

Istraživanje magnetskog polja u Polarnom plamičku

Ina Galić

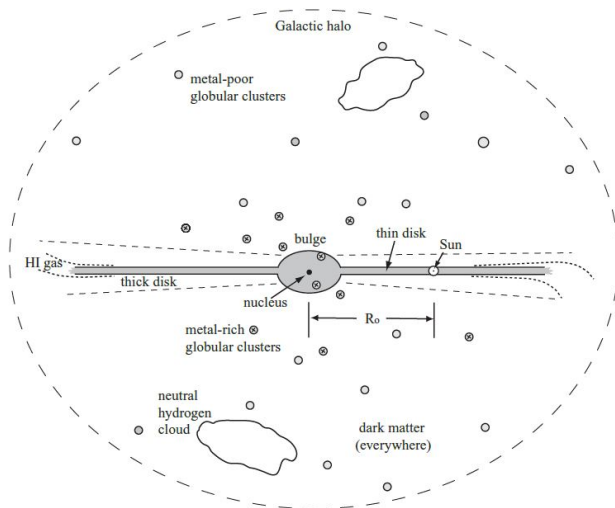
Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Fizički odsjek
Siječanj 2023

Sažetak

Cilj ovog rada bio je odrediti vezu između smjera depolariziranih kanala, vidljivih na slikama polariziranog sinkrotronskog zračenja detektiranog radioteleskopom LOFAR na niskim radiofrekvencijama, i smjera komponente magnetskog polja projicirane na ravninu neba, određene iz polarizacije zvjezdane svjetlosti detektirane fotopolarimetrom RoboPol koristeći crveni filter. Promatrano je područje oko sjevernog nebeskog pola gdje se nalazi difuzni molekularni oblak po imenu Polarni plamičak. Za analizu LOFAR-ovih podataka koristili smo se metodama RM sinteze i RHT analize. Rezultati su pokazali da depolarizirani kanali ne prate smjer lokalnog magnetskog polja.

1 Uvod

1.1 Mliječna staza



Slika 1: Shematki prikaz Mliječne staze. Preuzeto iz [1].

Mliječna staza je spiralna galaksija s prečkom u kojoj se nalazi naš Solarni sustav. Sastoji se od središnjeg za-

debljanja (eng. *bulge*), diska, zvjezdanoga haloa (eng. *stellar halo*) i tamnog haloa (eng. *dark halo*).

Središte Galaksije čini svjetlosno zadebljanje s radijusom od nekoliko kpc i luminozitetom od $\approx 5 \cdot 10^9 L_{\odot}$. Ono sadrži gustu nakupina zvijezda s masom od $\approx 20 \cdot 10^9 M_{\odot}$ i crnu rupu Sagittarius A* s masom od $\approx 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ u samom centru (vidi [1]). Zvijezde ovog područja imaju prosječnu brzinu od 100 km/s sa znatnim nasumičnim gibanjem.

Na zadebljanje se nastavlja disk koji ima luminozitet od $15 - 20 \cdot 10^9 L_{\odot}$, dijametar od 50 kpc i čiji oblik nije savršeno kružan, već pomalo eliptičan (vidi [2]). Disk se dijeli na mladi i stari tanki disk (eng. *thin disk*) te debeli disk (eng. *thick disk*). Tanki disk sadrži većinski dio zvijezda diska i aktivno je područje stvaranja zvijezda s visinskom skalom od ≈ 90 pc za mladi dio i ≈ 350 pc za stari dio. S druge strane, debeli disk ima visinsku skalu od ≈ 1 kpc i sadrži stariju populaciju zvijezda koja je siromašna teškim metalima. Većina plina i prašine u disku nalazi se u vrlo tankom sloju oko središnje ravnine zvjezdanoga diska. Debljina tog sloja približno raste s udaljenošću od centra Galaksije. Zvijezde diska gibaju se po približno kružnim putanjama brzinom od 200 km/s s blagim nasumičnim gibanjem te imaju ukupnu masu od $\approx 60 \cdot 10^9 M_{\odot}$.

Zvijezde i kuglasti skupovi koji se nalaze u sferi iz-

van diska i središnjeg zadebljanja te se nasumično gibaju oko Galaktičkog centra, čine zvjezdani halo. Ovo područje je izuzetno siromašno metalima i čini mali doprinos masi Galaksije, svega $10^9 M_{\odot}$. Većina mase Galaksije zapravo dolazi od tamne tvari sferično raspoređene u obliku tamnog haloa na samom rubu Galaksije. Također, većinski dio volumena Galaksije nije sačinjen od zvijezda već međuzvjezdane tvari, ali masa te tvari čini samo 10% ukupne zvjezdane mase u galaksiji (vidi [1]).

1.2 Međuzvjezdana tvar i molekularni oblaci

Međuzvjezdana tvar (eng. *interstellar medium*, ISM) ispunjava prostor između zvijezda unutar galaksija. Sačinjena je od plina koji može biti hladan, topao ili vruć, te u ioniziranom, neutralnom ili molekularnom stanju. Primarna komponenta međuzvjezdanog plina je vodik, dok preostali postotak čine elementi poput helija, vode, kalcija i amonijaka. Uz plin, ISM je također ispunjen kozmičkom prašinom, konglomeratom atoma i molekula poput grafita i silikata, te prožet visokoenergetskim kozmičkim zrakama (e.g. relativističkim protonima i elektronima) i magnetskim poljima. Snažni udarni valovi uzrokovani solarnim vjetrovima i supernovama zajedno s utjecajem magnetskog polja koje se proteže kroz medij uzrokuju raspršenje ili kompresiju međuzvjezdane tvari. Ovi procesi su ključni za formaciju zvijezda zbog čega je proučavanje dinamike ISM-a aktivno područje istraživanja u astrofizici.

