

Vlastito gibanje filameta ionizirane međuzvezdane materije detektirane pomoću LOFAR radio teleskopa

Turić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:042857>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Luka Turić

VLASTITO GIBANJE FILAMENTA IONIZIRANE
MEĐUZVJEZDANE MATERIJE DETEKTIRANE
POMOĆU LOFAR RADIOTELESKOPA

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Luka Turić

Diplomski rad

**Vlastito gibanje filamenta ionizirane
međuzvezdane materije detektirane
pomoću LOFAR radioteleskopa**

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Vibor Jelić

Suvoditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Vernesa Smolčić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Neizmjerno sam zahvalan mentoru dr. sc. Viboru Jeliću na uloženom vremenu i velikoj količini prenesenog znanja tijekom izrade ovoga rada. Hvala prijateljima na razumijevanju i podršci kada je to bilo potrebno. Hvala tati i braći za strpljenje i veliku podršku tijekom studija. Mama, posebno hvala i tebi jer si uvijek vjerovala u mene i davala mi najveću moguću podršku. Žao mi je što nisi doživjela kraj moga studija. Znam da si tamo gore na nebu sretna i ponosna na mene.

Sažetak

Međuzvezdana materija je tvar koja prožima prostor između zvijezda unutar galaksija, pa tako i prostor unutar naše galaksije po imenu Mliječni put. Sastoji se od plina u ioniziranom, atomskom i molekularnom stanju, kozmičke prašine i visokoenergetskih kozmičkih zraka, te je prožeta magnetskim poljima. U radiopodručju elektromagnetskog spektra, međuzvezdana materija može se proučavati analizom sinkrotronskog zračenja i njegove polarizacije. Nedavna opažanja pomoću radioteleskopa LOFAR (100 – 200 MHz) otkrila su nekoliko stupnjeva dugačak i vrlo ravni filament koji zakreće ravninu polarizacije pozadinskog sinkrotronskog zračenja. Najvjerojatnije se radi o filamentu ionizirane međuzvezdane materije koja se nalazi unutar 100 pc od nas. Cilj ovoga rada je izmjeriti vlastito gibanje filameta analizirajući LOFAR-ova promatranja vremenski razmaknuta jednu i tri, odnosno četiri godine. Diferencijalnom usporedbom položaja filameta u vremenu nije zabilježen statistički značajan pomak u smjeru okomitom na os izduženosti filameta, niti u mjerenjima koja su razmaknuta godinu dana, niti u mjerenjima koja su razmaknuta četiri godine. S obzirom na to da kroz razdoblje od četiri godine nema pomaka većeg od pogreške mjerenja (> 18 lučnih sekundi), vlastito gibanje filameta je manje od 4.5 lučnih sekundi na godinu. Također, moguće je da je dominantan smjer gibanja filameta paralelno s galaktičkom ravninom te povezano s rotacijom same galaksije.

Ključne riječi: Mliječni put, međuzvezdana materija, sinkrotronsko zračenje, radiointerferometrija, radiopolarimetrija

Proper motion of an ionized filament in the interstellar medium observed with the LOFAR radio telescope

Abstract

The Galactic interstellar medium (ISM) is the matter that permeates the space between the stars in our Galaxy. It includes gas in ionic, atomic, and molecular form, dust and cosmic rays. It is also pervaded by magnetic fields. The ISM can be studied at radio wavelengths by observing synchrotron emission and its polarization. Recent observation with the LOFAR radio telescope (100 – 200 MHz) revealed a few degrees straight filament, which changes the plane of polarization of the background synchrotron emission. It is likely a filament of an ionized gas located somewhere within 100 pc from us. This work aims to measure the proper motion of the filament by comparing its differential position in the LOFAR observations separated by one, three and four years. The filament does not show any statistically significant shift in the direction perpendicular to its orientation. Since there is no shift greater than the measurement error (> 18 arcseconds) over the course of four years, its proper motion is smaller than 4.5 arcseconds per year. It is also possible that the dominant velocity of the filament is almost parallel to the Galactic plane and connected to the global rotation of the Galaxy.

Keywords: Milky way, interstellar medium, synchrotron emission, radio interferometry, radio polarimetry

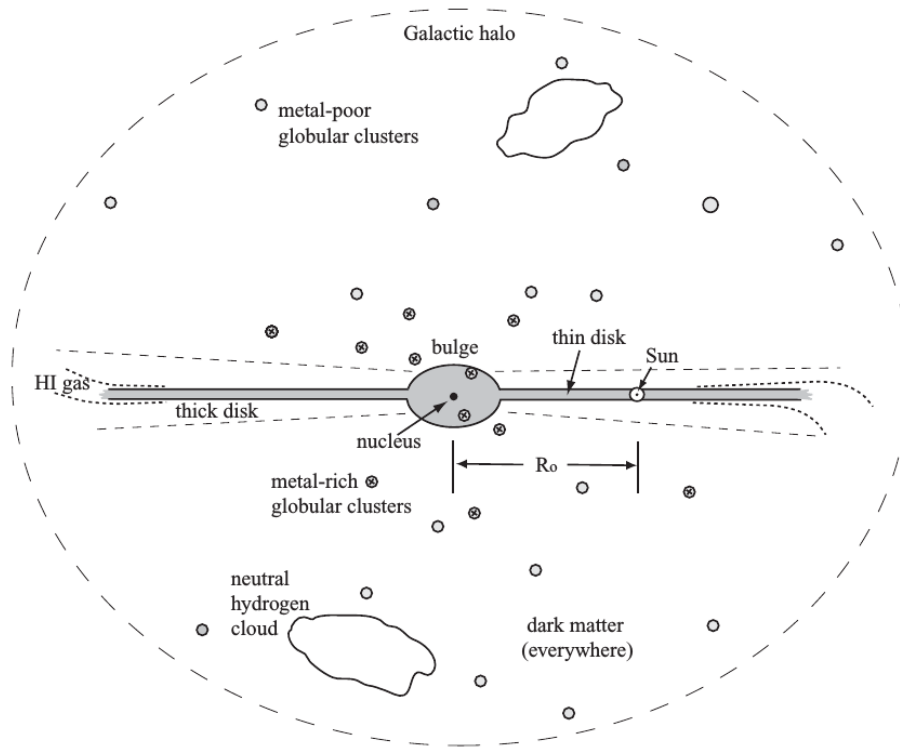
Sadržaj

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Uvod | 1 |
| 1.1 | Mliječni put - naša galaksija | 1 |
| 1.2 | Međuzvezdana materija | 2 |
| 1.3 | Promatranje međuzvezdane materije | 4 |
| 1.3.1 | Sinkrotronsko zračenje | 5 |
| 1.3.2 | Faradayeva rotacija | 7 |
| 1.4 | Strukture i filamenti otkriveni u 3C196 polju i motivacija za diplomski rad | 9 |
| 2 | Opazanja i podaci | 12 |
| 2.1 | LOFAR-ova opazanja | 12 |
| 2.2 | Osnovna kalibracija | 13 |
| 2.3 | RM sinteza i Faradayeve kocke | 14 |
| 3 | Faradayeva rotacija u ionosferi i usklađivanje različitih mjerenja | 17 |
| 3.1 | Korekcija na temelju TEC podataka i preciznost koja se postiže | 17 |
| 3.2 | Usporedba različitih mjerenja i korekcija | 17 |
| 4 | Mjerenje vlastitog gibanja filameta | 21 |
| 4.1 | Osnove mjerenja | 21 |
| 4.2 | Mjerenje s rezolucijom od tri lučne minute | 23 |
| 4.2.1 | Uspoređivanje na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$ | 23 |
| 4.2.2 | Uspoređivanje pomoću maksimalnih intenziteta | 26 |
| 4.3 | Mjerenje s rezolucijom od jedne lučne minute | 29 |
| 5 | Diskusija i zaključak | 31 |
| | Literatura | 33 |

1 Uvod

1.1 Mliječni put - naša galaksija

Naše Sunce je samo jedna od nekoliko stotina milijardi zvijezda koje su dio spiralne galaksije po imenu Mliječni put čiji je shematski prikaz na slici 1.1. Sunce se nalazi



Slika 1.1: Shematski prikaz Mliječnog puta. Preuzeto iz [1].

u relativno tankom zvjezdanom disku. Isti se može vidjeti duž noćnog neba kao svijetli pojas velikog broja zvijezda s tamnim područjima koja su uzrokovana velikim koncentracijama prašine i gustog plina. Luminozitet diska je $(15 - 20) \times 10^9 L_{\odot}$ pri čemu je masa zvijezda u istomu oko $60 \times 10^9 M_{\odot}$ [1]. U smjeru centra galaksije vidi se svjetlosno ispupčenje (eng. *bulge*) ispod i iznad diska. Ispupčenje je gusta nakupina zvijezda koje u centru sadrži supermasivnu crnu rupu s masom $M_{\text{SMBH}} \approx 4 \times 10^6 M_{\odot}$ [1]. Centralno ispupčenje ima radijus od nekoliko kpc dok se zvjezdani disk proteže do radijusa od najmanje 15 kpc. Sunce se nalazi na oko 8 kpc od centra galaksije. Luminozitet ispupčenja je $L \approx 10^9 L_{\odot}$, a sadrži ukupnu masu zvijezda od oko $20 \times 10^9 M_{\odot}$ [1].

Postoje dva dijela zvjezdanog diska: tanki disk (eng. *thin disc*) i debeli disk (eng. *thick disc*). Tanki disk sadrži 95% zvijezda koje su većinom mlade i masivne, a njegova

visinska skala (udaljenost u smjeru okomito na disk za koju gustoća zvijezda padne za faktor e , od eng. *scale height*) iznosi 300–400 pc. Ostatak zvijezda nalazi se u debelom disku čija je visinska skala oko 1 kpc. Zvijezde u tom području su puno starije, a time sadrže i manje metala od onih u tankom disku. Većina plina i prašine nalazi se u vrlo tankom sloju oko središnje ravnine zvjezdanog diska pa se tako neutralni vodik u području oko Sunca nalazi unutar 100 pc od središnje ravnine. Debljina sloja plina oko ravnine diska se povećava s udaljenosti od galaktičkog centra.

Zvijezde u disku oko centra Mliječnog puta imaju gotovo kružne putanje s brzinama oko 200 km/s pri čemu su moguća mala dodatna nasumična gibanja od nekoliko desetaka kilometara u sekundi. Zvijezde u ispupčenju imaju puno veće nasumične brzine. Zvijezde i kuglasti skupovi metalno siromašnog galaktičkog haloa nemaju nikakvo organizirano gibanje oko centra Mliječnog puta te čine mali udio mase koja nije veća od $10^9 M_{\odot}$ [1]. Iz krivulja brzina zvijezda, kuglastih skupova, plina i prašine na većim udaljenostima, vidi se da ukupna masa Mliječnog puta mora biti puno veća od one koja dolazi od mase zvijezda, plina i prašine. Porijeklo dodatne mase nije poznato te se naziva tamna materija i područje je aktivnog istraživanja.

Najveći dio volumena Mliječnog puta je bez zvijezda te je ispunjen plinom i prašinom, tzv. međuzvjezdanom materijom opisanom u sljedećem potpoglavlju. Masa plina i prašine čini samo oko 10% ukupne zvjezdane mase u galaksiji [1].

1.2 Međuzvjezdana materija

Galaktička međuzvjezdana materija (ISM; od eng. *Interstellar Medium*) sastoji se uglavnom od hladnog, toplog i vrućeg termalnog plina u mješavini neutralnih, ioniziranih, atomskih i molekularnih komponenti. Također je prisutno i sveprožimajuće magnetsko polje. S obzirom na ulogu gravitacije razlikujemo molekularne oblake unutar kojih je gravitacija dominantna sila te difuzni ISM gdje je gravitacija gotovo zanemariva. Mliječna staza vjerojatno sadrži $(4 - 8) \times 10^9 M_{\odot}$ neutralnog vodika HI te upola toliko molekularnog H_2 [1]. Gotovo sav H_2 i nešto manje od polovice HI leže unutar Sunčeve orbite oko centra galaksije i to najviše u spiralnim krakovima. Najzastupljenija molekula poslije H_2 je ugljikov monoksid CO i otprilike na jednu molekulu CO imamo 10^4 molekula H_2 [1]. U hladnom međuzvjezdanom plinu na 10^{12} atoma vodika dolazi samo jedno zrnice prašine [1].

Kod difuznog ISM-a razlikujemo 5 faza [2]. Budući da je za ovaj rad bitno i magnetsko polje, uz svaku fazu ćemo navesti načine na koje možemo odrediti jačinu istog. Prve dvije faze su hladna i topla neutralna materija (CNM i WNM; od eng. *Cold Neutral Medium* i *Warm Neutral Medium*) s temperaturama od ≈ 50 K odnosno 5000 K. Magnetska polja u ovim fazama možemo mjeriti samo Zeemanovim razdvajanjem spektralnih linija te linearnom polarizacijom zrnaca prašine. Druge dvije faze su topla i vruća ionizirana materija (WIM i HIM; od eng. *Warm Ionized Medium* i *Hot Ionized Medium*) s temperaturama od ≈ 8000 K odnosno $\geq 10^6$ K. Informaciju o magnetskom polju u ovim fazama možemo dobiti Faradayevom tomografijom, koja će kasnije biti objašnjena, te mjerenjem Zeemanovog razdvajanja kod WIM faze. Navedene 4 faze često se zovu i “klasične faze” budući da je postojanje istih detaljno potvrđeno mjerenjima. Peta faza je tzv. topla djelomično ionizirana materija (WPIM; od eng. *Warm Partially Ionized Medium*) s temperaturama nešto nižim od gore navedene WIM faze i kreću se oko ≈ 5000 K. WPIM faza još uvijek nije detaljno potvrđena mjerenjima, ali sve je veća potreba za uvođenjem iste. Magnetska polja u toj fazi mogu se isto mjeriti Faradayevom rotacijom. 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, tj. vrijedi ekviparticipija energije. Za detaljan opis vidi [2].

