-4.66	4.84	357.62	5.10	14.3+/-15.6	6.20	109.1	6.16
003	8:08:16	+49:29:11	--3.43	2.83	302.87	1.29	3.4+/-4.1	16.53	122.1	15.16
004	8:06:41	+48:42:44	-6.87	2.61	1318.17	0.34	-8.9+/-12.9	5.70	351.6	1.88
005	8:13:37	+47:58:47	-3.37	1.96	273.22	1.01	-----	-----	-----	-----
006	8:32:23	+49:13:18	-5.07	2.49	72.79	3.42	-7.5+/-4.8	11.45	344.0	3.42
007	8:20:05	+48:16:37	-3.30	1.71	60.82	3.65	-----	-----	-----	-----
008	8:01:36	+47:33:45	4.04	1.65	37.71	7.32	-----	-----	-----	-----
009	7:59:09	+47:54:35	4.33	2.40	280.16	1.31	9.4+/-8.6	7.62	151.2	6.35
010	8:34:12	+46:33:35	-2.32	0.97	29.20	4.79	-8.5+/-14.1	3.81	47.2	8.79
011	8:15:59	+46:12:00	2.73	1.15	6.85	16.79	-----	-----	-----	-----
012	8:04:44	+46:57:53	5.85	0.64	260.31	0.25	-----	-----	-----	-----
013	8:11:19	+46:32:42	5.56	0.61	39.68	1.54	-----	-----	-----	-----
014	7:52:37	+45:56:22	7.22	0.82	31.68	4.55	6.9+/-7.1	11.44	200.6	5.58
015	8:04:46	+45:06:09	6.31	0.54	22.35	4.97	-----	-----	-----	-----
016	8:02:39	+49:28:58	-16.26	3.08	51.21	13.01	-----	-----	-----	-----
017	8:13:16	+45:13:03	14.21	0.99	20.79	6.20	-----	-----	-----	-----

Tablica 1 : Koordinate, Faradayeve dubine i postotci polarizacije pronađenih izvora iz LOFAR-ovih mjerenja i usporedba sa NVSS-ovim katalogom



IZVOR	RA [J2000]	Dec [J2000]	F <sub>int</sub> (LOFAR) [mJy]	F <sub>int</sub> (NVSS) [mJy]	F <sub>int</sub> (WENSS) [mJy]	F <sub>int</sub> (VLSS) [mJy]	n
001	8:21:01	+50:08:55	126.06	28.2	116	-----	1.32
002	8:08:17	+49:27:37	357.62	109.1	332	-----	0.83
003	8:08:16	+49:29:11	302.87	122.1	325	-----	0.72
004	8:06:41	+48:42:44	1318.17	351.6	1052	10 890	1.09
005	8:13:37	+47:58:47	273.22	43.9	156	-----	0.83
006	8:32:23	+49:13:18	72.79	344.0	449	-----	0.63
007	8:20:05	+48:16:37	60.82	4.1	43	-----	1.39
008	8:01:36	+47:33:45	37.71	31.5	30	-----	0.57
009	7:59:09	+47:54:35	280.16	151.2	211	1280	0.84
010	8:34:12	+46:33:35	29.20	62.0	222	1350	1.20
011	8:15:59	+46:12:00	6.85	-----	-----	-----	-----
012	8:04:44	+46:57:53	260.31	63.4	252	1240	1.05
013	8:11:19	+46:32:42	39.68	6.9	-----	-----	1.18
014	7:52:37	+45:56:22	31.68	200.6	664	3170	1.11
015	8:04:46	+45:06:09	22.35	56.7	129	830	1.02
016	8:02:39	+49:28:58	51.21	21.9	70	-----	0.99
017	8:13:16	+45:13:03	20.79	20.7	50.9	-----	1.17

Tablica 2 : Intenziteti ukupnog zračenja pronađenih izvora za različite frekvencije i izračunati spektralni indeksi