

# Mjerenje vlastitog gibanja struktura međuzvezdane materije pomoću promatranja LOFAR radioteleskopa

Luka Turić<sup>1</sup>, Vibor Jelić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu, Bijenička cesta 32, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Institut Ruđer Bošković, Bijenička cesta 54, 10000 Zagreb, Hrvatska

21.01.2018.

## Sažetak

U ovom radu želimo odrediti vlastito gibanje filamenata u 3C196 polju otkrivenih promatranjima galaktičkog sinkrotronskog zračenja LOFAR radioteleskopom. Koristimo 2 promatranja (L80508 i L192832) u razmaku od godinu dana. RM sintezom transformiramo linearno polarizirano zračenje u zračenje kao funkciju Faradayeve dubine i dobivamo tzv. RM kocke. Računanjem korelacije između kocki kao funkcije pomaka u Faradayevoj dubini dobivamo pomak između istih u iznosu od  $(0,1 \pm 0,6)$  rad  $m^{-2}$  te interpolacijom pomičemo L192832 kocku za tu vrijednost. Potom, iz obje kocke izvlačimo isti filament veličine  $185 \times 39$  piksela i računamo 2D korelaciju za nekoliko različitih Faradayevih dubina. Zbog izduženog oblika filamena pretpostavljamo gibanje u x-smjeru. Ne dobivamo pomak na vremenskoj skali od godine dana, a rezultat je  $(0 \pm 3)$  piksela. Greška od 3 piksela odgovara grešci od  $40''$ . U budućim mjerenjima ćemo isprobati druge metode i uzeti promatranja vremenski razmaknuta 5 godina.

## 1 Međuzvezdana materija

### 1.1 Sastav

Galaktički međuzvezdani medij (ISM, od eng. Interstellar Medium) sastoji se uglavnom od hladnog, toplog i vrućeg termalnog plina u mješavini neutralnih, ioniziranih, atomskih i molekularnih komponenti. Sve to prožimaju magnetska polja na manjim i većim skalama. S obzirom na ulogu gravitacije imamo molekularne oblake (gravitacija je značajna sila) te difuzni ISM gdje je gravitacija zanemariva. Konkretno, u literaturi kod difuznog ISM-a postoji 5 faza [1]. Prve dvije faze su hladni i topli neutralni medij (CNM i WNM, od eng. Cold Neutral Medium i Warm Neutral Medium) s temperaturama od  $\approx 50$  K odnosno 5000 K. Zbog malo elektrona, magnetska polja u ovim fazama možemo mjeriti samo Zeemanovim razdvajanjem spektralnih linija te linearnom polarizacijom zrnaca prašine. Druge dvije faze su topli i vrući ionizirani medij (WIM i HIM, od eng. Warm Ionized Medium i Hot Ionized Medium) s temperaturama od  $\approx 8000$  K odnosno  $\geq 10^6$  K. Infor-

maciju o magnetskom polju u ovim fazama možemo dobiti mjerenjem Zeemanovog razdvajanja kod WIM faze te iz Faradayeve rotacije kod obje faze koja će biti detaljno objašnjena u ovom radu. Navedene 4 faze često se zovu i "klasične faze" budući da je postojanje istih detaljno potvrđeno mjerenjima. Peta faza je tzv. topli djelomično ionizirani medij (WPIM, od eng. Warm Partially Ionized Medium) s temperaturom nešto nižim od gore navedene WIM faze i kreću se oko  $\approx 5000$  K. WPIM faza nije još uvijek detaljno potvrđena mjerenjima, ali sve je veća potreba za uvođenjem iste. Magnetska polja u toj fazi mogu se isto mjeriti Faradayevom rotacijom. Nadalje, ISM ispunjava i netermalna plazma (uglavnom relativistički protoni i elektroni, tzv. kozmičke zrake). Gustoća energije magnetskog polja, kozmičkih zraka i turbulentnog plina, usrednjena vremenski i preko velikog volumena, je usporediva (ekviparticipija energije). Za određivanje distribucije i svojstava ISM-a jako su važna promatranja difuznog polariziranog zračenja. Takvo je sinkrotronsko zračenje koje je linearno polarizirano i ukratko je opisano u sljedećem potpoglavlju.

## 1.2 Sinkrotronsko zračenje

Nabijene čestice (uglavnom elektroni), koje se spiralnom putanjom gibaju relativističkim brzinama oko silnica magnetskog polja, emitiraju kontinuirano elektromagnetsko zračenje. Za nas kao promatrače bitna je komponenta magnetskog polja okomita na smjer doglednice. Energetska distribucija nabijenih čestica zaslužnih za proizvodnju sinkrotronskog zračenja  $n(E)$  dana je eksponencijalnim zakonom:

$$n(E)dE = kE^{-\gamma}dE, \quad (1)$$

gdje je  $k$  normalizacijska konstanta, a  $\gamma$  eksponent. Ako se uzme u obzir efekt apsorpcije unutar plazme samog emitera (samoapsorpcija), za specifični intenzitet zračenja imamo [2]:

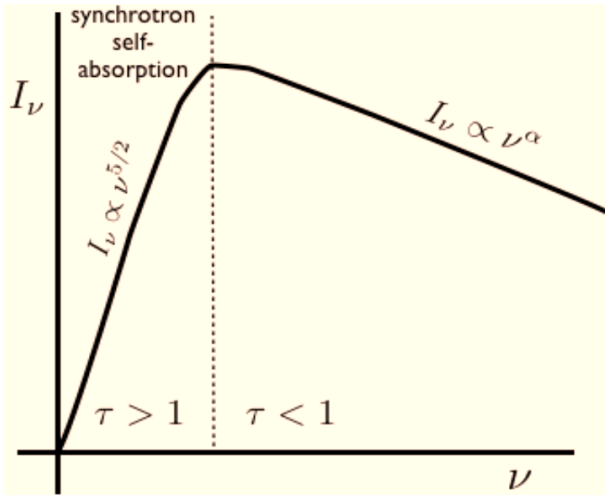
$$I_\nu \propto \nu^{5/2} \quad \text{ako } \tau_\nu \gg 1, \quad (2)$$

$$I_\nu \propto \nu^\alpha \quad \text{ako } \tau_\nu \ll 1, \quad (3)$$

gdje je  $\tau_\nu$  optička dubina, a  $\alpha$  spektralni indeks izražen preko eksponenta  $\gamma$ :

$$\alpha = \frac{1-\gamma}{2}. \quad (4)$$

Specifični intenzitet sinkrotronskog zračenja prikazan je na slici 1.



Slika 1: Specifični intenzitet sinkrotronskog zračenja s uključenim efektom samoapsorpcije na nižim frekvencijama <sup>1</sup>.

Efekt samoapsorpcije prisutan je na nižim frekvencijama. To područje je optički duboko ( $\tau_\nu \gg 1$ ) i spektar ne ovisi o energetskej raspodjeli nabijenih

čestica te vrijedi (2). Na višim frekvencijama imamo relaciju (3) jer emitirajući medij postaje optički tanak ( $\tau_\nu \ll 1$ ) za samoapsorpciju pa spektar ovisi o energetskej raspodjeli nabijenih čestica.

Kao što je već spomenuto, sinkrotronsko zračenje je linearno polarizirano, a intrinzični stupanj polarizacije je dan sa [3]:

$$p = \frac{3\gamma + 3}{3\gamma + 7}, \quad (5)$$

gdje je  $\gamma$  od prije navedeni eksponent u energetskej distribuciji relativističkih elektrona. Iz mjerenja maglice Rakovica [4] i [5] određeno je da je  $\gamma \approx \frac{5}{3}$  što nam daje stupanj polarizacije od oko 70% (neovisno o frekvenciji). U promatranjima se može izmjeriti samo jedan manji dio te polarizacije. Razlog tomu su fluktuacije magnetskog polja unutar volumena promatranog teleskopskom zrakom kao i zbog Faradayeve depolarizacije. Promatrani stupanj polarizacije je manji i zbog doprinosa nepolariziranog termalnog zračenja koje može dominirati u područjima stvaranja zvijezda.

## 1.3 Faradayeva rotacija

Na putu prema promatraču (radioteleskopu) kroz međuzvjezdani medij kut polarizacije sinkrotronskog zračenja  $\chi$  biva rotiran zbog Faradayevog efekta. Uzrok efektu su elektroni u prisustvu magnetskog polja, a isti može biti objašnjen razlikom indeksa loma koji vide dva kružno polarizirana propagacijska moda. Naime, linearno polarizirani elektromagnetski val može se prikazati kao superpozicija lijevo i desno kružno polariziranog vala. Prolazeći kroz, i interagirajući s medijem (elektronima u sveprisutnom magnetskom polju), dolazi do usporavanja jedne od te dvije zrake što za posljedicu ima fazni pomak među njima. Nakon što su dvije zrake opet zbrojene nakon toga pomaka, rezultat je opet linearno polarizirani val, ali s drugim kutom polarizacije (kut polarizacije je rotiran) <sup>2</sup>. Kut polarizacije je proporcionalan kvadratu valne duljine:

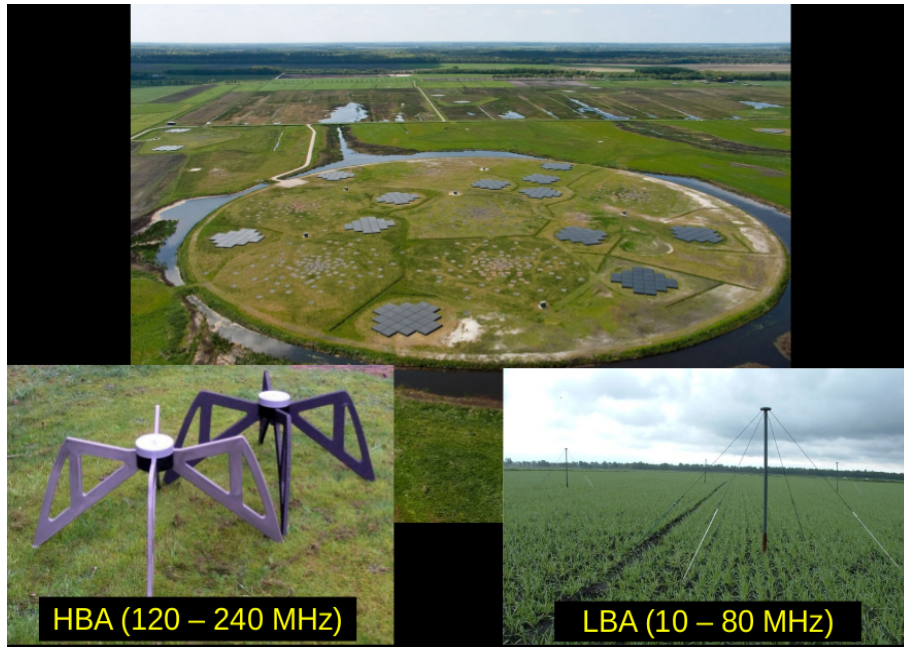
$$\chi(\lambda^2) = \chi_0 + \text{RM} \cdot \lambda^2, \quad (6)$$

gdje je RM mjera rotacije (engl. Rotation Measure), a u CGS sustavu je dan izrazom:

$$\text{RM} = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int_0^d n_e(s) B_{||}(s) ds, \quad (7)$$