ISM prolazi kroz prethodno opisane faze u zatvorenom ciklusu. Kada se HI ohladi ili biva komprimiran, prvo ulazi u hladnu fazu. Kada oblaci atoma HI postanu dovoljno gusti da UV svjetlo ne može prodirati duboko u njihove unutrašnjosti, H_2 se formira na zrcima prašine. Zatim molekularni oblaci gube toplinu i postupno se stežu te dolazi do stvaranja novih zvijezda. Novonastale zvijezde svojim zračenjem uništavaju preostali okolni H_2 te nastaje HI, a potom i HII područje.

Za određivanje distribucije i svojstava ISM-a koristimo brojne metode bazirane na analizi promatranja u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra. Kratki pregled glavnih fizikalnih procesa odgovornih za zračenja, koja nam omogućavaju detekciju međuzvjezdane materije, dan je u sljedećem potpoglavlju.

1.3 Promatranje međuzvezdane materije

Plin i prašinu u ISM-u možemo promatrati jer isti apsorbiraju ili emitiraju elektromagnetsko zračenje. Zračenje plina potječe od ioniziranih ili neutralnih atoma te od molekula. Ono može biti kontinuirana emisija ili spektar s apsorpcijskim/emisijskim linijama.

Atomi i ioni mogu izračiti foton energije prijelazom elektrona iz višeg u niži energetski nivo pri čemu foton ima energiju koja odgovara razlici energija ta dva nivoa. Atomi i ioni se pobuđuju i ioniziraju fotonima ili sudarima s drugim atomima i česticama. Elektron uhvaćen u ion obično se nalazi u nekom od pobuđenih stanja pa kaskadno prelazi do osnovnog stanja pri čemu se također emitira tzv. rekombinacijsko zračenje [3]. Primjer za to su HII područja oko vrućih zvijezda gdje prilikom rekombinacije protona i elektrona imamo prijelaz elektrona iz pobuđenog stanja $n = 3$ u niže stanje $n = 2$ pritom emitirajući tzv. H-alpha foton (ta spektralna linija služi za detekciju HII područja) valne duljine 656 nm. Također, kod težih elemenata možemo vidjeti i zračenje u rendgenskom dijelu spektra kao što je to slučaj u vrlo vrućem plinu kod Fe^{+24} (24 puta ionizirano željezo) gdje se emitira 6.7 keV K spektralna linija [1].

Sljedeća kategorija prijelaza koje možemo detektirati su prijelazi fine strukture koji reflektiraju međudjelovanje kutne količine gibanja elektrona i spina istoga. Energetske razlike u ovim nivoima su puno manje nego kod prethodno opisanih prijelaza između glavnih nivoa elektrona. Zbog toga, kod neutralnih atoma i manje puta ioniziranih atoma, imamo prijelaze koji oslobađaju fotone u dalekom infracrvenom području. Primjer su linije jednostruko ioniziranog ugljika CII na $158 \mu\text{m}$ i linije neutralnog kisika na $63 \mu\text{m}$ i $145 \mu\text{m}$ koje nose najviše energije izračene atomskim plinom Mliječnog puta pri 100 K [1].

Važni prijelazi su i hiperfina prijelazi. Isti su posljedica međudjelovanja spina jezgre i spina elektrona koji oko nje kruži. Njihovi nivoi međusobno imaju za 2000 puta manje energetske razlike od nivoa fine strukture te se radi o prijelazima koji pripadaju radiopodručju. Najvažniji prijelaz je neutralna vodikova linija koja nastaje prilikom prelaska iz pobuđenog stanja (paralelni spinovi elektrona i protona) u niže stanje (antiparalelni spinovi elektrona i protona) i ima valnu duljinu 21 cm. Prosječnom atomu vodika se takav spontani prijelaz događa jednom u 11 milijuna godina, no pošto je vodik sveprisutan u svemiru, lako se detektira i jako je važan za proučavanje svemira [4].

Molekule, uz to što zrače kao i atomi prelaskom elektrona iz pobuđenog stanja u niže stanje, emitiraju elektromagnetsko zračenje i vibracijama, i rotacijama oko centra mase [3]. Vibracijski i rotacijski energetske nivoi su također kvantizirani. Vibracijski nivoi manjih molekula, kao što su CO, HCN i CS, razmaknuti su u energijama koje odgovaraju emisiji fotona valne duljine od nekoliko mikrona dok su rotacijski prijelazi u milimetarskom području. H₂ molekula često je pobuđena UV zračenjem dok se druge molekule pobuđuju uglavnom sudarima. Za CO, najzastupljeniju molekulu poslije H₂, rotacijski prijelazi na 1.3 mm i 2.6 mm obično su najjači pri gustoćama $n(\text{H}_2) \approx 100 - 1000 \text{ cm}^{-3}$ i za pobuđenje zahtijevaju samo $T \approx 10 - 20 \text{ K}$ [1].

Oko 1% mase ISM-a odgovara česticama prašine, uglavnom silikatima i raznim oblicima ugljika manjim od $\approx 1 \mu\text{m}$. Ova zrnca efektivno apsorbiraju i raspršuju zračenje na valnim duljinama manjim od njihovih vlastitih dimenzija. Prašina zagrijana difuznim zvjezdanim zračenjem ima temperaturu $T \approx 10 - 20 \text{ K}$ što je vidljivo u infracrvenom dijelu spektra na $\approx 200 \mu\text{m}$ [1].

Za proučavanje fizikalnih procesa u svemiru bitno je i tzv. zakočno zračenje (eng. *braking radiation*; poznato i kao *bremstrahlung*). Ono nastaje kada električne sile iona djeluju na slobodne elektrone koji prolaze u blizini i zakreću ih na zakrivljene putanje prilikom čega dolazi do zračenja elektrona. Za vrući plin u središtu Mliječnog puta imamo temperature od $T \approx 10^7 - 10^8 \text{ K}$ te je u takvim uvjetima zakočno zračenje u rendgenskom području, dok ionizirani HII oko vrućih zvijezda na temperaturi od $T \approx 10^4 \text{ K}$ proizvodi zakočno zračenje u radiopodručju [4]. Magnetska polja također mogu prisiliti elektrone na zakrivljene putanje te, ako se gibaju ultrarelativističkim brzinama, imamo tzv. sinkrotronsko zračenje. Ono je glavni izvor kontinuiranog zračenja u radiopodručju. Sinkrotronsko zračenje je linearno polarizirano i važno je za određivanje distribucije i svojstava ISM-a. Ovaj rad se bazira na sinkrotronskom zračenju naše galaksije pa slijedi kratki opis istoga.

1.3.1 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:

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

gdje je k normalizacijska konstanta, a γ eksponent. Ako se uzme u obzir efekt apsorpcije unutar plazme samog emitera (samoapsorpcija), za specifični intenzitet zračenja imamo [3]:

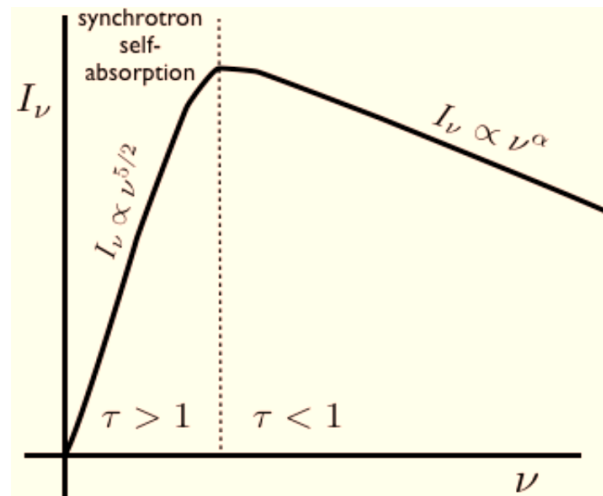
$$I_\nu \propto \nu^{5/2} \quad \text{ako } \tau_\nu \gg 1, \quad (1.2)$$

$$I_\nu \propto \nu^\alpha \quad \text{ako } \tau_\nu \ll 1, \quad (1.3)$$

gdje je τ_ν optička dubina, a α spektralni indeks izražen preko eksponenta γ :

$$\alpha = \frac{1 - \gamma}{2}. \quad (1.4)$$

Specifični intenzitet sinkrotronskog zračenja prikazan je na slici 1.2. Efekt samoap-



Slika 1.2: Specifični intenzitet sinkrotronskog zračenja s uključenim efektom samoapsorpcije na nižim frekvencijama. Preuzeto iz [5].

sorpcije 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 (1.2). Na višim frekvencijama imamo relaciju (1.3) jer emitirajući medij postaje optički tanak ($\tau_\nu \ll 1$) za samoapsorpciju pa spektar ovisi o energetskej raspodjeli nabijenih čestica.

Sinkrotronsko zračenje je linearno polarizirano, a intrinzični stupanj polarizacije

je dan sa [6]:

$$p = \frac{3\gamma + 3}{3\gamma + 7}, \quad (1.5)$$

gdje je γ od prije navedeni eksponent u energetskej distribuciji relativističkih elektrona. Iz mjerenja maglice Rakovica [7] i [8] određeno je da je $\gamma \approx \frac{5}{3}$ što nam daje stupanj intrinzične polarizacije od oko 70% (neovisno o frekvenciji). U promatranjima se ne mora nužno uvijek izmjeriti ukupno intrinzično polarizirano zračenje. Ovisno o frekvenciji na kojoj promatramo, veći dio zračenja može biti depolariziran zbog procesa Faradayeve rotacije koji se događa u međuzvezdanom prostoru, a detaljno je objašnjen u sljedećem potpoglavlju.

1.3.2 Faradayeva rotacija

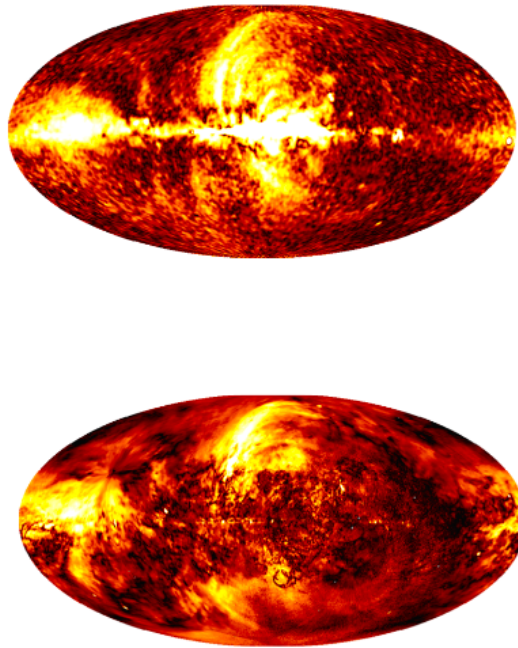
Faradayeva rotacija je proces zakretanja ravnine polarizacije sinkrotronskog zračenja pri prolasku kroz ioniziranu međuzvezdanu materiju prožetu magnetskim poljem, a isti se može objasniti razlikom indeksa loma koji vide dva kružno polarizirana propagacijska vala. Linearno polarizirani elektromagnetski 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 zbog čega se pojavljuje fazni pomak među njima. Nakon što su dvije zrake opet zbrojene, rezultat je opet linearno polarizirani val, ali s drugim kutom polarizacije (ravnina polarizacije je dodatno rotirana). Kut polarizacije je proporcionalan kvadratu valne duljine [4]:

$$\chi(\lambda^2) = \chi_0 + \text{RM} \cdot \lambda^2, \quad (1.6)$$

gdje je RM mjera rotacije (eng. *Rotation Measure*), a u CGS sustavu je dana izrazom:

$$\text{RM} = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int_0^d n_e(s) B_{\parallel}(s) ds, \quad (1.7)$$

pri čemu su e i m naboj i masa elektrona, $n_e(s)$ gustoća elektrona u svakoj točki duž puta s i $B_{\parallel}(s)$ komponenta magnetskog polja u smjeru propagacije EM vala u svakoj točki s . Primjer ovisnosti Faradayeve rotacije o kvadratu valne duljine prikazan je na slici 1.3. Na slici vidimo dobro slaganje između polarizacijskih karti naše galaksije na 22.8 GHz i 1.4 GHz u području izvan galaktičke ravnine, ali niskofrekvencijska



Slika 1.3: 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. Preuzeto iz [9].