Molekularni oblaci su hladne (oko 10 K) i guste (više od 10^2 čestica/cm³) strukture međuzvjezdane tvari, većim dijelom sastavljene od molekula vodika, a manjim od međuzvjezdane prašine. Zbog svoje niske temperature i visoke gustoće idealna su mjesta za stvaranje novih zvijezda. Osim gravitacijskog sažimanja, javljaju se i turbulentna gibanja hladne i magnetizirane tvari. U oblake može prodrijeti samo zračenje većih valnih duljina (od infracrvenog nadalje), koje zagrijava čestice međuzvjezdane prašine, ili kozmičke zrake nastale eksplozijama supernova. Molekularni oblaci mogu i sami proizvesti energiju ako unutar njih nastanu zvijezde O ili B tipa koje ultraljubičastim zračenjem razbijaju molekule vodika u atome vodika te ih fotodisociraju i stvaraju područja ioniziranog vodika. Primjer molekularnog oblaka prikazan je na Sl. 2.



Slika 2: Stupovi kreacije (eng. *Pillars of Creation*) snimljeni svemirskim teleskopom James Webb u infracrvenom području. Izvor: NASA, ESA, CSA, STScI; Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI).

1.3 Istraživanje međuzvjezdane tvari

Jedan način istraživanja međuzvjezdane tvari i magnetskog polja unutar nje je pomoću sinkrotronskog zračenja. Ova vrsta zračenja javlja se kao posljedica interakcije relativističkih čestica s magnetskim poljem. Doživljava učinak zvan Faradayeva rotacija - kako sinkrotronsko zračenje propagira kroz ISM i međudjeluje s ioniziranom tvari te prisutnim magnetskim poljem, kut polarizacije zračenja biva zarotiran ovisno o frekvenciji. Koliko se taj polarizacijski kut χ mijenja s promjenom u valnoj duljini na kvadrat λ^2 naziva se mjera rotacije (eng. *rotation me-*

asure, RM) i zapisuje se kao (vidi [3]):

$$RM = \frac{d\chi(\lambda^2)}{d\lambda^2} \approx \Phi \cdot \lambda^2 \quad (1)$$

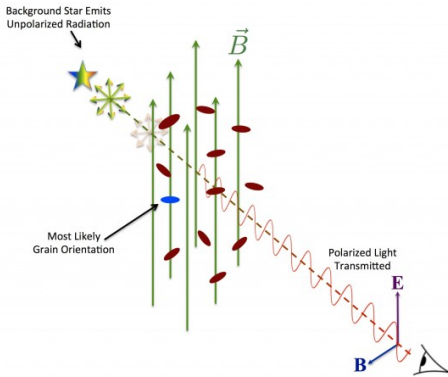
gdje je λ valna duljina zračenja i Φ Faradayeva dubina definirana kao:

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

gdje je n_e gustoća elektrona u cm^3 , B_{\parallel} je komponenta magnetskog polja paralelna smjeru doglednice u μGauss i dl je infinitezimalna duljina puta u parsecima. Kao što se može vidjeti iz jednadžbe 1, kut polarizacije zračenja veće valne duljine doživjet će veću rotaciju tokom prolaska kroz ISM. Koliko će se točno taj kut zaokrenuti određeno je Faradayevom dubinom iz jednadžbe 2. Pozitivne Faradayeve dubine nam govore da je magnetsko polje usmjereno prema nama, dok nam negativne dubine govore da je usmjereno od nas.

1.4 Određivanje smjera magnetskog polja

Smjer magnetskog polja unutar međuzvjezdane tvari može se odrediti preko ekstinkcije svjetlosti zvijezda ili preko polariziranog termalnog zračenja prašine.



Slika 3: Shematki prikaz polarizacije svjetlosti zvijezda. Izvor: PASIPHAE, Davis Geenstein.

Međuzvjezdana ekstinkcija je efekt zatamnjenja dalekih objekata do koje dolazi zbog raspršenja i apsorpcije svjetlosti zvijezda na česticama međuzvjezdane prašine prisutnih na doglednici (vidi [2]). Tipična veličina međuzvjezdanih zrnaca prašine je takva da svjetlost kraćih valnih duljina (e.g. plava svjetlost) ima

veću vjerojatnost apsorpcije ili raspršenja na česticama prašine, stoga do nas pretežito dolazi svjetlost većih valnih duljina (e.g. crvena svjetlost). Ova pojava zove se međuzvjezdano crvenjenje i zbog nje nam se objekti sakriveni iza međuzvjezdanog oblaka doimaju crvenijima nego što to doista jesu.

Međuzvjezdana ekstinkcija je zaslužna i za polarizaciju svjetlosti zvijezda (vidi [4]). Naime, zrnca međuzvjezdane prašine su najčešće asimetričnog oblika izduženog u smjeru jedne osi. Ona ujedno i rotiraju te time induciraju magnetski moment koji je okomit na dužu os zrnca i koji se poravnava sa smjerom vanjskog magnetskog polja. Prolaskom kroz međuzvjezdanu tvar, nepolarizirana svjetlost zvijezda se parcijalno apsorpira duž dulje osi zrnca čime biva polarizirana u smjeru kraće osi zrnca, odnosno njena polarizacija je paralelna smjeru vanjskog magnetskog polja (vidi Sl. 3). To znači da smjer magnetskog polja lako možemo odrediti ako poznamo smjer polarizacije svjetlosti zvijezda.

Druga metoda određivanja smjera vanjskog magnetskog polja se zasniva na činjenici da se svjetlost koju zrnca apsorbiraju ponovo emitira u obliku termalnog zračenja. Preferirani smjer emisije je duž duge osi zrnca što znači da je smjer polarizacije termalnog zračenja okomit na smjer magnetskog polja.