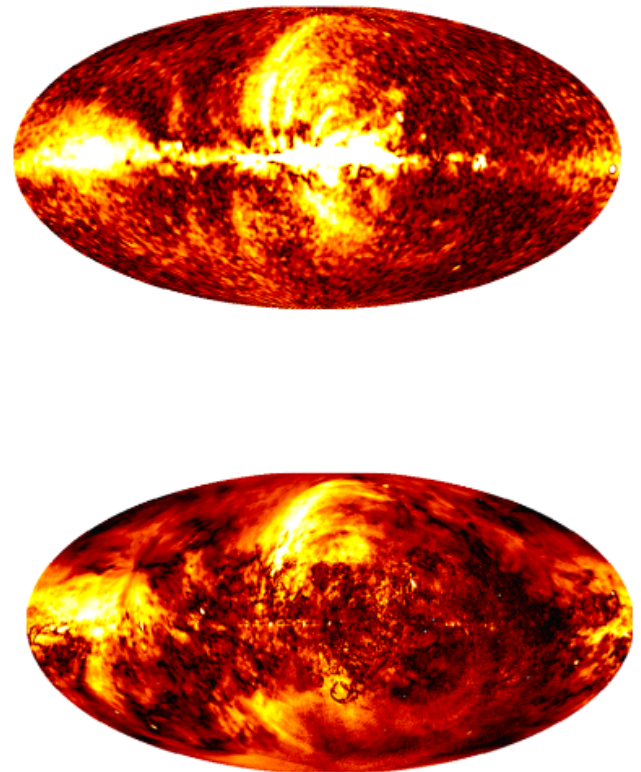
<sup>1</sup>[http://www.astro.yale.edu/vdbosch/astro320\\_summary27.pdf](http://www.astro.yale.edu/vdbosch/astro320_summary27.pdf)

<sup>2</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_effect)



Slika 2: Bazna stanica LOFAR radioteleskopa (Nizozemska) s prikazanim antenama i njihovim područjima rada; HBA (eng. High Band Antenna) i LBA (eng. Low Band Antenna) <sup>3</sup>.

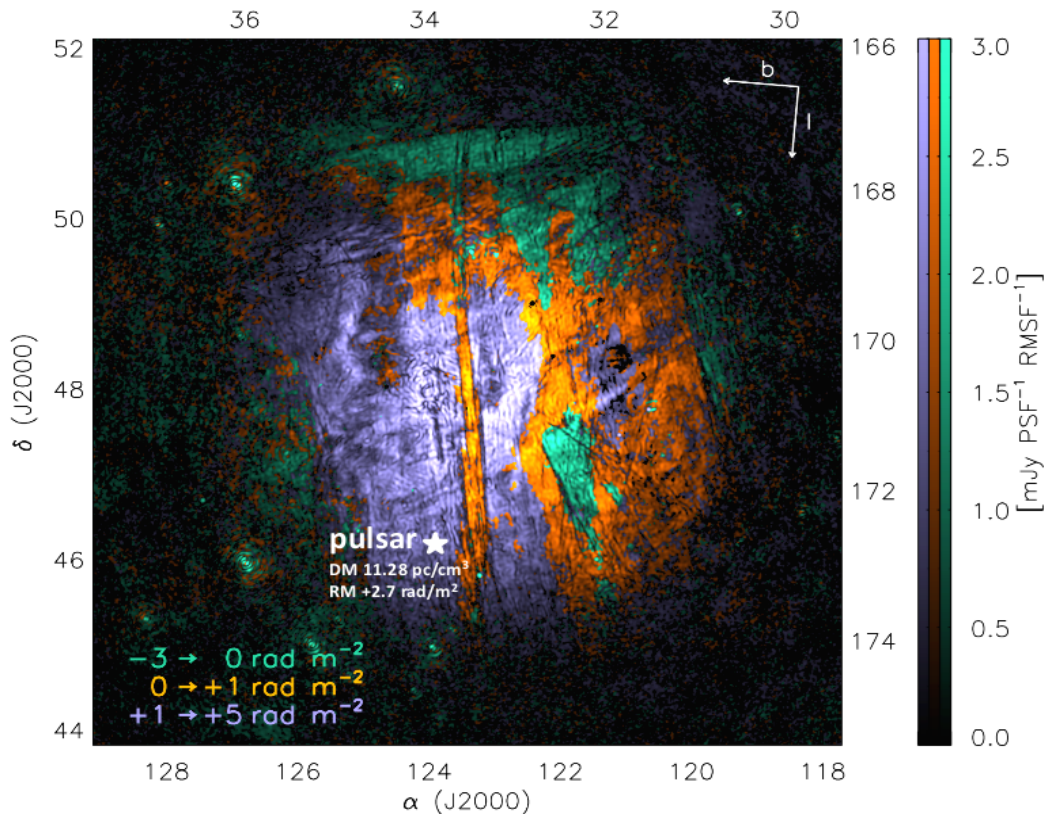
pri čemu su  $e$  i  $m$  naboj i masa elektrona,  $n_e(s)$  gustoća elektrona u svakoj točki  $s$  duž puta i  $B_{||}(s)$  komponenta magnetskog polja u smjeru propagacije EM vala u svakoj točki  $s$  duž puta. Primjer ovisnosti Faradayeve rotacije o kvadratu valne duljine prikazan je na slici 4. Naime, imamo dobro slaganje između polarizacijskih karti naše galaksije na 22,8 GHz i 1,4 GHz u području izvan galaktičke ravnine, ali visokofrekvencijska karta pokazuje manju depolarizaciju duž galaktičke ravnine. To je i očekivano budući da je Faradayeva rotacija proporcionalna kvadratu valne duljine i puno je jači utjecaj iste na manjim frekvencijama (većim valnim duljinama) pa je i depolarizacija izraženija. Dakle, promatranja na niskim frekvencijama su vrlo osjetljiva na stupce magnetizirane plazme male gustoće u ISM-u (nije pogodno za promatranje na višim frekvencijama). Stoga široka frekvenijska pokrivenost i dobra kutna rezolucija čini radioteleskop LOFAR (eng. Low Frequency Array) odličnim instrumentom za proučavanje galaktičkog polariziranog zračenja. Glavna stanica LOFARA s dva tipa antena prikazana je na slici 2.