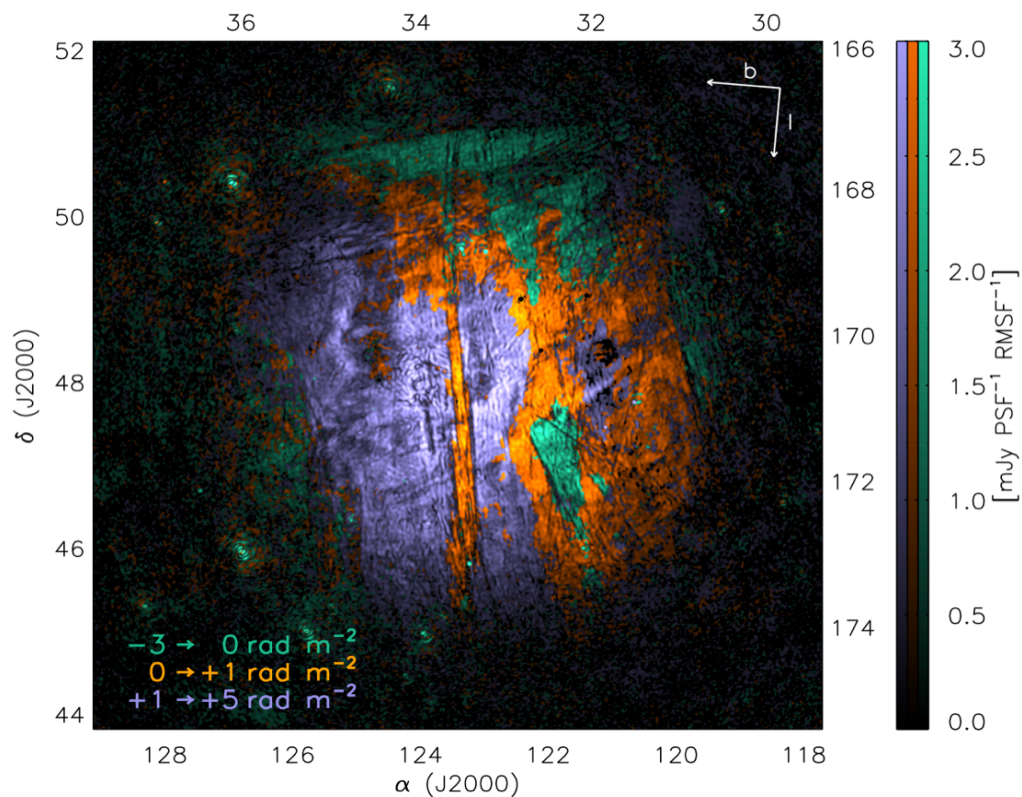
karta pokazuje puno veću depolarizaciju duž galaktičke ravnine. To je i očekivano budući da je Faradayeva rotacija proporcionalna kvadratu valne duljine i puno je jači utjecaj iste na manjim frekvencijama (većim valnim duljinama) pa je i depolarizacija izraženija. Uzrok depolarizaciji je diferencijalna Faradayeva rotacija koja mijenja koherentnost polariziranog zračenja. Naime, u različitim točkama duž doglednice će polarizirani kutevi sinkrotronskog zračenja biti zakrenuti za različite vrijednosti te se time gubi koherencija intrinzično polariziranog zračenja.

Na niskim radiofrekvencijama (100 – 200 MHz) za očekivati je da će većina polariziranog sinkrotronskog zračenja naše galaksije biti depolarizirano ($P \lesssim 3\%$), tj. da nećemo biti u mogućnosti detektirati polarizirano zračenje. Ipak, nedavna mjerenja s radioteleskopima LOFAR (eng. *Low Frequency Array*) [10], [11] i [12], i MWA (eng. *Murchison Widefield Array*) [13] i [14] pokazala su suprotno. Visoka osjetljivost korištenih radiointeferometara na širokom pojasu frekvencija i njihova odlična kutna razlučivost pokazale su se ključnim za detekciju relativno slabog polariziranog zračenja na niskim radiofrekvencijama. Detekciji je pridonijela i metoda RM sinteze (eng. *Rotation Measure Synthesis*) [15] koja nam omogućuje raspjetljavanje promatranog radiozračenja na različite komponente polarizacije. Na taj način možemo napraviti tomografiju ionizirane međuzvjedane materije i magnetskog polja

duž doglednice, zaslužnih za Faradayevu rotaciju sinkrotronskog zračenja. Na niskim radiofrekvencijama (100 – 200 MHz) ova metoda je posebno osjetljiva na vrlo male gustoće ISM-a koje ne možemo istraživati na višim radiofrekvencijama, a bit će detaljno opisana u potpoglavlju 2.3.

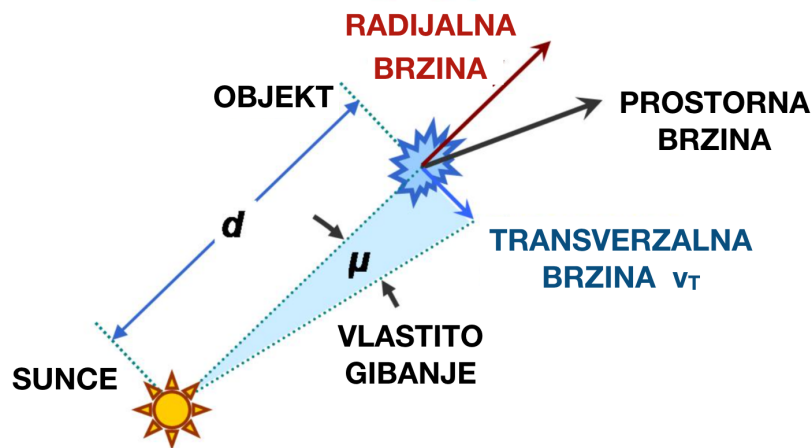
1.4 Strukture i filamenti otkriveni u 3C196 polju i motivacija za diplomski rad

Najzanimljivije strukture u nedavnim LOFAR-ovim promatranjima polariziranog sinkrotronskog zračenja naše galaksije detektirane su u 3C196 polju [11], centriranom na istoimenoj, vrlo sjajnoj radiogalaksiji. Polje se nalazi na višim galaktičkim širinama ($b=+33^\circ$) u “hladnijem” dijelu galaktičkog haloa, tj. područja koje ne pokazuje pretjerano sjajno sinkrotronsko zračenje. RM sintezom raspetljano, polarizirano zračenje pokazuje strukture na Faradayevim dubinama između -3 i $+5$ rad m^{-2} te je prikazano na slici 1.4. Poljem dominira relativno ravni filament, dužine nekoliko



Slika 1.4: 3C196 polje prikazano u 3 sloja u rasponu Faradayeve dubine od -3 do $+5$ 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. Preuzeto iz [11].

stupnjeva na nebeskoj sferi, koji zakreće ravninu polarizacije pozadinskog sinkrotronskog zračenja za 1 rad m^{-2} . Najvjerojatnije se radi o ioniziranoj međuzvezdanoj materiji koja se nalazi unutar 100 pc od nas [11]. Porijeklo tako ravnog i relativno dugačkog filameta još uvijek je velika nepoznanica. Pretpostavlja se da je filament povezan s anizotropnim magnetohidrodinamičkim procesima u turbulentnoj međuzvezdanoj materiji koja je izložena relativno slabom ($1 \mu\text{G}$), ali istovremeno pravilno uređenom magnetskom polju [16]. S druge strane, moguće je i da se radi o efektu projekcije vrlo komplicirane 3D raspodjele međuzvezdane materije u našoj galaksiji. Da bi se ovo razjasnilo, potrebno je odrediti što više fizikalnih karakteristika promatranih struktura, a između ostalog i točniju udaljenost do njih te njihovo vlastito gibanje unutar naše galaksije.



Slika 1.5: Odnos između vlastitog gibanja i komponenti brzine objekta. Slika ilustrira kut μ prebrisan u jedinici vremena transverzalnom brzinom v_t . Preuzeto iz [17].

Cilj ovog rada je pokušati izmjeriti vlastito gibanje (eng. *proper motion*) centralnog filameta, otkrivenog u 3C196 polju, diferencijalnom analizom njegovog položaja korištenjem LOFAR-ovih promatranja uzetih kroz period od nekoliko godina. Odnos vlastitog gibanja i komponenti brzine nekog objekta u svemiru dan je na slici 1.5. Vlastito gibanje ima dimenzije kuta u vremenu, tipično u lučnim sekundama na godinu dana, a dano je izrazom:

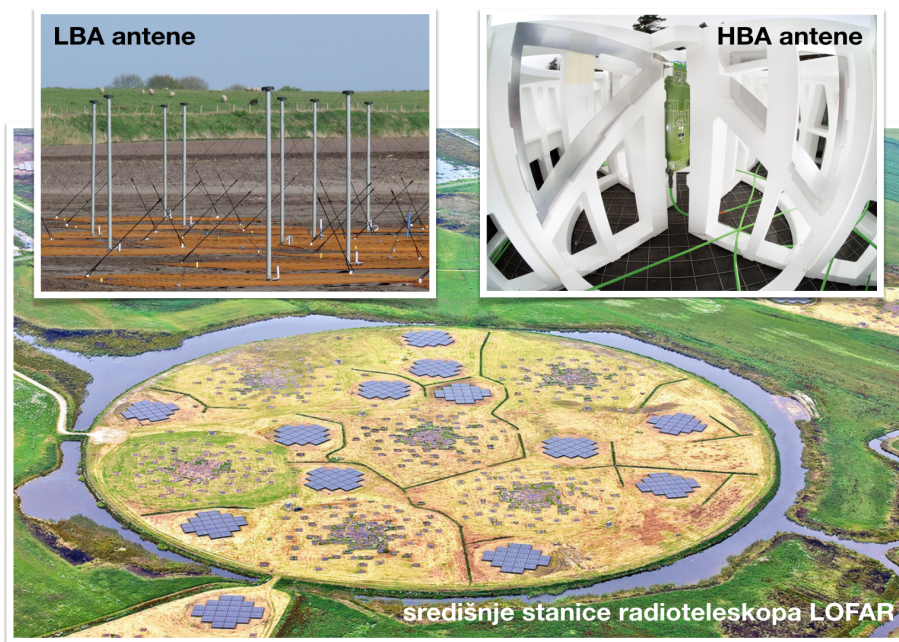
$$\mu[\text{''}/\text{god.}] = 0.21 \cdot \frac{v_T[\text{km/s}]}{d[\text{pc}]}, \quad (1.8)$$

gdje su v_t transverzalna brzina (eng. *transverse velocity*) dana u jedinicama km/s, i d udaljenost objekta u pc. Poznavanjem vlastitog gibanja, radijalne brzine (eng. *radial velocity*) i udaljenosti do nekog svemirskog objekta, omogućeno nam je računanje pravog gibanja istoga u odnosu na Sunce (transformacijom koordinatnog sustava možemo dobiti gibanje i u odnosu na Mliječni put). Ako pretpostavimo da je filament na udaljenosti od 50 pc i ima transverzalnu brzinu od 50 km/s, očekujemo da će se pomaknuti za $50 \cdot 10^{-6}$ pc/god., odnosno 0.2"/god. S obzirom da je filament vrlo dugačak, ravan i dobro definiran, očekujemo da bi ovakav mali pomak ipak mogli detektirati u slikama čija je rezolucija manja od očekivanog pomaka.

U poglavlju 2 prezentirana su LOFAR-ova opažanja korištena za analizu, objašnjeni su osnovni koraci kalibracije te metoda tehnike RM sinteze i izrade Faradayevih kocki. Poglavlje 3 opisuje i prezentira rezultate vezane za Faradayevu rotaciju u ionosferi i međusobno usklađivanje mjerenja. U poglavlju 4 objašnjeni su način izoliranja filameta i mjerenja pomaka uspoređivanjem na zadanoj Faradayevoj dubini te pomoću maksimalnih intenziteta duž Faradayeve dubine. Rad završava diskusijom i zaključcima danim u poglavlju 5.

2 Opažanja i podaci

2.1 LOFAR-ova opažanja



Slika 2.1: Radioteleskop LOFAR (Nizozemska) s prikazanim HBA i LBA antenama. Preuzeto iz [19].

Za mjerenje vlastitog gibanja filameta, koji se pruža po sredini 3C196 polja, koristili smo tri LOFAR-ova interferometrijska i polarimetrijska promatranja međusobno vremenski razmaknuta jednu i tri, odnosno četiri godine. Promatranja su napravljena s LOFAR-ovim HBA antenama (HBA; od eng. *High Band Antenna*) koje mogu mjeriti u frekvencijskom području od 110 do 190 MHz [18]. Antene su međusobno organizirane u LOFAR-ove stanice. Raspoređene su po većem dijelu Europe, a samo središte radioteleskopa (vidi sliku 2.1) nalazi se u sjeveroistočnom dijelu Nizozemske, gdje ih ujedno ima i najviše. Unutar jedne tipične LOFAR-ove stanice, HBA antene su organizirane u 48 elemenata od kojih svaki ima 16 parova dipolnih antena oblika “leptir mašne”. S obzirom na to da unutar Nizozemske ima 38 LOFAR-ovih stanica, oko 30000 parova dipolnih antena se istovremeno koristi za promatranje. Uz HBA antene, svaka LOFAR-ova stanica ima i LBA antene (LBA; od eng. *Low Band Antenna*) koje mogu mjeriti u još nižem radiopodručju i to na frekvencijama od 30 do 80 MHz.