2 Podaci i metodologija

2.1 Polarni plamičak

Polarni plamičak (eng. *Polaris flare*) je molekularni oblak koji se nalazi u području sjevernog nebeskog pola. Difuznog je tipa što znači da se uglavnom sastoji od atomskog plina te u gušćim regijama od molekularnog plina. Ova vrsta molekularnog oblaka najčešće ima masu od 3 do 100 M_{\odot} i dužinu od nekoliko parseka, a glavno obilježje joj je nemogućnost nastanka zvijezda. Oko udaljenosti Polarnog plamička ne postoji konsenzus. Neki radovi tvrde da se nalazi već na 125 pc (vidi [5]), a neki tek na 390 pc (vidi [6]).

2.2 RoboPol-ova promatranja

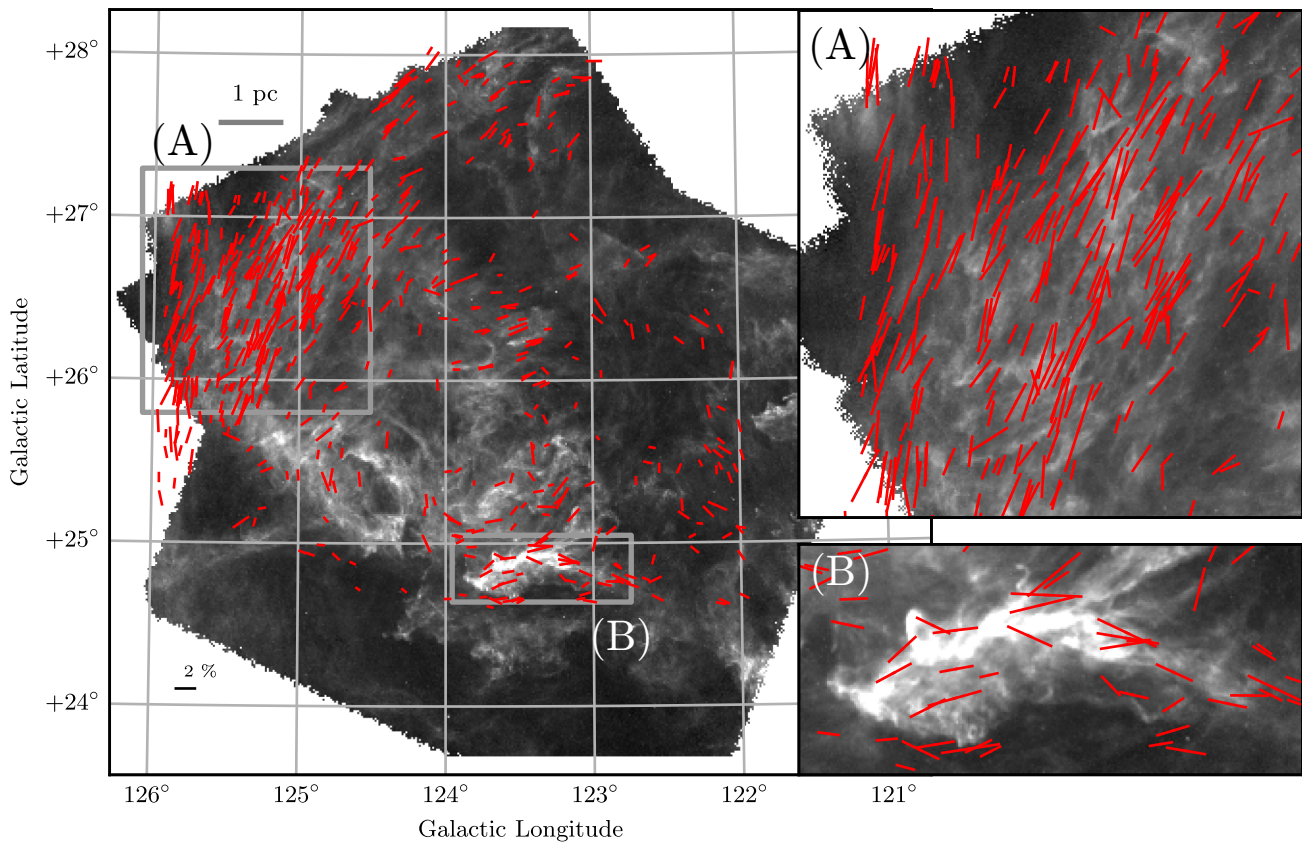
RoboPol (eng. *Robotic Polarimeter*) je optički fotopolarimetar sa 4 kanala i bez pomičnih dijelova osim kotača s filterom. Opremljen je standardnim Johnson-Cousins crvenim i infracrvenim filterima i montiran na 1.3 metarski $f/7.7$ Ritchey-Cretien teleskop u Skinakas opservatoriju na Kreti. Ima vidno polje od $13' \times 13'$ te može istovremeno mjeriti Stokesove Q i U parametre što smanjuje greške uzrokovane lošim poravnavanjem rotirajućih optičkih elemenata i promjenama na nebu tokom mjerenja. U pogonu je od proljeća 2013. godine. Više detalja o specifikacijama i radu instrumenta može se naći u [7],

a o kontrolnom sustavu i sustavu za redukciju podataka u [8]. RoboPol-ova glavna svrha je promatranje optičke linearne polarizacije blazara koji snažno zrače u gamma dijelu spektra. Iz tih promatranja se mogu dobiti informacije o strukturi mlazova, sastavu, magnetskom polju i mehanizmima emisije kod blazara. Uz to, RoboPol se koristi i za mapiranje magnetskog polja u međuzvjezdanim oblacima pomoću proučavanja ekstinkcije svjetlosti zvijezda.