Slika 4: Intenzitet polarizacije Mliječnog puta na 22,8 GHz (gore) i na 1,4 GHz (dolje). Na nižoj frekvenciji vidi se puno izraženija depolarizacija duž galaktičke ravnine <sup>4</sup>.

<sup>3</sup><https://www.astron.nl/general/lofar/lofar>

<sup>4</sup>[https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/foreground/f\\_images.cfm](https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/foreground/f_images.cfm)



Slika 3: 3C196 polje prikazano u 3 sloja u rasponu Faradayeve dubine od  $-3$  do  $+5 \text{ rad m}^{-2}$ . Vidimo zanimljive strukture. Među njima su tanki i ravni depolarizacijski kanali kao i uža filamentarna struktura koja se pruža po sredini slike.

U kombinaciji s RM sintezom (eng. Rotation Measure Synthesis) [6], promatranja LOFARA omogućuju nam proučavanje relativnih distribucija regija koje emitiraju sinkrotronsko zračenje i regija koje polarizaciju tog zračenja rotiraju Faradayevim efektom, a sve to uz odličnu rezoluciju od  $1 \text{ rad m}^{-2}$  u Faradayevoj dubini (detalji RM sinteze će biti dani kasnije u radu). Nedavna promatranja nekoliko područja na visokim galaktičkim širinama su otkrila iznenađujuće visoke intenzitete polarizacije. Primjer za to je ELAIS-N1 polje s temperaturom sjaja (eng. brightness temperature) od  $4 \text{ K}$  pri  $150 \text{ MHz}$  [7] što je puno više od očekivanog (na bazi prethodnih mjerenja). U ovom radu koriste se nedavna promatranja difuznog polariziranog zračenja 3C196 polja [8]. Ono se pokazalo jako zanimljivo zbog svojih filamenata prožetih ravnim depolarizacijskim kanalima. Potrebno je dobro opisati karakteristike međuzvezdane plazme koja uzrokuje takve strukture, a jedna od glavnih nepoznanica su udaljenost i vlastito gibanje iste. Naravno, lakše je izmjeriti vlastito gibanje što je glavna tema ovoga rada.

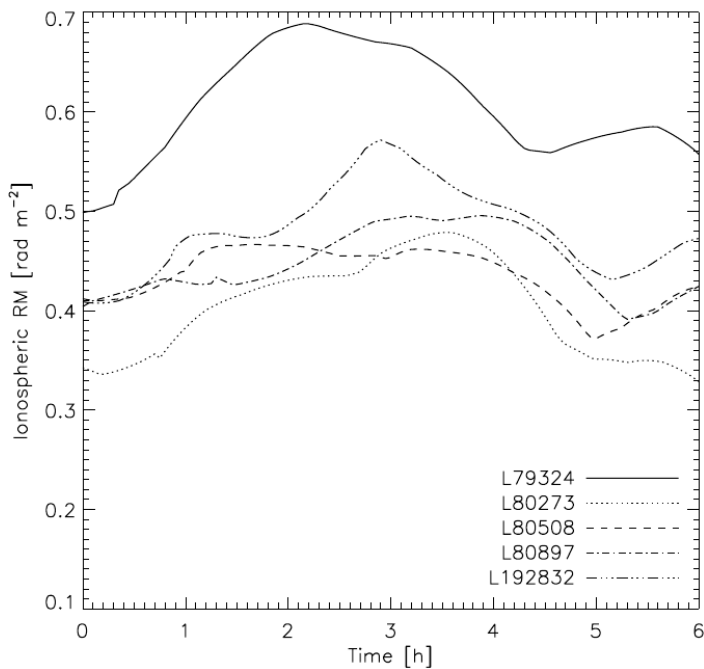
## 2 Podaci

3C196 polje je centrirano na istoimeni vrlo sjajni radioizvor, u hladnom području prema galaktičkom anticentru ( $l=171^\circ$ ,  $b=+33^\circ$ ). Nalazi se na većoj visini na nebu što omogućuje noćna promatranja tokom većeg dijela godine (polje je od bitne važnosti za buduća istraživanja). Polje je unazad nekoliko godina već dosta puta promatrano s LOFAR-ovim HBA antenama (HBA, od eng. High Band Antenna). Slojeviti prikaz intenziteta polarizacije tog polja dan je na slici 3 [8].