Promatranja korištena u ovom radu uzeta su u tzv. HBA DUAL INNER konfiguraciji [18], pri kojoj efektivno imamo 62 virtualne LOFAR-ove stanice u Nizozemskoj s 24 HBA elementa u svakoj virtualnoj stanici. Promatranja su uzeta u prosincu 2012.,

2013. i 2016. godine (oznake promatranja: L80508 - 16.12.2012., L192832 - 15.12.2013. i L560081 - 11.12.2016.) te je ukupna integracija prvog promatranja trajala 8 h, a druga dva promatranja je bila 6 h. Mjereno je u frekvencijskom području od 115 MHz do 189 MHz sa 380 pojaseva širine 195.3125 kHz. Svaki pojas je dodatno podijeljen na 64 frekvencijska kanala. Vrijeme integracije korelatora je bilo 2 s.

Sva promatranja koja smo koristili za našu analizu bila su već kalibrirana, a pripadajuće slike izrađene. Osnovni koraci kalibracije i izrade slika opisani su u sljedećem potpoglavlju dok za detalje vidi u [11].

2.2 Osnovna kalibracija

Prvi korak u obradi promatranja je uklanjanje nepoželjnih radiosmetnji skraćenog naziva RFI (eng. *Radio Frequency Interference*). To su izvori zračenja kao što su odašiljači televizijskih, mobilnih i radio operatera. U frekventnom rasponu 115 – 177 MHz u prosjeku je samo oko 3% podataka kontaminirano, ali na frekvencijama većim od 177 MHz kontaminiranost je veća od 40%. Detalji okoliša RFI smetnji u LOFAR-ovim promatranjima, kao i metode njihove eliminacije, opisane su u [20].

Nakon što su radiosmetnje uklonjene, podaci se usrednjavaju po frekvencijskim pojasevima i u vremenu. Prije tog procesa su zbog rubnih efekata frekvencijskog filtera uklonjena po 4 rubna kanala od početnih 64, koliko ih ima u svakom pojasu. Konačni podaci imaju spektralnu rezoluciju od 183 kHz i vremensku rezoluciju od 10 s.

Kalibracija se provodi u dva koraka. Prvi korak je pozicijski neovisna kalibracija za svaki pojas posebno prema 3C196 izvoru. Uz poznati intenzitet tog izvora (84 ± 2 Jy na 150 MHz) [21] omogućeno je ispravljanje grešaka frekventne ovisnosti intenziteta i grešaka u fazi zbog ionosfere. Sljedeći korak je pozicijski ovisna kalibracija uz pomoć 8 dodatnih svijetlih izvora (> 2 Jy na 150 MHz) koji se nalaze unutar 2.5° od 3C196. Time se ispravljaju vremenske varijacije u polariziranom intenzitetu i vremenski pomaci u ionosferi koji ovise o poziciji. Na kraju se svih 9 izvora ukloni iz promatranja. Bitni korak u dobivanju konačne slike je uzimanje u obzir i Faradayeve rotacije u ionosferi, koja će biti detaljno objašnjena u potpoglavlju 3.1.

Nakon kalibracije, izrađene su slike različitih rezolucija za sve Stokes parametre (IQUV). Rezolucija slike ovisi o udaljenosti različitih kombinacija i broja parova

LOFAR-ovih stanica čija mjerenja se koriste za izradu slike. Rezolucija slike proporcionalna je valnoj duljini promatranja i obrnuto je proporcionalna najvećoj udaljenosti između dva para LOFAR-ovih stanica čija se mjerenja koriste za izradu slike (rezolucija slike¹ $\sim 0.8 \cdot \lambda/L$). Također, što se koristi veći broj mjerenja različitih parova stanica to će slika imati veću osjetljivost.

Za sva mjerenja izrađene su slike rezolucije od oko tri lučne minute, koristeći parove stanica međusobno udaljene između 10 i 800 valnih duljina. Također, za prvo i zadnje promatranje napravljene su slike rezolucije od jedne lučne minute koristeći parove stanica međusobno udaljene između 10 i 4000 valnih duljina. Korištena je Briggs težinska raspodjela mjerenja s parametrom robustnosti 0. Prosječno vidno polje svake slike je oko 5°.

2.3 RM sinteza i Faradayeve kocke

Kako bismo raspetljali linearno polarizirano sinkrotronsko zračenje naše galaksije kao funkciju Faradayeve dubine Φ , primjenili smo tehniku RM sinteze na izrađenim gotovim slikama danim za Stokes Q i U parametre na različitim frekvencijama. Faradayeva dubina je definirana kao [15]:

$$\frac{\Phi}{[\text{rad m}^{-2}]} = 0.81 \int_{\text{izvor}}^{\text{promatrač}} \frac{n_e}{[\text{cm}^{-3}]} \frac{B_{\parallel}}{[\mu\text{G}]} \frac{dl}{[\text{pc}]}, \quad (2.1)$$

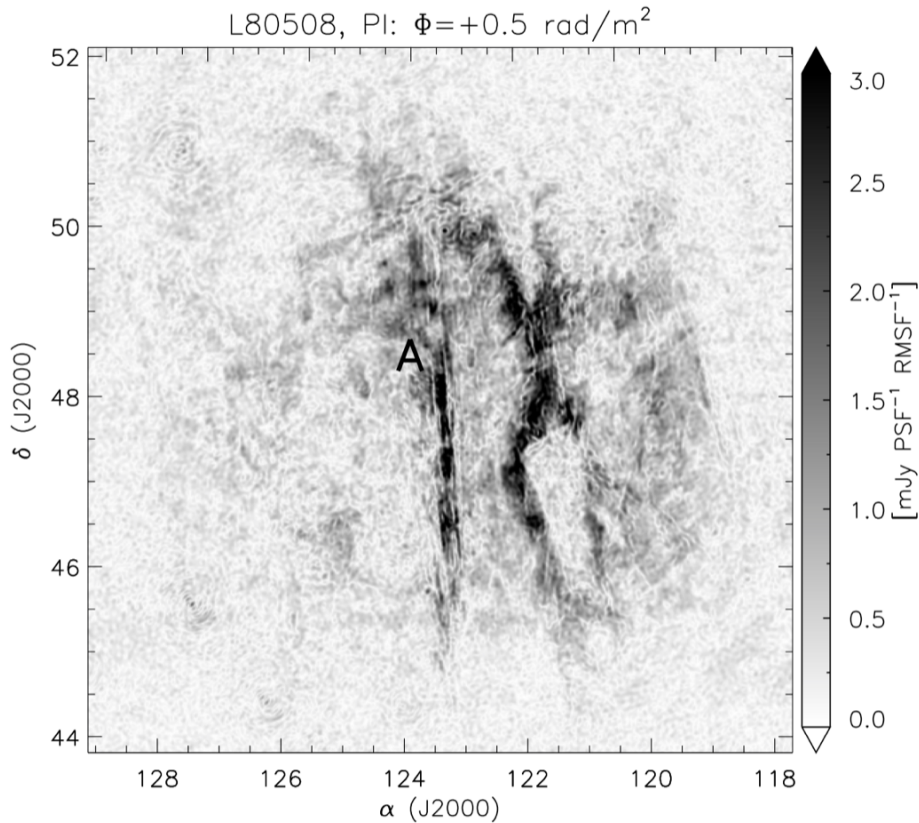
gdje je n_e gustoća elektrona, B_{\parallel} komponenta magnetskog polja paralelna doglednici dl i integral je izvrjednjen duž cijele putanje od izvora do promatrača. Pozitivna Faradayeva dubina implicira komponentu magnetskog polja usmjerenu prema nama, a negativna znači da je usmjerena od nas. LOFAR-om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

$$F(\Phi) = \frac{1}{W(\lambda^2)} \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda^2) e^{-i2\Phi\lambda^2} d\lambda^2, \quad (2.2)$$

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 ograničena je spektralnom pojasnom širinom ($\Delta\lambda^2$), spektralnom rezolucijom ($\delta\lambda^2$) i minimumom (λ_{min}^2) od λ^2 distribucije. Sva tri navedena parametra povezana su s tri fizi-

¹<https://www.astron.nl/radio-observatory/astronomers/lofar-imaging-capabilities-sensitivity/lofar-imaging-capabilities/lofa>

kalne 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 $\delta\Phi \approx 2\sqrt{3}/\Delta\lambda^2$ koja definira minimalnu udaljenost između dvije različite strukture koje su detektabilne.



Slika 2.2: Prikaz 3C196 polja u intenzitetu polarizacije na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$. Veličina slike je $8.3^\circ \times 8.3^\circ$ sa PSF-om od $3.6' \times 3.9'$. Filament je označen slovom A.

Korištenjem gotovog Python koda², primjenjujemo RM sintezu na Stokes Q i U slikama od sva tri promatranja (L80508, L192832 i L560081) s 310 pojaseva frekvencija, koji imaju usporedive razine šuma, u području od 115 MHz do 175 MHz. Finalni rezultat su RM kocke različitih dimenzija. Kod svih promatranja s rezolucijom od tri lučne minute dimenzije su $1200 \times 1200 \times 201$ s pikselom veličine 30×30 lučnih sekundi. Kod RM kocki s rezolucijom od jedne lučne minute dimenzije su različite: L80508 je dimenzije $2880 \times 2880 \times 81$, a L560081 dimenzije $2400 \times 2400 \times 201$ s pikselom veličine 15×15 lučnih sekundi. Svaka kocka, uz deklinaciju i rektascenziju, ima Faradayevu dubinu kao treću koordinatu. Raspon Faradayeve dubine u kockama je od -25 rad

²<https://github.com/brentjens/rm-synthesis>

m^{-2} do $+25 \text{ rad m}^{-2}$ uz korake od 0.25 rad m^{-2} . Rezolucija u Faradayevom prostoru kocki definirana je širinom RMSF (eng. *Rotation Measure Spread Function*) [15] te iznosi $\delta\Phi = 0.9 \text{ rad m}^{-2}$, 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 ($\lambda^2 \Delta\Phi_{\text{scale}} \ll 1$). Na slici 2.2 je primjer slike promatranja L80508 u intenzitetu polarizacije na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$.

RMS šuma kod L80508 i L192832 iznosi $71 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$ (PSF; od eng. *Point Spread Function*), a kod L560081 je nešto veći i iznosi $81 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Navedeno se odnosi na kocke s rezolucijom od tri lučne minute. Kocke s rezolucijom od jedne lučne minute imaju nešto manje iznose RMS šuma. Kod L80508 RMS šuma je $54 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$, a kod L560081 iznosi $61 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Navedeni RMS šuma se odnose na šum u ukupnom polariziranom zračenju $PI = \sqrt{Q^2 + U^2}$. Šum u RM kockama je za \sqrt{N} manji nego šum na pojedinoj frekvenciji jer je Faradayev spektar rekonstruiran korištenjem informacije na svim frekvencijama/valnim duljinama.

3 Faradayeva rotacija u ionosferi i usklađivanje različitih mjerenja

3.1 Korekcija na temelju TEC podataka i preciznost koja se postiže

Elektromagnetski val, prolazeći kroz ionizirani medij s promjenjivim indeksom loma, ima vremenska kašnjenja u različitim dijelovima valne fronte. Ta kašnjenja su proporcionalna ukupnoj količini elektrona (TEC - integrirana gustoća elektrona duž doglednice kroz ionosferu pri čemu je $1 \text{ TEC} = 10^{16} \text{ e}^-/\text{m}^2$; od eng. *Total Electron Content*) i inverzno proporcionalna kvadratu frekvencije [10]. Ionosfera je, na frekvencijama na kojima radi LOFAR, dominantan izvor faznih grešaka. Linearni prostorni TEC gradijent uzrokuje pomak izvora na nebu.

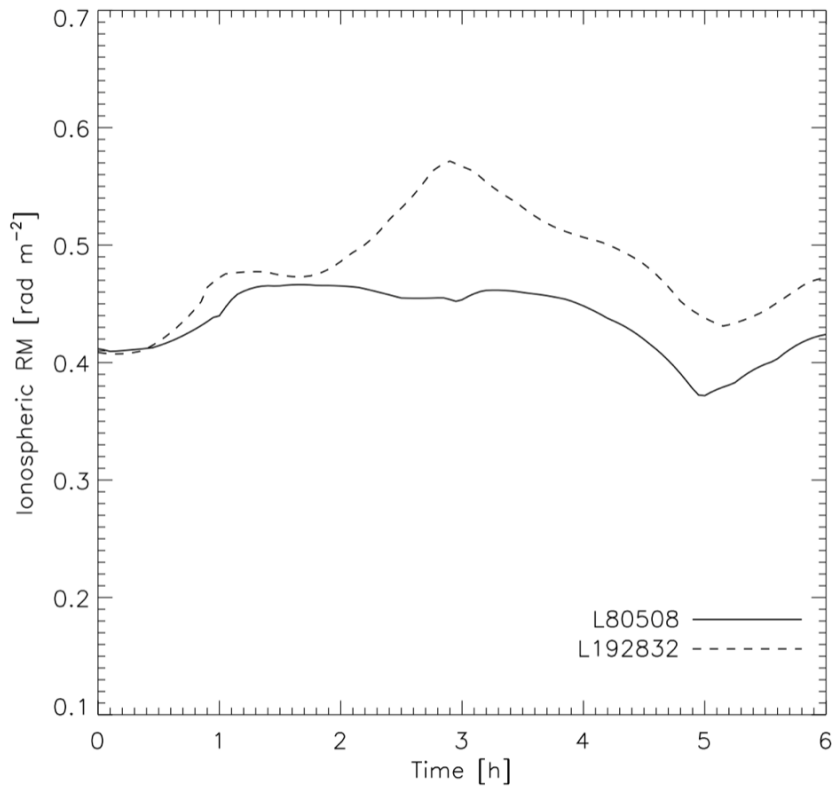
Pri obradi polarimetrijskih promatranja posebno se u obzir uzima Faradayeva rotacija u ionosferi jer je to efekt koji ovisi o vremenu i smjeru, a veličina toga je također proporcionalna ukupnom broju elektrona plazme u ionosferi. Ako se varijabilnost Faradayeve rotacije događa na vremenskoj skali koja je manja od ukupnog vremena integracije promatranja, dolazi do pomaka u Faradayevoj dubini i do djelomične dekorelacije polariziranog zračenja. Prosječni pomak u dubini je proporcionalan ionosferskom RM usrednjenom preko vremena promatranja. To se ispravlja tako što se predviđaju RM varijacije u ionosferi koristeći GIM³ (eng. *Global Ionospheric Maps*) i WMM⁴ (eng. *World Magnetic Model*). Detalji su opisani u [10], a RM varijacije za promatranja L80508 i L192832 prikazane su na slici 3.1. RM varijacije imaju neodređenosti od 1 TEC što odgovara grešci od oko 0.1 rad m^{-2} u Faradayevoj dubini. Naša mjerenja bila su korigirana na temelju TEC podataka za Faradayevu rotaciju u ionosferi pri već odrađenoj kalibraciji. Ipak, prije naše analize morali smo uskladiti različita mjerenja kao što je opisano u sljedećem potpoglavlju.