U ovom radu ćemo koristiti podatke o smjeru magnetskog polja preuzete iz članka [9]. Podaci su dobiveni obradom RoboPol-ovih mjerenja optičke polarizacije zvijezda na $10^\circ \times 10^\circ$ području Polarnog plamička. Mjerenja su napravljena koristeći crveni filter u 25 noći

raspoređenih u razdoblju od kolovoza do studenog 2013.

U članku [10] je napravljena usporedba smjera magnetskog polja projiciranog na ravninu neba sa smjerom filamentarnih struktura detektiranih Herschel teleskopom na području Polarnog plamička. Rezultati pokazuju izvanredno slaganje. Čak se 70% smjerova magnetskog polja poklapa s onima filamenata prašine. Nadalje, u članku su detaljno proučena dva područja označena slovima A i B na Sl. 4. U području A se nalaze difuzne strukture prašine, dok je područje B najgušći dio oblaka. Magnetsko polje u području A je gotovo uniformno, za razliku od područja B gdje jačaju turbulencije, pa je tako omjer turbulentne i uredene komponente magnetskog polja jednak 0.2 za područje A i 0.8 za područje B.



Slika 4: U crno-bijeloj boji su prikazana promatranja Polarnog plamička snimljena Herschel teleskopom na $250 \mu\text{m}$. Preko njih su crvenim linijama nacrtane projekcije magnetskog polja na ravninu neba izračunate u [9]. Duljine segmenta odgovaraju udjelu linearne polarizacije svjetlosti, a skala od 2% naznačena je na slici. Preuzeto iz [10]

2.3 LOFAR-ova promatranja



Slika 5: Prikaz Superterpa - centralnog dijela LOFAR-a iz ptičje perspektive. Preuzeto iz [11].

LOFAR (eng. *LOw-Frequency ARray*) je radioteleskop sačinjen od približno 20 000 antena i 52 stanice rasprostranjene diljem Europe. Većina stanica se nalazi u Nizozemskoj koja je ujedno i sjedište teleskopa. Opažanja se vrše na principu interferometrije s mogućnošću prikupljanja signala u rasponu frekvencija od 10 do 240 MHz, odnosno valnih duljina od 1.2 do 30 m. LOFAR sadrži dvije vrste antena, svaka je optimizirana za određen interval frekvencija. Prva je LBA (eng. *Low Band Antenna*) vrsta antena namijenjena za promatranja na 30 - 80 MHz, a druga je HBA (eng. *High Band Antenna*) na 110 MHz - 240 MHz. Primljeni signali odlaze u prijemnik (eng. *reciever unit*, RCU) gdje se filtriraju, amplificiraju, pretvaraju u frekvencije osnovnog pojasa i digitaliziraju. Nakon toga dobiveni signali odlaze u hardver za procesuiranje digitalnih signala (eng. *digital signal processing hardver*, DSP), pa u lokalnu kontrolnu jedinicu (eng. *local control unit*, LCU), a zatim u preostale jedinice za primarnu obradu podataka.

LOFAR detektira zračenje s nekog izvora u obliku Q i U Stokesovih parametara koji spojeni u kompleksan zapis daju vektor ukupne polarizacije P.

$$P(\lambda^2) = Q + iU \quad (3)$$

Duljina vektora P određuje iznos ukupne polarizacije |P|, dok kut koji zatvara sa x-osi određuje kut polarizacije χ koji glasi:

$$\chi = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (4)$$

U ovom radu ćemo analizirati slike polariziranog sinkrotronskog zračenja Polarnog plamčića izrađene iz LOFAR-ovog promatranja s oznakom L182797. Promatranje je napravljeno u HBA DUAL INNER konfiguraciji

antena (vidi [11]) u prosincu 2011. i rasponu frekvencija od 115 do 180 MHz. Pokriva površinu od $\approx 9.9^\circ \times 9.9^\circ$ sa sjevernim nebeskim polom (na koordinatama RA = 0° i Dec = 90°) u centru. Slike polariziranog zračenja, dobivene iz ovog promatranja, dane su u obliku FITS (eng. *Flexible Image Transport System*) datoteka Stokesovih Q i U kocki na različitim frekvencijama te jedne tekstualne datoteke s popisom svih frekvencija danih kocki. Spektralna rezolucija slika je 0.2 MHz.

2.4 Sinteza mjere rotacije

Kako bi razdvojili promatranu polariziranu emisiju prema stupnju Faradayeve rotacije koju je doživjela, upotrijebili smo metodu sinteze mjere rotacije (vidi [3] i [12]). Ova metoda pretvara ukupni polarizirani intenzitet P u ukupni polarizirani intenzitet po Faradayevj dubini pomoću sljedeće Fourierove transformacije (vidi [3]):

$$F(\Phi) = \frac{1}{W(\lambda^2)} \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\Phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (5)$$

gdje je $W(\lambda^2)$ težinska funkcija i $F(\Phi)$ predstavlja promjenu vektora ukupne polarizacije P po jedinici Faradayeve dubine. Drugim riječima, sintetiziraju se kocke mjera rotacije, po čemu je ova metoda i dobila ime. Za provedbu RM sinteze nad željenim podacima u ovome radu smo se koristili Python skriptom sa [12]. Kako bi odradio sintezu, programu je potrebno dati FITS datoteke Stokesovih Q i U kocki te tekstualnu datoteku s popisom frekvencija kocki. Programu je moguće dati i dodatne argumente poput iznosa najmanje i najveće Faradayeve dubine u izlaznim kockama te prirasta Faradayeve dubine između slika u RM kocki. Kao produkt analize dobije se pet datoteka. Tri su FITS datoteke koje redom sadrže kocku ukupne linearne polarizacije (P kocku), odrotiranu (Faradayevu) U kocku i odrotiranu (Faradayevu) Q kocku. Preostale dvije su tekstualnoga tipa od kojih jedna sadrži informacije o funkciji širenja mjere rotacije, a druga je dnevnička datoteka sastavljena od naredbenih linija korištenih za dobivanje izlaznih datoteka programa.