U ovom radu cilj je odrediti vlastito gibanje filamenata na skali od godinu dana koji se pruža po sredini 3C196 polja. Iz tog razloga korištena su 2 promatranja međusobno razmaknuta godinu dana: L80508 (16.12.2012.; trajanje promatranja 8h) i L192832 (15.12.2013.; trajanje promatranja 6h). Promatranja su napravljena korištenjem tzv. HBA DUAL INNER konfiguracije [9] koja sadrži 48 "baznih stanica" (CS, od eng. core station) i 14 "udaljenih stanica" stanica (RS, od eng. remote station). Mjereno je u području od  $115 \text{ MHz}$  do  $189 \text{ MHz}$  s pojasevima širine

195,3125 kHz. Svaki pojas je podijeljen na 64 kanala. Nakon što su promatranja obrađena, konačne slike za daljnu analizu su dobivene iz frekvencijskog područja od 115 MHz do 175 Mhz korištenjem osnovnih linija (eng. baseline) tj. udaljenosti između pojedinih antena od 10 do 800 valnih duljina. Konačna prostorna rezolucija iznosi 3 lučne minute. Nije potrebna bolja rezolucija budući da se difuzno polarizirano zračenje pojavljuje na prostornim skalama većim od nekoliko lučnih minuta.

Pri obradi promatranja se posebno u obzir uzima Faradayeva rotacija u ionosferi jer je to sada efekt koji ovisi o vremenu i smjeru, a veličina toga je proporcionalna ukupnom broju elektrona (TEC, od eng. total electron content) plazme u ionosferi. Ako se varijabilnost Faradayeve rotacije događa na vremenskoj skali koja je manja od ukupnog vremena integracije promatranja, dolazi do djelomične deko-relacije polariziranog zračenja. To se ispravlja tako što se predviđaju RM varijacije u ionosferi koristeći GIM<sup>5</sup> (eng. Global Ionospheric Maps) i WMM<sup>6</sup> (eng. World Magnetic Model). Detalji su opisani u [7], a RM varijacije za 5 različitih promatranja (uključujući i oba promatranja koja se koriste u radu) su prikazane na slici 5.



Slika 5: Procjenjene RM varijacije u ionosferi iz ionosferskih mapa (GIM). RM varijacije su dane kao funkcija vremena promatranja i za svaku noć. Preuzeto iz [8].

## 3 Analiza i rezultati

### 3.1 RM sinteza

Tehnika RM sinteze [6] nam služi kako bi proučavali linearno polarizirano zračenje kao funkciju Faradayeve dubine  $\Phi$ . Faradayeva dubina je definirana kao:

$$\frac{\Phi}{[\text{rad m}^{-2}]} = 0.81 \int_{\text{izvor}}^{\text{promatrač}} \frac{n_e}{[\text{cm}^{-3}]} \frac{B_{\parallel}}{[\mu\text{G}]} dl, \quad (8)$$

gdje je  $n_e$  gustoća elektrona,  $B_{\parallel}$  komponenta magnetnog polja paralelna dogleđnici  $dl$  i integral je izvršen duž cijele putanje od izvora do promatrača. Pozitivna Faradayeva dubina implicira komponentu magnetnog polja usmjerenu prema nama, a negativna znači da je usmjerena od nas. Izmjereni kompleksni polarizirani intenzitet  $P(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2)$  povezan je s Faradayevom dubinom preko sljedećeg izraza:

$$F(\Phi) = \frac{1}{W(\lambda^2)} \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda^2) e^{-i2\Phi\lambda^2} d\lambda^2, \quad (9)$$

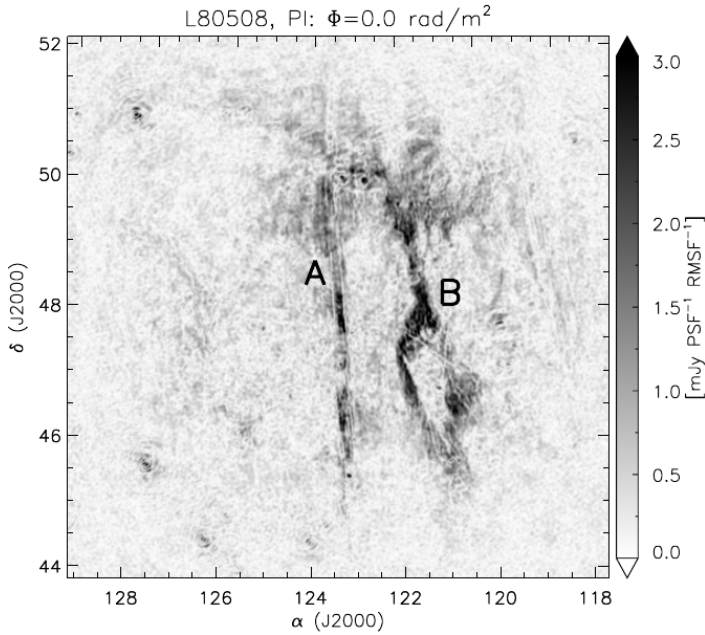
gdje je  $W(\lambda^2)$  težinska funkcija. Treba primjetiti da mi imamo samo konačni spektar pozitivnih valnih duljina što rezultira u nepotpunom  $F(\Phi)$ . RM sinteza je ograničena spektralnom pojaskom širinom ( $\Delta\lambda^2$ ), spektralnom rezolucijom ( $\delta\lambda^2$ ) i minimumom ( $\lambda_{\min}^2$ ) od  $\lambda^2$  distribucije. Sva 3 navedena parametra su također povezana s 3 fizikalne veličine u Faradayevom prostoru: (i) maksimalna Faradayeva dubina koja se može detektirati  $\Phi_{\max} \approx \sqrt{3}/\delta\lambda^2$ ; (ii) najveća struktura koja može biti razlučena u Faradayevoj dubini  $\Delta\Phi_{\text{scale}} \approx \pi/\lambda_{\min}^2$ ; (iii) rezolucija u Faradayevom prostoru  $\delta\Phi \approx 2\sqrt{3}/\Delta\lambda^2$  što definira minimalnu udaljenost između dvije različite strukture koje su detektabilne.