3.2 Usporedba različitih mjerenja i korekcija

Pošto želimo odrediti vlastito gibanje filameta (na slici 2.2 označen slovom A), uspoređujući dva promatranja u razmaku od jedne (L80508 i L192832) i od četiri godine (L80508 i L560081), moramo biti sigurni da su strukture koje uspoređujemo

³<http://aiuws.unibe.ch/ionosphere>

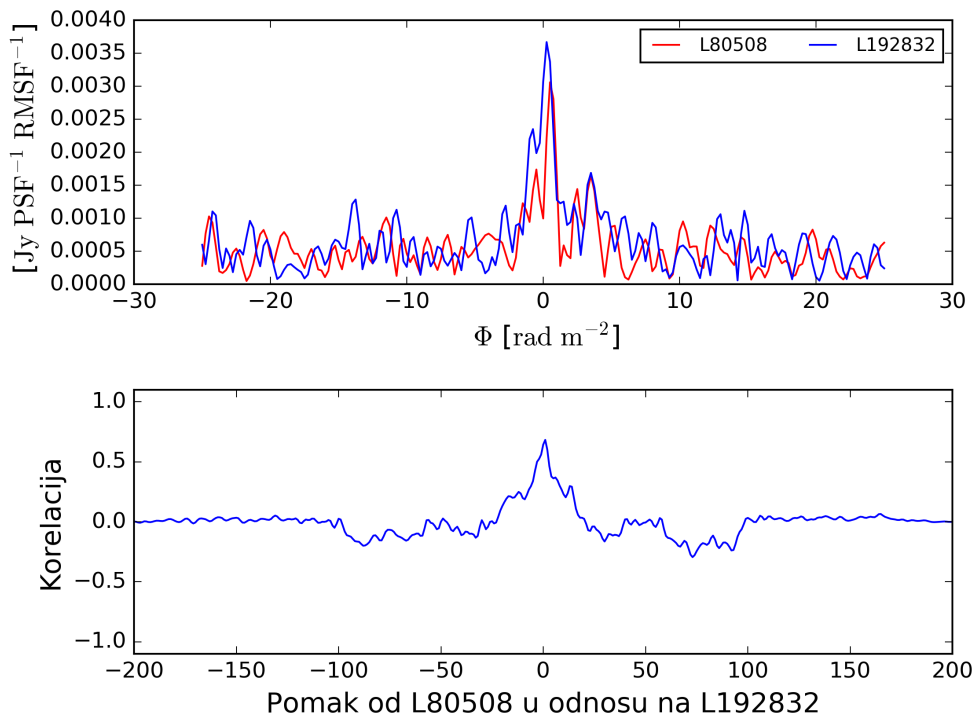
⁴<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>



Slika 3.1: Procijenjene RM varijacije u ionosferi iz ionosferskih mapa (GIM). RM varijacije su dane kao funkcija vremena promatranja za svaku noć. Preuzeto iz [11].

na istoj Faradayevoj dubini. Iako je utjecaj ionosfere odračunat pri obradi promatranja, svejedno može postojati manji pomak između kocki u Faradayevoj dubini zbog različitih uvjeta u ionosferi i instrumentaciji za vrijeme promatranja, te sistematskih grešaka TEC mapa. Pomak određujemo tako što računamo Pearsonov koeficijent korelacije [22] 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 polarizacije veći od 4 standardne devijacije šuma. Primjer navedenog je za jedan piksel dan na slici 3.2. Vidimo da postoji razlika u intenzitetu maksimuma kao i da postoji pomak između dva mjerenja. Na kraju usrednjavamo korelacije dobivene za sve piksele koji zadovoljavaju uvjet (maksimum fluksa bar 4 puta veći od standardne devijacije šuma) i radimo prilagodbu Gaussijana oblika:

$$y = y_1 + y_0 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2}. \quad (3.1)$$

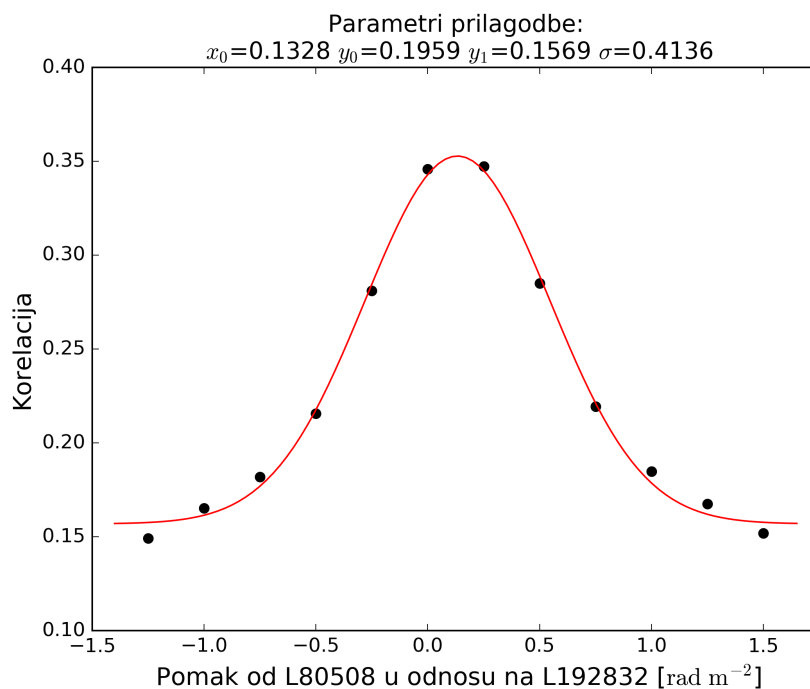


Slika 3.2: Primjer Faradayevog spektra za piksel (600,600) u dvije različite RM kocke (gore) i korelacija između ta dva spektra kao funkcija pomaka duž Faradayeve dubine (dolje). Pomaci pri korelaciji izraženi su u pikselima, a veličina jednog piksela je 0.25 rad m^{-2} .

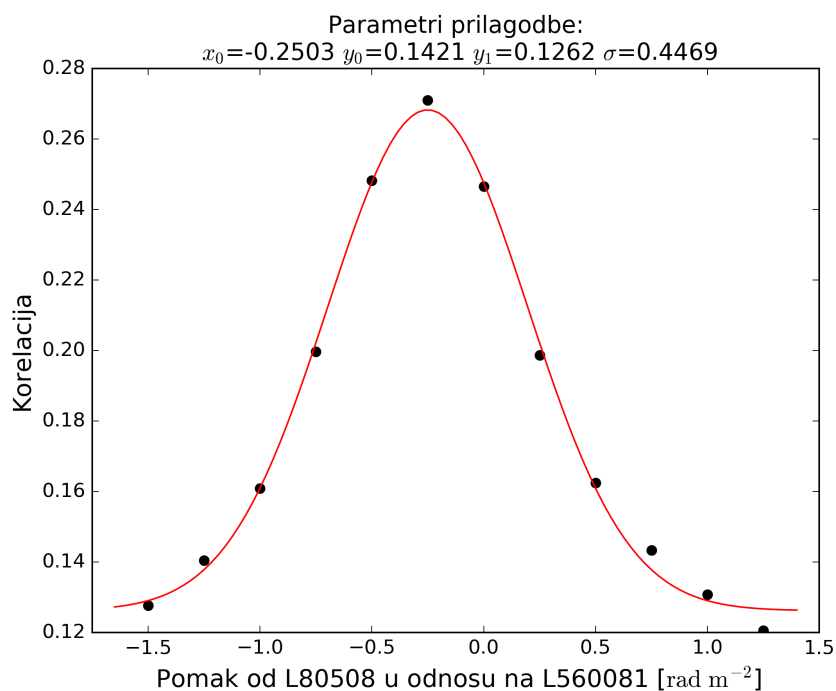
Prilagodba je napravljena korištenjem 12 pomaka između kocki duž Faradayeve dubine što je prikazano na slikama 3.3 i 3.4. Za pomake se dobilo $(0.1 \pm 0.4) \text{ rad m}^{-2}$ za par mjerenja L80508 i L192832 te $(-0.3 \pm 0.4) \text{ rad m}^{-2}$ za par mjerenja L80508 i L560081. Dobivena greška je manja od rezolucije korištenih promatranja ($\delta\Phi = 0.9 \text{ rad m}^{-2}$).

Sljedeći korak je interpolacijom pomaknuti jednu kocku u odnosu na drugu za dobiveni pomak. Od mnoštva dostupnih algoritama, ovdje se koristi Pythonov modul `scipy.interpolate.UnivariateSpline`⁵ 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 rad m^{-2} i -0.3 rad m^{-2} pomaknute u odnosu na drugu kocku). Korišteni stupanj interpolacije je kubni. Sada imamo jednu nepromijenjenu kocku (L80508) i dvije kocke (L192832 i L560081) pomaknute interpolacijom za 0.1 rad m^{-2} i -0.3 rad m^{-2} u sustav prve kocke te ćemo u radu podrazumijevati da radimo s usklađenim kockama. Ovako prilagođene RM

⁵<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.UnivariateSpline.html#scipy.interpolate.UnivariateSpline>



Slika 3.3: Usrednjene korelacije kao funkcija pomaka u Faradayevoj dubini jednog mjerenja u odnosu na drugo.



Slika 3.4: Usrednjene korelacije kao funkcija pomaka u Faradayevoj dubini jednog mjerenja u odnosu na drugo.

kočke su sada spremne za određivanje vlastitog gibanja međuzvjezdane strukture na unaprijed zadanoj Faradayevoj dubini.

4 Mjerenje vlastitog gibanja filameta

4.1 Osnove mjerenja

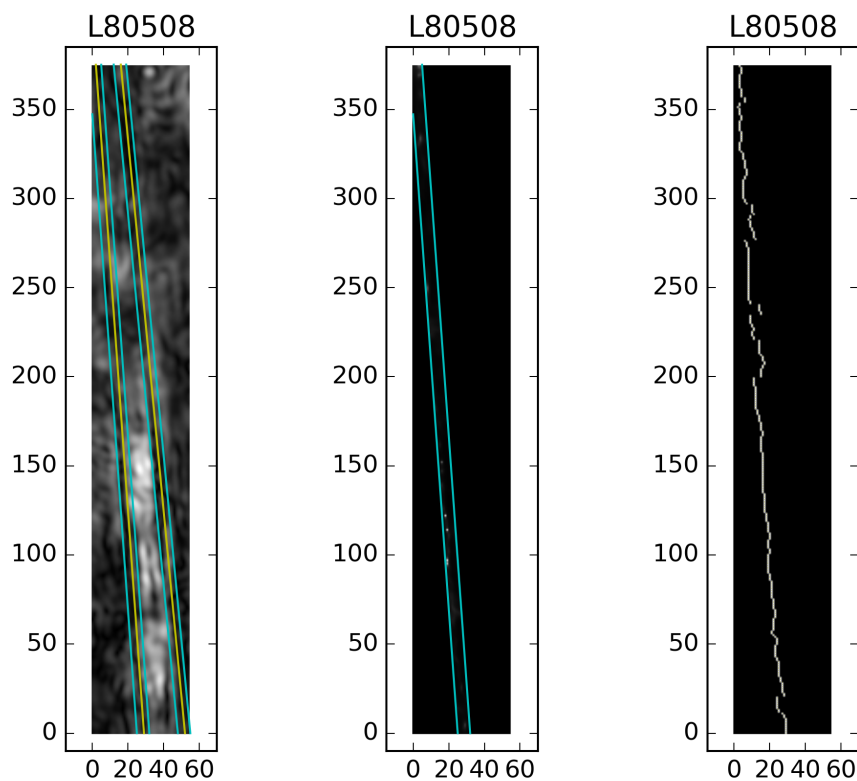
Mjerenje vlastitog gibanja filameta napravljeno je usporedbom položaja filameta na slikama manje (tri lučne minute; vidi potpoglavlje 4.2) i veće rezolucije (jedna lučna minuta; vidi potpoglavlje 4.3). Pri usporedbi su korištene slike na Faradayevoj dubini $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$ te slike maksimalnih intenziteta. Prvi korak u oba slučaja je izolacija dva depolarizacijska kanala⁶ koja međusobno omeđuju i definiraju filament. Analiza koju smo slijedili prvo će biti opisana za slučaj $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$, a zatim za maksimalni intenzitet. Pri tome kao primjer koristimo RM kocku L80508. Za vizualizaciju kocki koristimo program SAOImage DS9⁷.