2.5 RHT analiza

Kotrljajući Hughov transform (eng. *Rolling Hough transform*, RHT) je modifikacija Hughovog transformata i služi za detekciju ravnih linija. RHT radi na način da za svaki pojedini piksel slike odredi vjerojatnost da je taj piksel dio neke koherentne linearne strukture. RHT procedura prikazana je na Sl. 6. Prvi korak je zamućivanje slike konvolucijom pomoću takozvanog *top-hat smoothing kernela*. Zamućena slika se onda oduzme od origi-

nalne i limitira na način da se dobije maska bitova (eng. *bitmask*).

Produkt RHT procedure je funkcija $R(\vartheta, x, y)$ u kojoj su x i y koordinate piksela na slici, a ϑ je kut koji parametrizira ravnu liniju zajedno s udaljenošću od ishodišta $\rho = x\cos\vartheta + y\sin\vartheta$. Kut ϑ je jednak 0° u smjeru sjevera slike i raste suprotno smjeru kazaljke na satu. Karakteristike ravnih linije koje će algoritam detektirati mogu se kontrolirati pomoću tri ulazna parametra. Prvi parametar je promjer *smoothing kernela* D_k i on kontrolira potiskivanje velikih skala na slici, čime do izražaja dolaze manje strukture. Drugi parametar je promjer prozora (eng. *window diameter*) D_w koji određuje najmanju dužinu ravne linije koju će RHT detektirati. Posljednji parametar je prag vjerojatnosti (eng. *probability threshold*) Z koji definira donji prag vjerojatnosti za koju se prihvaća da je određeni piksel dio neke koherentne linije.

Vizualizacija linearnih struktura pronađenih RHT-om dobiva se integracijom funkcije $R(\vartheta, x, y)$ po svim ϑ :

$$R(x, y) = \int R(\vartheta, x, y) d\vartheta \quad (6)$$

Kako bi kvantificirali relativne smjerove linearnih struktura određenih RHT-om, koristimo metriku iz [13]

definiranu kao:

$$\tilde{R}(\vartheta) = \frac{1}{N} \int \int R(\vartheta, x, y) dx dy \quad (7)$$

gdje integral ide po krugu u čijem centru je odabrana zvijezda, a N je normalizacijski faktor takav da vrijedi:

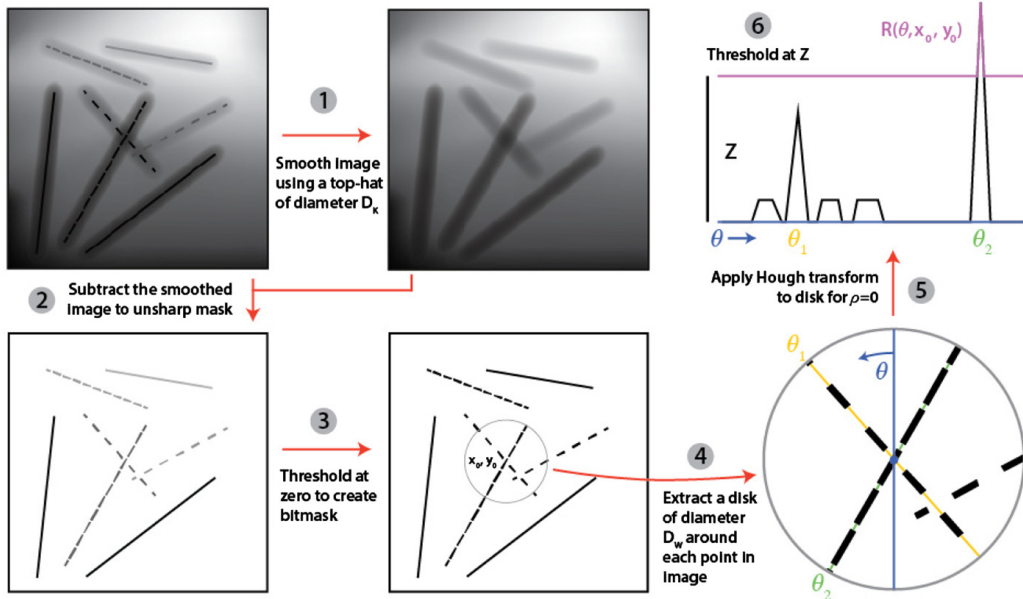
$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}(\vartheta) d\vartheta = 1 \quad (8)$$

Rezultati se zatim ucrtavaju na polukružni graf tako da 0° predstavlja smjer paralelan Galaktičkoj ravnini, a 90° i -90° smjerove okomite na Galaktičku ravninu. Kako bi izračunali srednju vrijednost kuta $\bar{\vartheta}$ i njegovu standardnu devijaciju koristimo se sljedećim izrazima iz [14]:

$$S = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}^2 e^{2i\vartheta} d\vartheta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}^2 d\vartheta} \quad (9)$$

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{2} \text{atan2}(\text{Im}(S), \text{Re}(S)) \quad (10)$$

$$\delta\vartheta = \frac{1}{2} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{|S|^2}\right)} \quad (11)$$



Slika 6: Dijagram RHT procedure. Preuzeto iz [13].