Primjenjujemo RM sintezu na Stokes Q i U slikama od oba promatranja (L80508 i L192832) s 310 pojaseva frekvencija u području od 115 MHz do 175 MHz. Finalni rezultat su RM kocke (kasnije samo kocke) dimenzija  $1200 \times 1200 \times 201$  koje, uz deklinaciju i rektascenziju, imaju Faradayevu dubinu kao treću koordinatu. Raspon Faradayeve dubine u kockama je od  $-25 \text{ rad m}^{-2}$  do  $+25 \text{ rad m}^{-2}$  uz korake od  $0,25 \text{ rad m}^{-2}$ . Rezolucija u Faradayevom prostoru kocki je definirana širinom RMSF (eng. Rotation Measure Spread Function) [6] te iznosi

<sup>5</sup><http://aiuws.unibe.ch/ionosphere>

<sup>6</sup><http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>

$\delta\Phi = 0,9 \text{ rad m}^{-2}$ , dok je najveća struktura koja se može detektirati širine  $\Delta\Phi_{\text{scale}} = 1,1 \text{ rad m}^{-2}$ . Pošto su  $\delta\Phi$  i  $\Delta\Phi_{\text{scale}}$  usporedivi, možemo detektirati samo tanke Faradayeve strukture ( $\lambda^2\Delta\Phi_{\text{scale}} \ll 1$ ). Kao primjer izdvajamo L80508 sliku 3C196 polja 6 u intenzitetu polarizacije na  $\Phi = 0,00 \text{ rad m}^{-2}$ . Šum kod obje kocke iznosi  $71 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$  (PSF, od eng. Point Spread Function <sup>7</sup>).

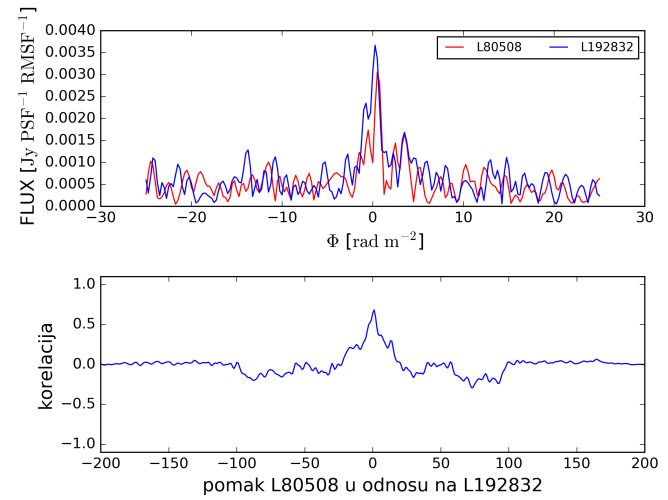


Slika 6: Prikaz 3C196 polja u intenzitetu polarizacije na  $\Phi = 0,00 \text{ rad m}^{-2}$ . Veličina slike je  $8,3^\circ \times 8,3^\circ$  s PSF (eng. Point Spread Function) od  $3,6' \times 3,9'$ .

### 3.2 Kalibracija Faradayeve rotacije u ionosferi

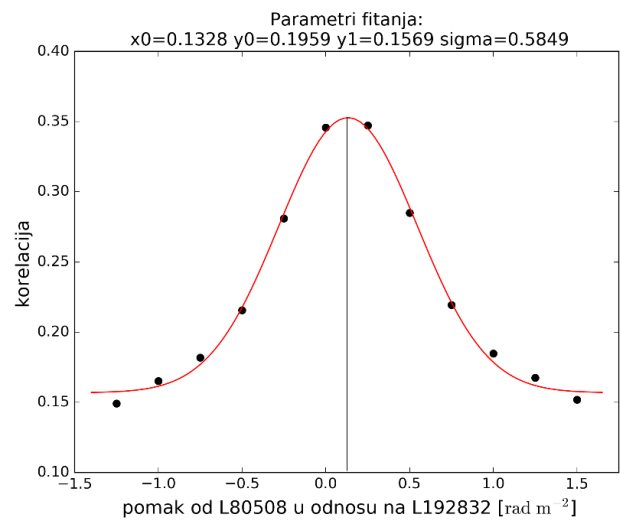
Pošto želimo odrediti vlastito gibanje filameta (na slici 6 označen slovom A) uspoređujući dva promatranja u razmaku od godinu dana (L80508 i L192832), moramo biti sigurni da su strukture koje uspoređujemo na istoj Faradayevoj dubini. Naime, utjecaj ionosfere je odračunat pri obradi promatranja, ali svejedno može postojati pomak između kocki u Faradayevoj dubini zbog različitih uvjeta u ionosferi i instrumentaciji za vrijeme promatranja. Pomak određujemo tako što računamo Pearsonov koeficijent korelacije <sup>8</sup> između dva promatranja kao funkciju pomaka/kašnjenja u Faradayevoj dubini jednog promatranja u odnosu na fiksno drugo. U ovoj usporedbi uzimamo samo one piksele koji duž Faradayeve dubine imaju maksimum fluksa u intenzitetu polar-

izacije veći od 4 standardne devijacije šuma. Primjer navedenog je dan za jedan piksel na slici 7.