Na Faradayevoj dubini $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$, na kojoj je filament najbolje detektiran, izrežemo područje veličine 375×55 piksela unutar kojeg se nalazi filament. Zatim izoliramo dva depolarizacijska kanala koja ga omeđuju. To radimo na način da prvo oba kanala što bolje aproksimiramo pravcima. Ti pravci su prikazani žutom bojom na slici 4.1 lijevo. Njihove jednadžbe oblika $y = ax + b$ su $f_1 = -13.89x + 402.81$ (lijevi kanal) i $f_2 = -10.42x + 541.84$ (desni kanal). Navedene jednadžbe pravaca vrijede za sve RM kocke. Depolarizacijski kanali su lokalni minimumi na izrezanom području u kojemu analiziramo filament. Želimo odrediti položaje tih minimuma pa iz tog razloga, oko oba pravca koji aproksimiraju kanale, crtamo po dva dodatna pravca za svaki. To radimo na način da što bolje obuhvatimo kanale koji su krivudavi. Istovremeno pazimo da se ne udaljimo previše od istih i ne zahvatimo područja koja nisu dio depolariziranih kanala, a moguće je da imaju niže intenzitete od samih kanala. Navedeni pravci prikazani su svijetloplavom bojom na slici 4.1 lijevo. Oko lijevog depolarizacijskog kanala jednadžbe pravaca su $f_{11} = -13.89x + 347.25$ (lijevi pravac) i $f_{12} = -13.89x + 444.48$ (desni pravac). Desni depolarizacijski kanal okružen je pravcima s jednadžbama $f_{21} = -10.42x + 489.74$ (lijevi pravac) i $f_{22} = -10.42x + 552.26$ (desni pravac). Navedene jednažbe pravaca također vrijede i za ostale RM kocke.

Sada ćemo se koncentrirati na lijevi depolarizacijski kanal. Isti se nalazi u području omeđenom dvama pravcima f_{11} i f_{12} prikazanih svijetloplavom bojom na

⁶Depolarizacijski kanali su uska područja na slici širine koja odgovara rezoluciji slike (PSF), unutar kojih je zračenje instrumentalno depolarizirano. Nastaju na granici dva područja zračenja koja imaju različitu orijentaciju polarizacijskih kuteva [23].

⁷<http://ds9.si.edu/site/Home.html>



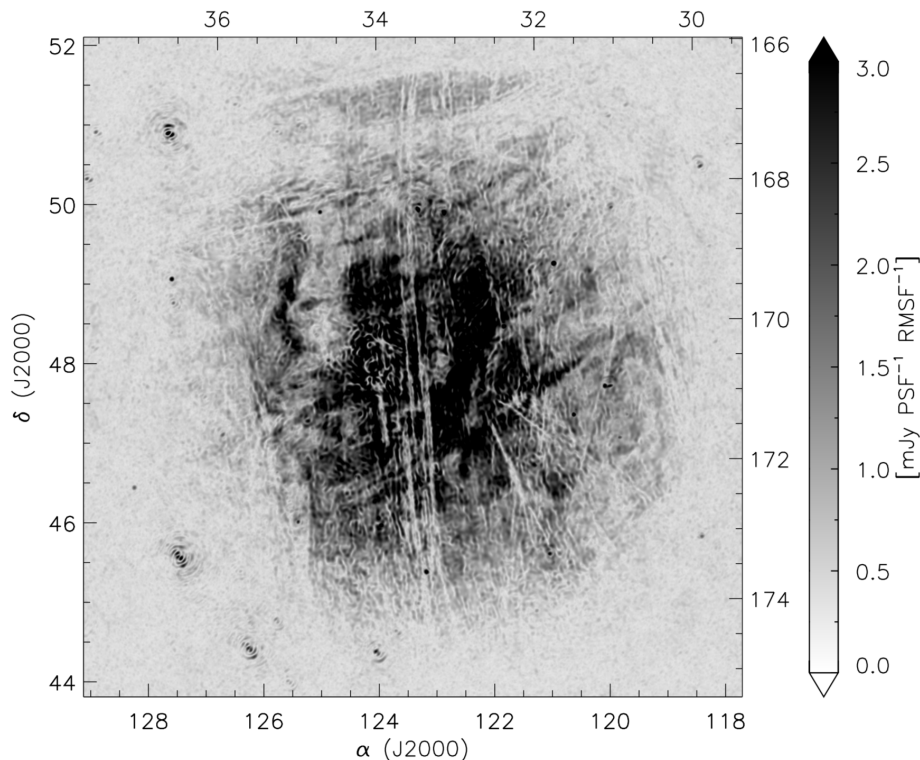
Slika 4.1: Analiza L80508 mjerenja. Aproximacija depolarizacijskih kanala pravcima (žuta boja) oko kojih se određuju po dva nova pravca (svijetloplava boja) za dobivanje područja u kojima se traži, i u konačnici izolira minimum.

središnjoj slici 4.1. Izvan tog područja sve vrijednosti intenziteta stavljamo na nulu. To radimo zato da bismo se riješili ostalih nepoželjnih lokalnih minimuma duž x-osi za fiksnu vrijednost položaja na y-osi, jer nas zanimaju samo minimumi vrijednosti u području omeđenom pravcima. Pronađeni minimumi su prikazani na slici 4.1 desno. Budući da nas zanima samo 2D pomak, minimume pretvaramo u jedinične vrijednosti za lakšu daljnju analizu. Navedeni postupak napravimo i za desni depolarizacijski kanal iste RM kocke.

Istim postupkom izoliramo rubna područja tj. depolarizacijske kanale i iz promatranja L192832 te L560081. Izgled filamenta, tj. duguljasta struktura istoga, govori nam da ako postoji vlastito gibanje, da je ono najvjerojatnije duž x-osi, tj. rektascenzije. Iz tog razloga gledamo samo diferencijalne pomake filamenta duž x-osi. Pomake mjerimo već korištenim Pearsonovim koeficijentom korelacije. Za fiksnu vrijednost položaja na y-osi, računamo korelaciju između filamenata različitih opažanja, za različite pomake. Tako dobivene korelacije duž y-osi usrednjimo i crtamo ih. Na

to radimo prilagodbu Gaussijana koji smo koristili kod usklađivanja mjerenja (3.1). Dobiveni pomaci izraženi su u pikselima. Ovisno o veličini piksela uspoređenih RM kocki, dobiveni pomaci su pretvoreni u lučne sekunde.

S obzirom na to da depolarizacijski kanali nisu jasno vidljivi duž cijele dužine filamenta na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$, odlučili smo provesti analizu na slikama maksimalnog intenziteta u Faradayevom spektru. Primjer takve slike je dan na slici 4.2, a dobivena je uzimanjem maksimalnog intenziteta Faradayevog spektra za svaki piksel (RA, Dec). Na tako dobivenim slikama jasnije se uočavaju depolarizacijski kanali. Ipak, treba biti oprezan, jer se radi od minimumu intenziteta duž cijele doglednice, a filament je struktura koja ima konačnu debljinu na konačnoj dubini.



Slika 4.2: Slika promatranja L80508 u maksimalnom intenzitetu Faradayevog spektra. Veličina slike je $8.3^\circ \times 8.3^\circ$ sa PSF-om od $3.6' \times 3.9'$.

4.2 Mjerenje s rezolucijom od tri lučne minute

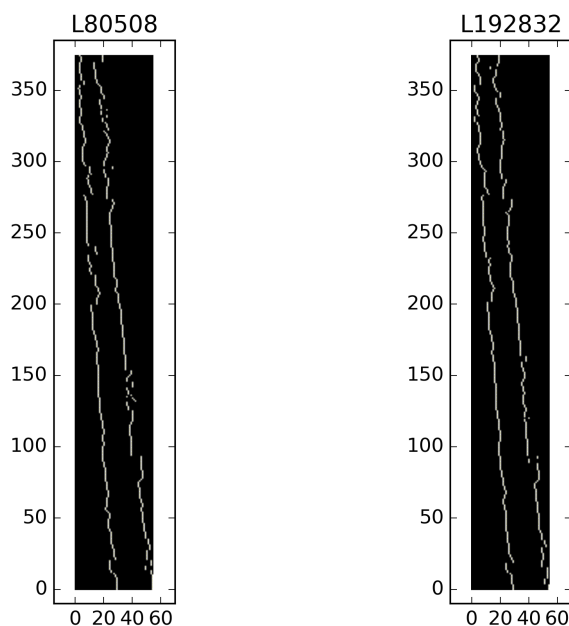
4.2.1 Uspoređivanje na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$

Promatranje L80508 uspoređujemo sa L192832 (godinu dana razlike) i sa L560081 (četiri godine razlike). Sve tri kocke imaju rezoluciju od 3 lučne minute s pikselima veličine 30×30 lučnih sekundi. Uspoređujemo ih na Faradayevoj dubini

$\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$. Veličina područja, na kojemu se nalaze filamenti, je 375×55 piksela tj. $3.125^\circ \times 0.458^\circ$.

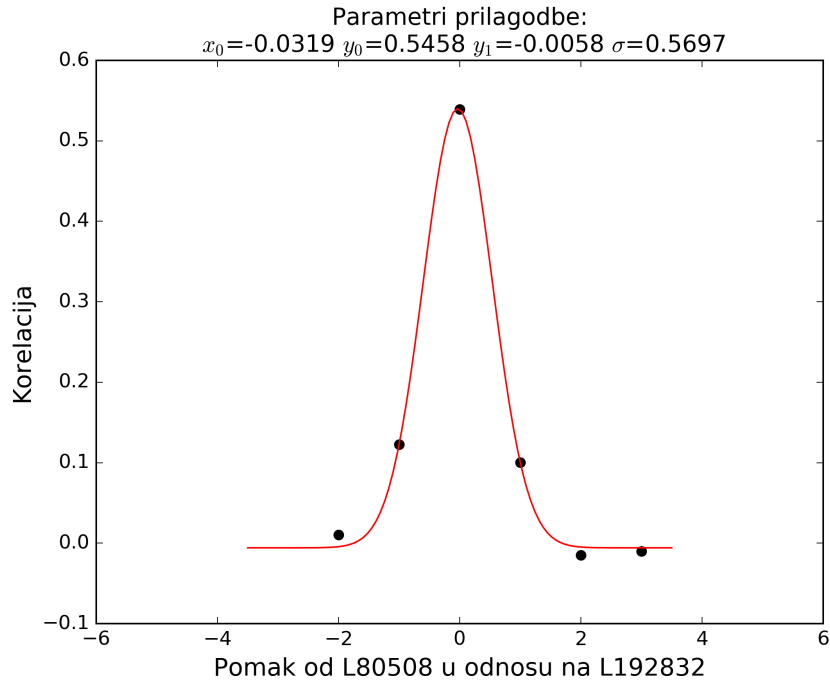
Na slici 4.3 prikazani su izolirani filamenti promatranja L80508 i L192832. Vidimo da depolarizacijski kanali na pojedinim mjestima prestaju biti kontinuirana linija što će se događati i u ostalim mjerenjima. Prilagodba Gaussijana, na izračunatu korelaciju između filamenata dva promatranja, dana je na slici 4.4. Iz prilagodbe, za diferencijalni pomak x_0 s pripadnom greškom σ , dobivamo $x_0 = (-1 \pm 17)$ lučnih sekundi.

Ista analiza je ponovljena za promatranja vremenski razmaknuta četiri godine. Izolirani filamenti promatranja L80508 i L560081, kao i pripadna prilagodba korelacije, dani su na slici 4.5 odnosno slici 4.6. Za diferencijalni pomak x_0 s pripadnom

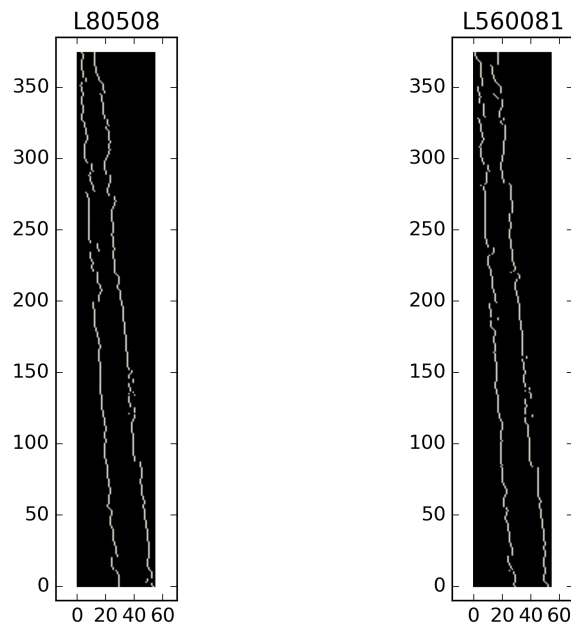


Slika 4.3: Izolirani filamenti promatranja L80508 i L192832 (vremenski razmaknutih godinu dana) na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$. Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.