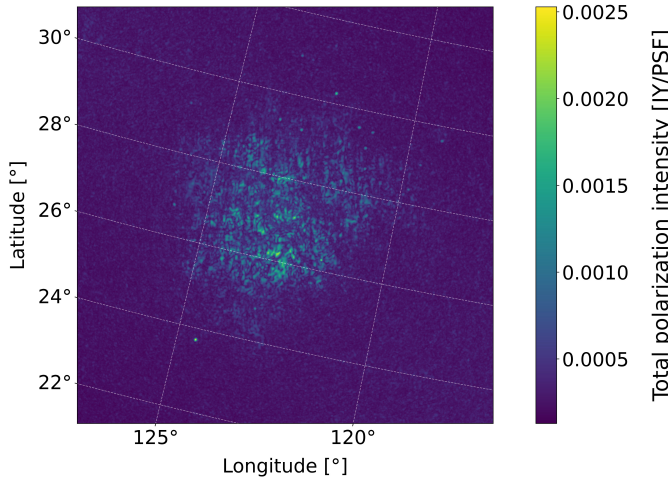
3 Rezultati

Podatke o polariziranom sinkrotronskom zračenju prikupljene LOFAR-om smo proveli kroz RM sintezu (vidi [12]) za Faradayeve dubine između -50 rad m^{-2} i $+50 \text{ rad m}^{-2}$ u koracima od 0.25 rad m^{-2} . Iz dobivene Faradayeve P kocke smo zatim napravili dvije slike maksimalne polarizacije: jednu za raspon Faradayevih dubina od -50 do -5.75 rad m^{-2} i jednu za raspon od -5.75 do 50 rad m^{-2} .

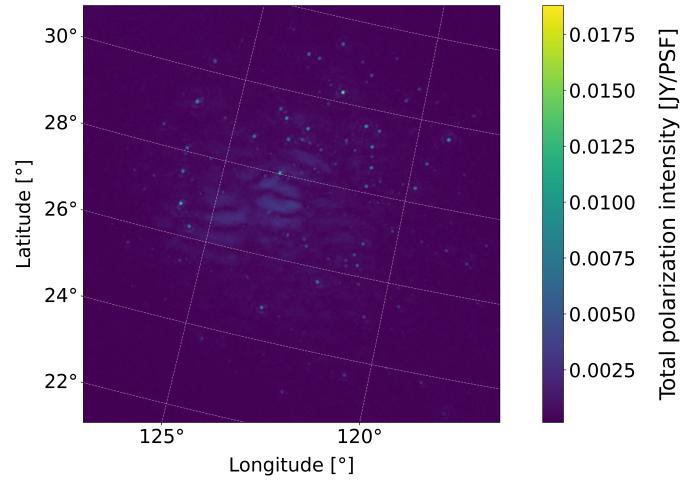
Na Slici 7 primjećujemo veoma interesantne tamne linearne strukture koje se zovu depolarizirani kanali. Na

ovim područjima nema polarizirane emisija, a razlog njihovog nastanka se pripisuje depolarizaciji snopa radi gradijenta mjere rotacije (vidi [15]).

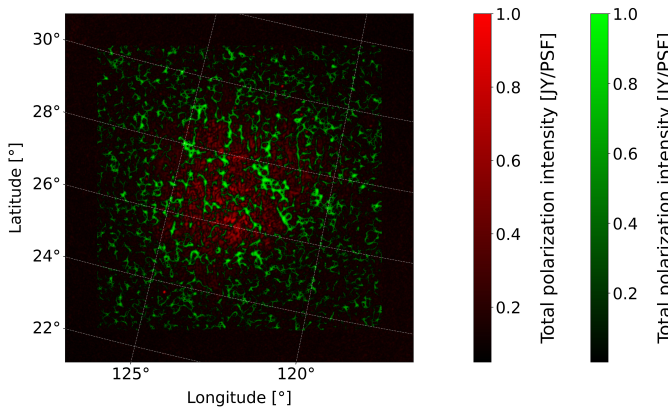
Kako bi odredili smjer pronađenih depolariziranih kanala, napravili smo inverz Slike 7 i proveli ga kroz RHT algoritam (vidi [16]). Za ulazne parametre D_k , D_w i Z isprobali smo nekoliko kombinacija. Slika 9 je primjer lošeg odabira ulaznih parametara, dok na Slici 10, gdje su korištene optimalne vrijednosti $D_k = 4$ arcmin, $D_w = 50$ arcmin i $Z = 0.8$, vidimo jasne ravne linije na mjestima depolariziranih kanala.



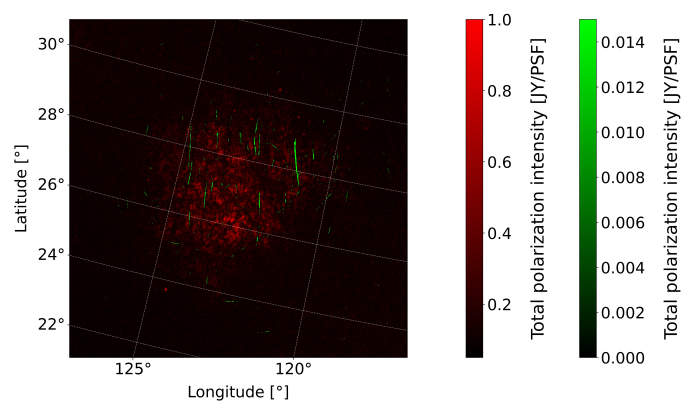
Slika 7: Graf maksimalnog ukupnog polariziranog intenziteta za raspon Faradayevih dubina od -50 do -5.75 rad m^{-2} .



Slika 8: Graf maksimalnog ukupnog polariziranog intenziteta za raspon Faradayevih dubina od -5.75 do 50 rad m^{-2} .