Slika 7: Flux (gore) i korelacija između dva promatranja kao funkcija pomaka duž Faradayeve dubine (dolje).

Vidimo na slici 7 da postoji razlika u intenzitetu maksimuma kao i da postoji pomak između dva mjerjenja. Na kraju usrednjavamo korelacije dobivene za svih  $1200 \times 1200$  piksela i fitamo Gaussijan na 12 pomaka između kocki duž Faradayeve dubine što je prikazano na slici 8.



Slika 8: Usrednjene korelacije kao funkcija pomaka u Faradayevoj dubini jednog mjerjenja u odnosu na drugo.

Za pomak između dva mjerjenja se dobilo  $(0,1 \pm 0,6) \text{ rad m}^{-2}$ . Dobivena greška je manja od rezolucije korištenih promatranja ( $0,9 \text{ rad m}^{-2}$ ). Za bolji rezultat bi trebalo uzeti piksele koji imaju puno veći maksimum od korištenog uvjeta u ovom

<sup>7</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Point\\_spread\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Point_spread_function)

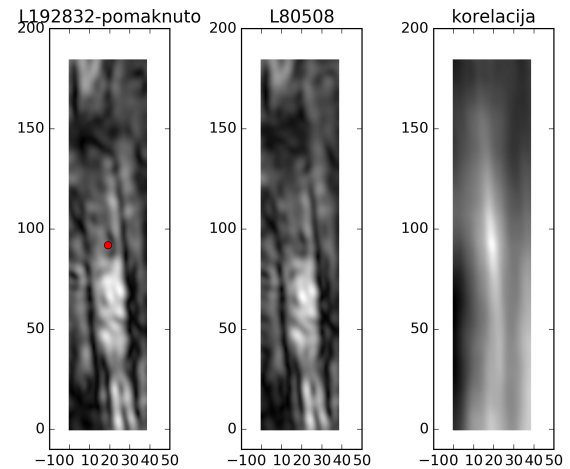
<sup>8</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Correlation\\_and\\_dependence](https://en.wikipedia.org/wiki/Correlation_and_dependence)

računu (maksimum fluksa  $> 4$  standardne devijacije šuma). Sljedeći korak je interpolacijom pomaknuti jednu kocku u odnosu na drugu za dobiveni pomak. Od mnoštva dostupnih algoritama, ovdje se koristi Pythonov podmodul *scipy.interpolate.UnivariateSpline*<sup>9</sup> pošto ima puno opcionalnih argumenata kao što je "`_call_`" gdje se mogu odabrati točke u kojima se želi napraviti interpolirana vrijednost (u našem slučaju to su Faradayeve dubine za  $0,1 \text{ rad m}^{-2}$  pomaknute u odnosu na drugu kocku). Korišteni stupanj interpolacije je kubni. Sada imamo jednu nepromijenjenu kocku (L80508) i jednu kocku (L192832) "pomaknutu" interpolacijom za  $0,1 \text{ rad m}^{-2}$  u sustav prve kocke te ćemo ju zvati L192832-pomaknuto. Spremni smo odrediti vlastito gibanje međuzvjezdane strukture na određenim Faradayevim dubinama.

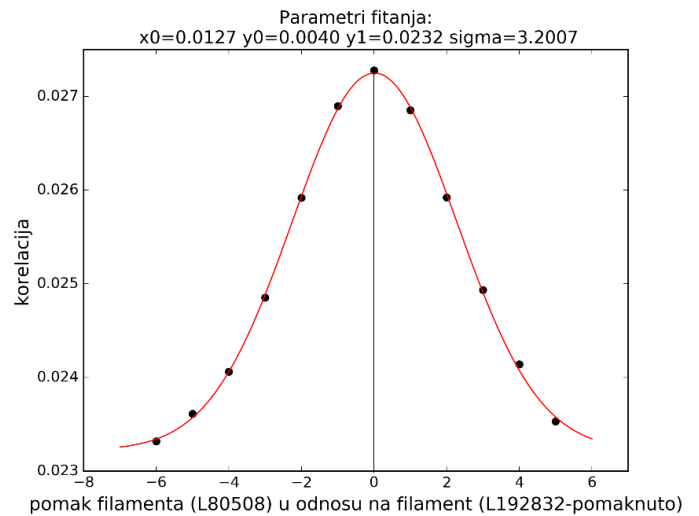
### 3.3 Postoji li vlastito gibanje filameta?