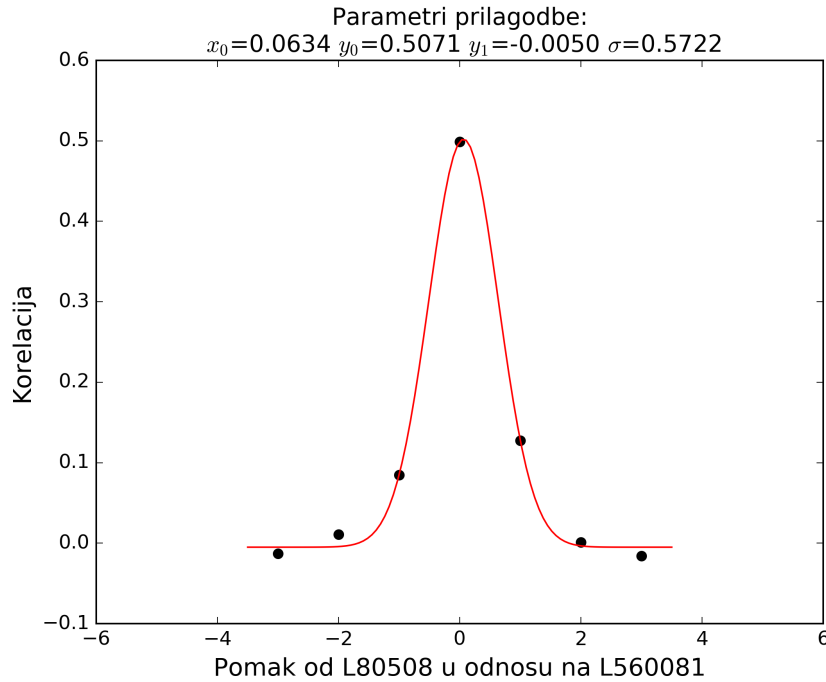
greškom σ dobivamo $x_0 = (2 \pm 17)$ lučnih sekundi. Vidimo da dobiveni rezultat za vremenski period od 4 godine ima istu grešku kao prethodno mjerenje. Slijedi analiza za vremenski razmak promatranja ponovno od jedne i četiri godine, ali sada uspoređujući slike maksimalnih intenziteta.



Slika 4.4: Diferencijalni pomak x_0 između promatranja L80508 i L192832 (vremenski razmaknutih godinu dana) s pripadnom greškom σ (izraženi u pikselima) na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$. Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.



Slika 4.5: Izolirani filamenti promatranja L80508 i L560081 (vremenski razmaknutih četiri godine) na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$. Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.

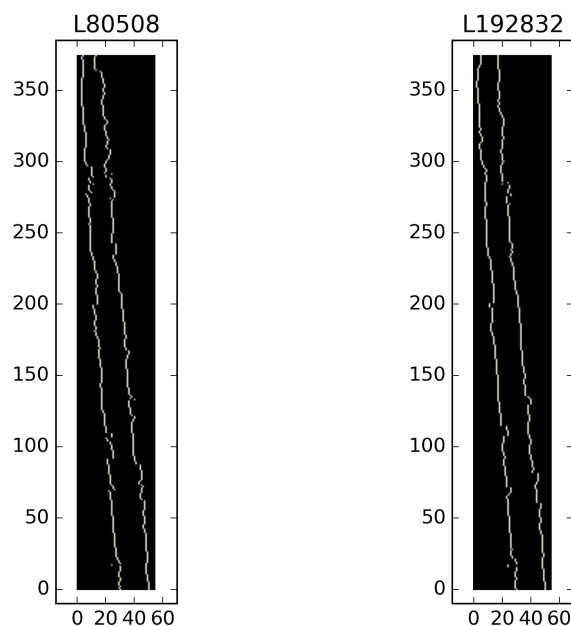


Slika 4.6: Diferencijalni pomak x_0 između promatranja L80508 i L560081 (vremenski razmaknutih četiri godine) s pripadnom greškom σ (izraženi u pikselima) na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$. Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.

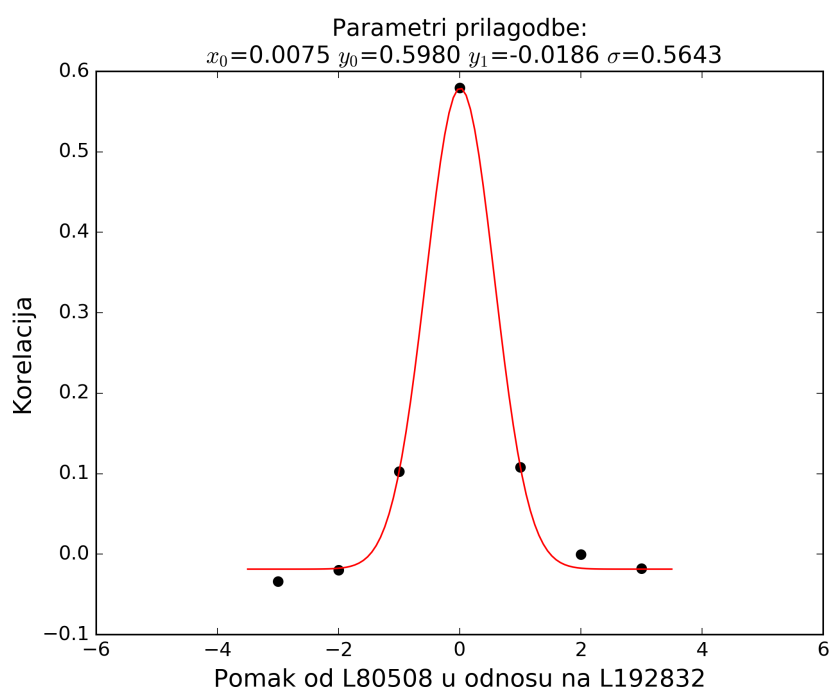
4.2.2 Uspoređivanje pomoću maksimalnih intenziteta

Pri uspoređivanju slika maksimalnih intenziteta, slijedili smo iste korake kao i u prethodnoj analizi opisanoj u 4.2.1. Na slici 4.7 prikazani su filamenti izolirani iz slika maksimalnih intenziteta za promatranja L80508 i L192832, a pripadna prilagodba korelacije prikazana je na slici 4.8. Za diferencijalni pomak dobivamo $x_0 = (0 \pm 17)$ lučnih sekundi. U ovom slučaju nema pomaka. Podsjetimo, za isti vremenski period dobiven uspoređivanjem promatranja na $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$, dobiveni pomak iznosi (-1 ± 17) lučnih sekundi. Vidimo da je greška u oba slučaja ista.

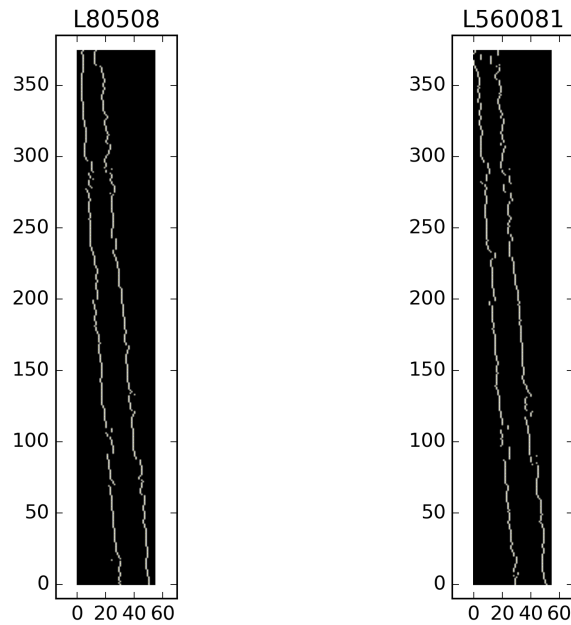
Preostaje još usporediti slike maksimalnih intenziteta promatranja L80508 i L560081, vremenski razmaknuta četiri godine. Izolirani filamenti dani su na slici 4.9, a pripadna prilagodba korelacije prikazana je na slici 4.10. Prilagodba nam je za diferencijalni pomak dala vrijednost $x_0 = (1 \pm 21)$ lučnih sekundi. Za razliku od mjerenja za vremenski razmak od godinu dana, u ovom slučaju pomak postoji, ali uz grešku koja je nešto veća od prethodnih mjerenja. S obzirom na relativno velike greške mjerenja, odlučili smo napraviti analizu koristeći slike veće rezolucije ($1'$), što je prezentirano u sljedećem potpoglavlju.



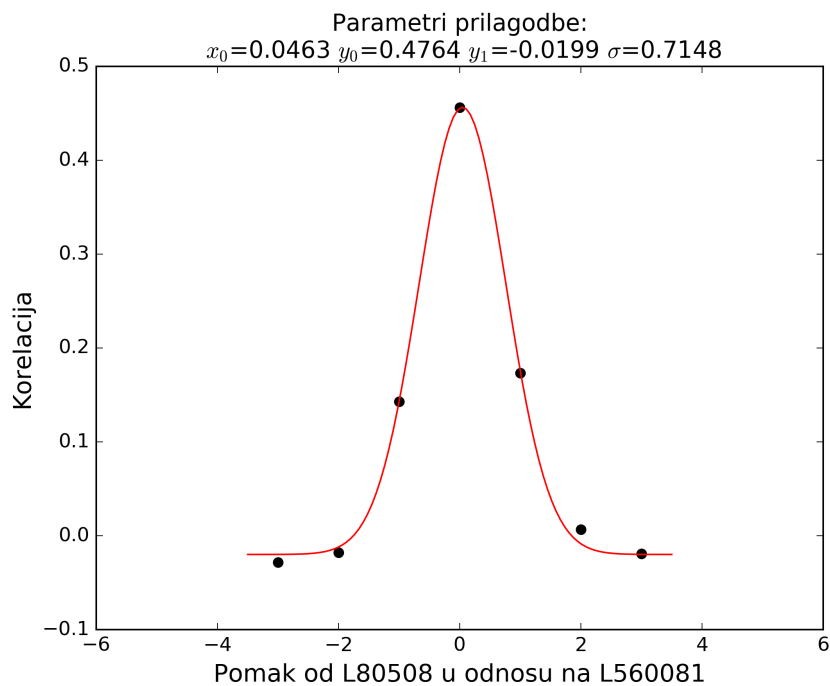
Slika 4.7: Filamenti izolirani iz slika maksimalnih intenziteta za promatranja L80508 i L192832 (vremenski razmaknutih godinu dana). Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.



Slika 4.8: Diferencijalni pomak x_0 između promatranja L80508 i L192832 (vremenski razmaknutih godinu dana) s pripadnom greškom σ (izraženi u pikselima) na maksimalnim intenzitetima duž Faradayeve dubine za svaki prostorni piksel. Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.



Slika 4.9: Filamenti izolirani iz slika maksimalnih intenziteta za promatranja L80508 i L560081 (vremenski razmaknutih četiri godine). Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.

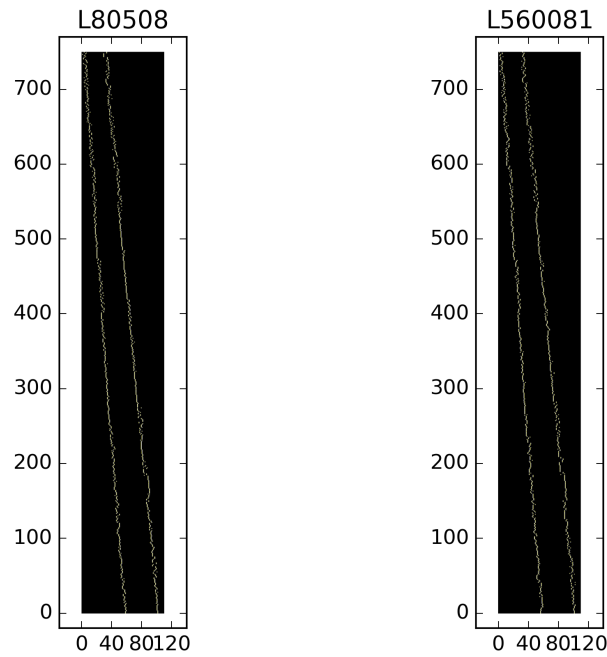


Slika 4.10: Diferencijalni pomak x_0 između promatranja L80508 i L560081 (vremenski razmaknutih četiri godine) s pripadnom greškom σ (izraženi u pikselima) na maksimalnim intenzitetima duž Faradayeve dubine za svaki prostorni piksel. Rezolucija kod oba promatranja je 3 lučne minute, a piksel je veličine 30×30 lučnih sekundi.