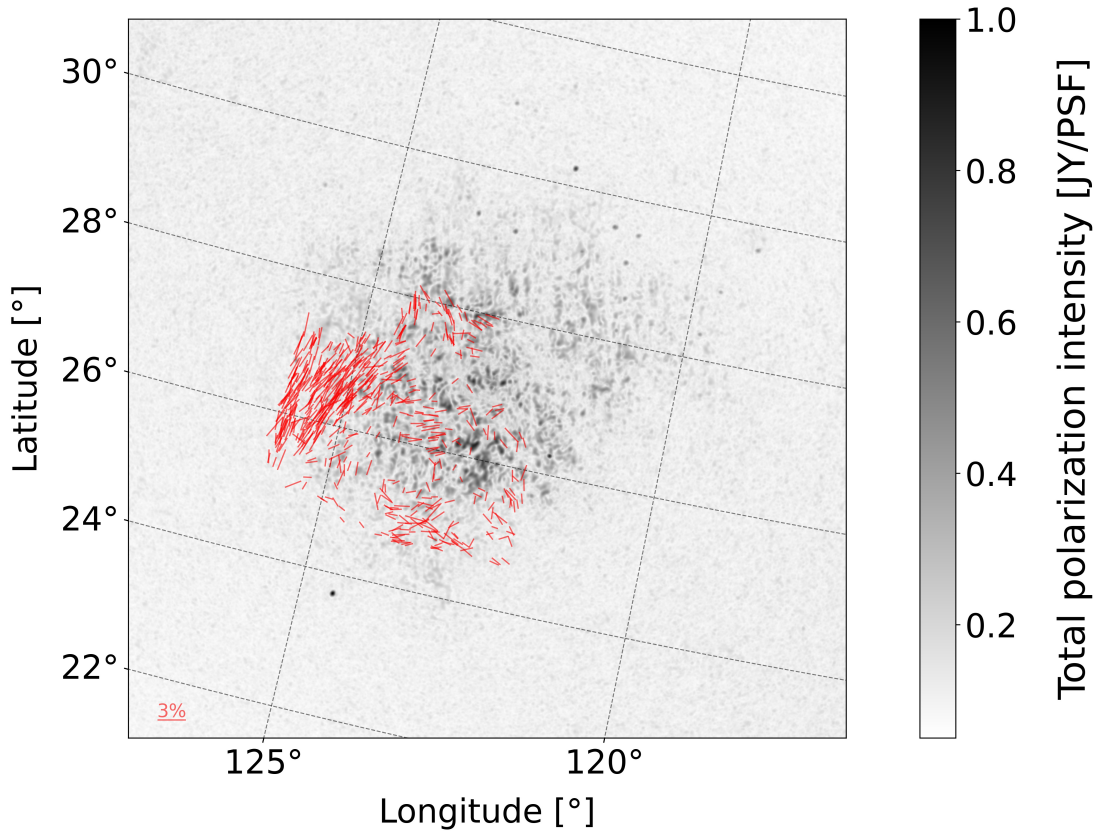
Slika 9: Graf prikazuje maksimalno ukupno polarizirano zračenje Polarnog plamička u crvenim bojama iznad kojeg je zelenim bojama vizualizirana RHT projekcija za ulazne parametre $D_k = 50'$, $D_w = 8'$ i $Z = 0.8$.



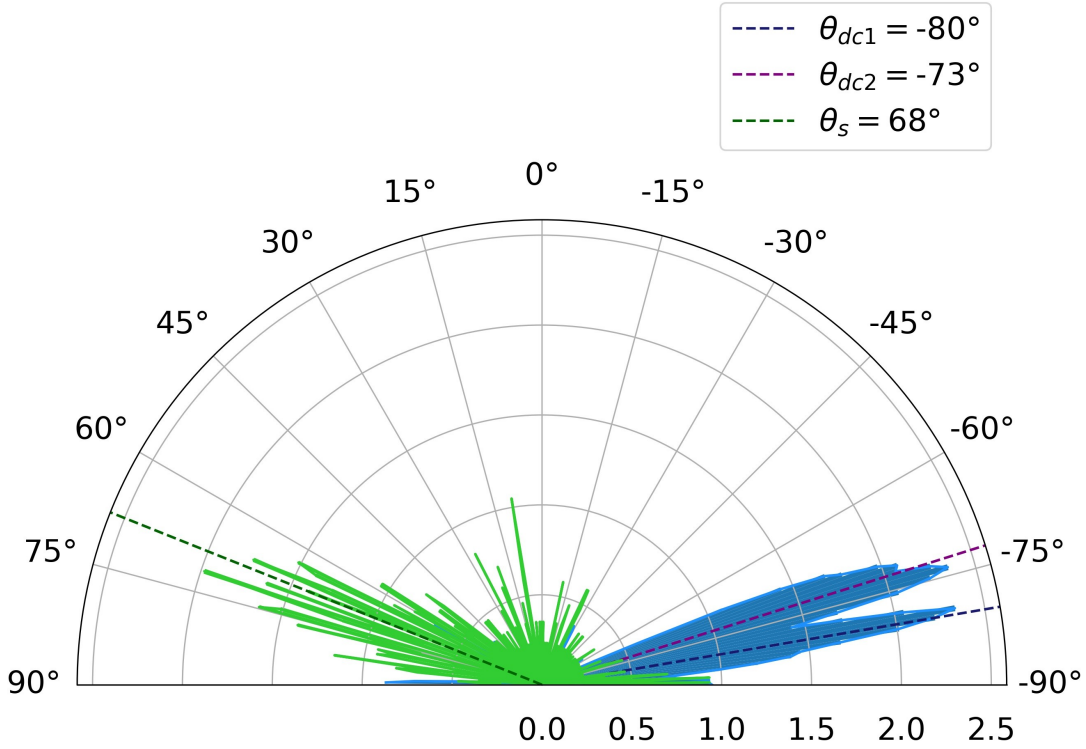
Slika 10: Graf prikazuje maksimalno ukupno polarizirano zračenje Polarnog plamička u crvenim bojama iznad kojeg je zelenim bojama vizualizirana RHT projekcija za ulazne parametre $D_k = 4'$, $D_w = 50'$ i $Z = 0.8$.