2D pomake na nebu također određujemo korelacijom tako što na određenoj Faradayevoj dubini izdvojimo filament iz L80508 i L192832-pomaknuto i računamo 2D korelaciju. Koristimo Pythonov podmodul *scipy.signal.correlate2d*<sup>10</sup> sa simetričnim rubnim uvjetima. Konkretno, izrezani dio filameta A na slici 6 je veličine  $185 \times 39$  piksela. Izgled filameta tj. duguljasta struktura istoga nam govori da ako postoji vlastito gibanje na skali od godinu dana, da je ono duž x-osi. Iz tog razloga gledamo samo pomake duž x-osi u području maksimuma korelacije. Izrezani filament iz oba mjerenja na  $\Phi = +0,50 \text{ rad m}^{-2}$  i korelacija su prikazani na slici 9. Potom uzimamo ukupno 12 različitih pomaka duž x-osi oko maksimuma korelacije i na iste fitamo Gaussijan kako bismo dobili vrijednost pomaka. Fit je dan na slici 10. Za nekoliko različitih Faradayevih dubina dobivamo rezultat praktički isti kao na slici 10, a to je  $(0 \pm 3)$  piksela. Dakle, na skali od godinu dana ne vidimo pomak. Ako gledamo pomak po x-osi uzduž cijelog filameta, onda se greška smanjuje kao drugi korijen iz broja piksela na y-osi. Dakle, ako uzmemo u obzir da greška od 3 piksela odgovara grešci od 9 lučnih minuta, onda nam je greška za  $\sqrt{185} \approx 13$  puta manja i iznosi  $40''$ . Nadalje, ako uzmemo da je filament na udaljenosti od 50 pc s transverzalnom brzinom od  $50 \text{ km/s}$ , to znači da se pomiče  $50 \cdot 10^{-6}$

pc/godina što je jednako  $0,2''/\text{godina}$ . Vidimo da trebamo poboljšati osjetljivost mjerenja.



Slika 9: 2D korelacija između dva filameta u razmaku od godinu dana na  $\Phi = 0,50 \text{ rad m}^{-2}$ . Crvena točka pokazuje mjesto maksimalne korelacije i nalazi se točno u sredini (filamenti se poklapaju).



Slika 10: Izračunate korelacije nakon pomicanja jednog filameta u odnosu na drugi duž x-osi na  $\Phi = 0,50 \text{ rad m}^{-2}$ .

## 4 Zaključak i planovi za buduća istraživanja

U radu se koriste LOFAR-ova promatranja polja 3C196. Radi se o galaktičkom sinkrotronskom zračenju koje je linearno polarizirano. Prolazeći kroz međuzvjezdanu plazmu prožetu magnetskim poljem,

<sup>9</sup><https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.UnivariateSpline.html#scipy.interpolate.UnivariateSpline>

<sup>10</sup><https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.15.1/reference/generated/scipy.signal.correlate2d.html>

dogada se zakretanje kuta polarizacije zbog Faradayevog efekta. Koristeći RM sintezu možemo to zračenje transformirati u zračenje koje je funkcija Faradayeve dubine čime se otkriva vrlo bogata morfologija polarizirane emisije. Imamo zanimljive strukture raširene po Faradayevoj dubini od  $-3$  do  $+8$  rad  $m^{-2}$  pri čemu se ističu izrazito ravni i uski depolarizacijski kanali. Uz to, po sredini polja se proteže i dugački filament omeđen s dva depolarizacijska kanala. Cilj je bio određivanje vlastitog gibanja tog filameta i zbog toga se koriste dva promatranja (kocke) u razmaku od godinu dana (L80508 i L192382). Prvi korak je poravnati ta dva promatranja po Faradayevoj dubini zbog utjecaja ionosfere i instrumentacije kako bismo bili sigurni da promatramo iste strukture na određenoj dubini. Računanjem korelacije između dviju kocki kao funkcije pomaka u Faradayevoj dubini, određen je pomak u iznosu od  $(0,1 \pm 0,6)$  rad  $m^{-2}$  te smo za tu vrijednost interpolacijom pomaknuli kocku L192382 u sustav L80508 kocke. Potom smo izdvojili filament iz obje kocke veličine  $185 \times 39$  piksela i računali 2D korelaciju između njih na nekoliko različitih Faradayevih dubina. Zbog duguljastog oblika filameta smatramo da je gibanje u x-smjeru. Nismo dobili pomak filameta na vremenskoj skali od godinu dana, a vrijednost je  $(0 \pm 3)$  piksela. Greška od 3 piksela odgovara grešci od  $40''$  te je dosta velika zbog male

osjetljivosti. U budućim mjerenjima ćemo koristiti neke druge metode za izoliranje i uspoređivanje filameta na određenim vremenskim razmacima. Uz to, sljedeći korak je uzeti dva promatranja koja su vremenski razmaknuta više od jedne godine (recimo 5 godina).

## Literatura

- [1] Heiles, C. & Haverkorn, M. Space Sci Rev (2012) 166: 293
- [2] URL: <http://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch5.html>
- [3] Le Roux, E. 1961, Annales d'Astrophysique, 24, 71
- [4] Woltjer, L. 1958, Bull. Astron. Inst. Netherlands, 14, 39
- [5] Westfold, K.C. 1959, ApJ, 130, 241
- [6] Brentjens, M. A. & de Bruyn, A. G. 2005, A&A, 441, 1217
- [7] Jelić, V., de Bruyn, A. G., Mevius, M., et al. 2014, A&A, 568, A101
- [8] Jelić, V., de Bruyn, A. G., Pandey, V. N., et al. 2015, A&A, 583, A137
- [9] van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al. 2013, A&A, 556, A2