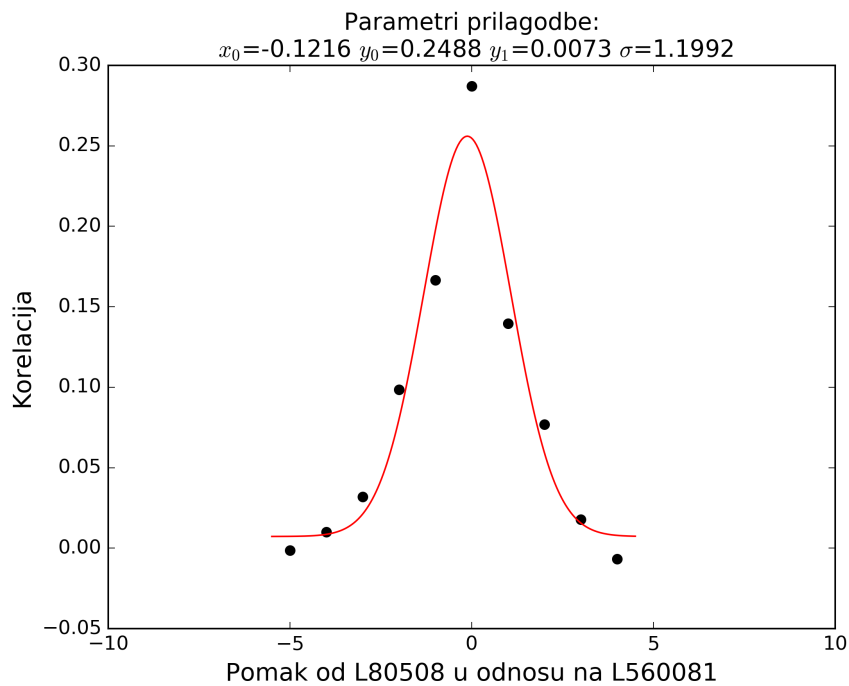
4.3 Mjerenje s rezolucijom od jedne lučne minute

Promatranja L80508 i L560081, koja su nam dostupna u rezoluciji od jedne lučne minute, različitih su dimenzija i veličina piksela te ih je bilo potrebno uskladiti. Uskladili smo ih na način da smo kocku s manjom veličinom piksela (L80508) presložili da odgovara karakteristikama kocke s većom veličinom piksela (L560081). U konačnom obliku, nakon uzimanja maksimalnog intenziteta duž Faradayeve dubine, obje slike su dimenzija 2400×2400 s pikselima veličine 15×15 lučnih sekundi. Pošto su dimenzije duplo veće nego kod promatranja s rezolucijom od 3 lučne minute, bit će duplo veći i sami filament. Veličina područja u kojemu se nalazi filament je 750×110 piksela. Treba naglasiti i da nam se za analizu mijenjaju jednadžbe pravaca. Nagibi ostaju isti, ali mijenjaju se odsječci na osi y . Notacija je ista kao i u potpoglavlju 4.1 te navodimo jednadžbe pravaca za ovaj slučaj: $f_1 = -13.89x + 805.62$ s okolnim pravcima $f_{11} = -13.89x + 750.06$ i $f_{12} = -13.89x + 833.40$, $f_2 = -10.42x + 1083.68$ s okolnim pravcima $f_{21} = -10.42x + 1042.00$ i $f_{22} = -10.42x + 1104.52$. Postupak analize je isti. Pri ovoj rezoluciji radimo analizu samo na slikama maksimalnih intenziteta. Razlog tomu je taj što na temelju dosadašnjih rezultata ne vidimo preveliku razliku između ove metode i metode koja se temelji na uspoređivanju promatranja na određenoj Faradayevoj dubini. Treba naglasiti i da je, pri rezoluciji od jedne lučne minute, osjetljivost puno manja od promatranja s rezolucijom od tri lučne minute pa je time i puno teže analizirati na zadanoj Faradayevoj dubini.

Na slici 4.11 prikazani su izolirani filamenta na promatranjima L80508 i L560081, vremenski razmaknuta četiri godine. Pripadna prilagodba korelacije dana je na slici 4.12 iz čega dobivamo da je diferencijalni pomak jednog filamenta u odnosu na drugi jednak $x_0 = (-2 \pm 18)$ lučnih sekundi. Iako smo očekivali bolji rezultat jer smo koristili slike bolje rezolucije, greška je i dalje velika zbog velikog rasapa dobivenih točaka minimuma. Pomak je, u skladu s prethodnim mjerenjima, veći od onih koji su dobiveni iz vremenskih razmaka od jedne godine. Sama greška po iznosu se nalazi u blizini greški prethodnih mjerenja.



Slika 4.11: Filamenti izolirani iz slika maksimalnih intenziteta za promatranja L80508 i L560081 (vremenski razmaknutih četiri godine). Rezolucija kod oba promatranja je 1 lučna minuta, a piksel je veličine 15×15 lučnih sekundi.



Slika 4.12: Diferencijalni pomak x_0 između promatranja L80508 i L560081 (vremenski razmaknutih četiri godine) s pripadnom greškom σ (izraženi u pikselima) na maksimalnim intenzitetima duž Faradayeve dubine za svaki prostorni piksel. Rezolucija kod oba promatranja je 1 lučna minuta, a piksel je veličine 15×15 lučnih sekundi.

5 Diskusija i zaključak

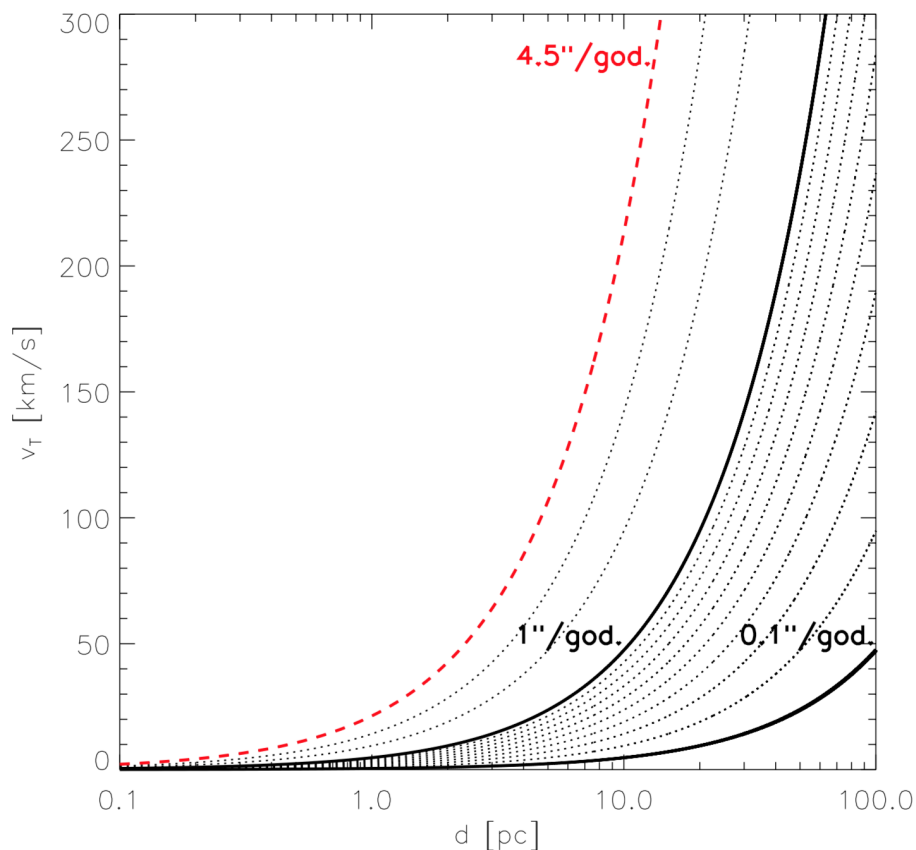
Mjerenje je vlastito gibanje filameta ionizirane međuzvezdane materije detektirane u 3C196 polju pomoću radioteleskopa LOFAR. Korištena su opažanja vremenski razmaknuta jednu i tri, odnosno četiri godine (oznaka opažanja: L80508 - 16.12.2012., L192832 - 15.12.2013. i L560081 - 11.12.2016.). S obzirom na to da su rubovi filameta dobro definirani depolarizacijskim kanalima, uskim područjima na slici unutar kojih je zračenje instrumentalno depolarizirano, gibanje filameta analizirano je traganjem za sistematskim pomakom istih. Analiza je napravljena pomoću slika na Faradayevoj dubini $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$, na kojoj je filament najizraženiji, te na slikama maksimalnog intenziteta Faradayevog spektra. Korištene slike su imale rezolucije jednu i tri lučne minute. Da bi bili sigurni da uspoređujemo u različitim opažanjima iste strukture na istim Faradayevim dubinama, sva mjerenja su bila međusobno usklađena i korigirana za Faradayevu rotaciju u ionosferi koja može uzrokovati relativne pomake Faradayevog spektra i uzrokovati depolarizaciju promatranih struktura.

Zbog same prirode i orijentacije filameta, tj. njegove izduženosti od nekoliko stupnjeva po gotovo istoj RA koordinati, gledali smo samo diferencijalne pomake filameta duž osi rektascenzije (x -osi). Pomake smo mjerili koristeći Pearsonove koeficijente korelacije. Dobivene korelacije za različita mjerenja su sažete u Tablici 5. Iz tablice je vidljivo da statistički značajnog pomaka nema, niti u mjerenjima koja su razmaknuta godinu dana, niti u mjerenjima koja su razmaknuta četiri godine. Pogreška je gotovo ista za sva mjerenja i iznosi ~ 18 lučnih sekundi. Iako nije izmjereno

| | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
| Rezolucija: 3' | 1 god. ["] | 4 god. ["] |
| $\Phi = +0.50 \text{ rad m}^{-2}$ | (-1 ± 17) | (2 ± 17) |
| Maksimalni intenzitet | (0 ± 17) | (1 ± 21) |
| Rezolucija: 1' | 1 god. ["] | 4 god. ["] |
| Maksimalni intenzitet | - | (-2 ± 18) |

Tablica 5.1: Diferencijalni pomaci dobiveni različitim metodama i pri različitim rezolucijama.

vlastito gibanje filameta, možemo ograničiti fazni prostor mogućih transverzalnih brzina i pripadajuće udaljenosti, kao što je prikazano na slici 5.1. Na slici smo uzeli u obzir da kroz razdoblje od 4 godine filament ne pokazuje pomak veći od pogreške mjerenja (> 18 lučnih sekundi), što odgovara pomaku od 4.5 lučnih sekundi na go-



Slika 5.1: Fazni prostor mogućih transverzalnih brzina i pripadajuće udaljenosti.

dinu. Ponavljanjem analize za puno veći vremenski razmak između mjerenja (npr. 10 godina) bi dodatno ograničilo fazni prostor. Također, postoji i mogućnost da filament nema značajno vlastito gibanje duž osi rektascenzije, već duž osi deklinacije. Ako usporedimo orijentaciju filameta u odnosu na galaktičke koordinate (vidi sliku 1.4), vidimo da je filament gotovo paralelan s galaktičkom ravninom. Shodno tome, moguće je da je dominantna komponenta brzine duž samog filameta, tj. da je paralelna s ravninom rotacije same galaksije. U tom slučaju, za mjerenje vlastitog gibanja, potrebna je slika puno većeg područja od trenutno analiziranog.

Literatura

- [1] Sparke, L. S., Gallagher III, J. S. Galaxies in the Universe: An Introduction. 2nd ed. New York : Cambridge University Press, 2007.
- [2] Heiles, C. & Haverkorn, M. Space Sci Rev (2012) 166: 293
- [3] National Radio Astronomy Observatory, Essential Radio Astronomy, <https://science.nrao.edu/opportunities/courses/era/>, 10.09.2018.
- [4] Wilson, T. L., Rohlfs, K., Hüttemeister, S. Tools of Radio Astronomy. Fifth Edition. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2009.
- [5] Continuum Emission Mechanisms, http://www.astro.yale.edu/vdbosch/astro320_summary27.pdf, 10.09.2018.
- [6] Le Roux, E. 1961, Annales d'Astrophysique, 24, 71
- [7] Woltjer, L. 1958, Bull. Astron. Inst. Netherlands, 14, 39
- [8] Westfold, K.C. 1959, ApJ, 130, 241
- [9] LAMBDA - Data Products, Foreground Data Images, https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/foreground/f_images.cfm, 10.09.2018.
- [10] Jelić, V., de Bruyn, A. G., Mevius, M., et al. 2014, A&A, 568, A101
- [11] Jelić, V., de Bruyn, A. G., Pandey, V. N., et al. 2015, A&A, 583, A137
- [12] Van Eck C. L., et al., 2017, A&A, 597, A98
- [13] Bernardi, G., de Bruyn, A. G., Harker, G., et al. 2010, A&A, 522, A67
- [14] Lenc E., et al., 2016, ApJ, 830, 38
- [15] Brentjens, M. A. & de Bruyn, A. G. 2005, A&A, 441, 1217
- [16] Choi, E. & Stone, J. M. 2012, ApJ, 747, 86
- [17] Proper motion, (14.08.2018.), https://en.wikipedia.org/wiki/Proper_motion, 15.09.2018.
- [18] van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al. 2013, A&A, 556, A2

- [19] ASTRON, Netherlands Institute for Radio Astronomy, <https://www.astron.nl/general/lofar/lofar>, 10.09.2018.
- [20] Offringa, A. R., de Bruyn, A. G., Zaroubi, S., et al. 2013, *A&A*, 549, A11
- [21] Scaife, A. M. M. & Heald, G. H. 2012, *MNRAS*, 423, L30
- [22] Pearson correlation coefficient, https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient, 10.09.2018.
- [23] Haverkorn, M., Katgert, P., & de Bruyn, A. G. 2004, *A&A*, 427, 549