Orijentacije depolariziranih kanala smo zatim prikazali na polukružnom grafu (vidi Sl. 12) i izračunali prosječne vrijednosti za dva dominantna smjera. Rezultati računa su $\bar{\vartheta}_{dc1} = -80^\circ \pm 2^\circ$ i $\bar{\vartheta}_{dc2} = -73^\circ \pm 2^\circ$. Istu proceduru smo napravili i s podacima o polarizaciji svjetlosti zvijezda preuzetih iz [9], kako bi odredili postoji li korelacija između orijentacija depolariziranih kanala i kom-

ponente magnetskog polja projicirane na ravninu neba. Sa Slike 11 smo naslutili da će se većinski dio polarizacija okupiti oko ravnine okomite na Galaktičku ravninu, što gledajući Sliku 12 na kraju doista i biva slučaj. Za prosječan smjer polarizacije svjetlosti zvijezda smo dobili $\bar{\vartheta}_s = 68^\circ \pm 2^\circ$.



Slika 11: Prikaz invertirane slike maksimalnog ukupnog polariziranog zračenja detektiranog LOFAR-om u crno-bijeloj boji preko koje su crvenim linijama ucrtane polarizacije zvijezda dobivene RoboPol-ovim promatranjima. Duljine segmenta odgovaraju udjelu linearne polarizacije svjetlosti, a skala od 3% je naznačena na slici.



Slika 12: Plavom bojom su prikazane relativne orijentacije depolariziranih kanala detektirane u Polarnom plamičku za ulazne parametre RHT algoritma $D_k = 4'$, $D_w = 50'$ i $Z = 0.8$. Zelenom bojom su prikazane polarizacije svjetlosti zvijezda detektirane RoboPol-om. Smjer polarizacija je zbog međuzvjezdane ekstinkcije paralelan smjeru magnetskog polja. Isprekidanim linijama su označeni dominantni smjerovi depolariziranih kanala i polarizacija, dok je smjer paralelan Galaktičkoj ravnini definiran u 0° .

4 Zaključak

U ovom seminaru su ukratko opisana najvažnija obilježja Mliječne staze, objašnjeni su pojmovi međuzvjezdane tvari i molekularnog oblaka te je karakteriziran Polarni plamičak. Također, opisani su podaci o polariziranoj sinkrotronskoj emisiji, detektiranoj radioteleskopom LO-FAR na frekvencijama 115 - 180 MHz, i podaci o magnetskom polju dobivenom iz polarizacije svjetlosti zvijezda detektirane fotopolarimetrom RoboPol kroz crveni filter, te su za oba instrumenta navedene najvažnije značajke.

Nad slikama polarizirane sinkrotronske emisije provedena je RM sinteza koristeći skriptu [12]. Kao jedan od produkata sinteze, dobivena je Faradayeva P kocka iz koje su napravljene dvije slike maksimalne polarizacije. Na Sl. 7, napravljenoj na Faradayevim dubinama od -50 do -5.75 rad m^{-2} , uočeni su depolarizirani kanali - područja bez polarizirane emisije. Orijetacije depolariziranih kanala određene su RHT metodom koristeći skriptu [16] i ucrtane na polukružan graf (vidi Sl. 12).

Na isti graf su ucrtane i polarizacije svjetlosti zvijezda preuzete iz [9]. Dominantni smjerovi kanala i polarizacija su redom $\bar{\theta}_{dc1} = -80^\circ \pm 2^\circ$, $\bar{\theta}_{dc2} = -73^\circ \pm 2^\circ$ i $\bar{\theta}_s = 68^\circ \pm 2^\circ$.

Iz dobivenih rezultata prikazanih na Slici 12 zaključujemo da se orijentacije depolariziranih kanala u Polarnom plamičku ne poklapaju s polarizacijama svjetlosti zvijezda te time ne prate smjer lokalnog magnetskog polja, kako je to slučaj za polje 3C196 (vidi [17]).

5 Zahvale

Ovim putem želim izraziti veliku zahvalnost svom mentoru, dr. sc. Viboru Jeliću, na uloženom vremenu i strpljenju te izvanrednom vodstvu prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem asistentici Ani Erceg i asistentu Luki Turiću iz Laboratorija za astročestičnu fiziku i astrofiziku na Institutu Ruđer Bošković na dodatnoj pomoći.

Literatura

- [1] Sparke, L. S.; Gallagher JOHN S., I. *Galaxies in the Universe*. [S.l.: s.n.], 2007.
- [2] CARROLL, B. W.; OSTLIE, D. A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2nd (international). ed. [S.l.: s.n.], 2007.
- [3] Brentjens, M. A.; de Bruyn, A. G. Faraday rotation measure synthesis. , v. 441, n. 3, p. 1217–1228, out. 2005.
- [4] Whittet, D. C. B. Polarization of Starlight. In: Witt, A. N.; Clayton, G. C.; Draine, B. T. (Ed.). *Astrophysics of Dust*. [S.l.: s.n.], 2004. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 309), p. 65.
- [5] Heithausen, A.; Thaddeus, P. The Polaris Flare: Extensive Molecular Gas near the North Celestial Pole. , v. 353, p. L49, abr. 1990.
- [6] Schlafly, E. F. et al. A Large Catalog of Accurate Distances to Molecular Clouds from PS1 Photometry. , v. 786, n. 1, p. 29, maio 2014.
- [7] Ramaprakash, A. N. et al. RoboPol: a four-channel optical imaging polarimeter. , v. 485, n. 2, p. 2355–2366, maio 2019.
- [8] King, O. G. et al. The RoboPol pipeline and control system. , v. 442, n. 2, p. 1706–1717, ago. 2014.
- [9] Panopoulou, G. et al. Optical polarization map of the Polaris Flare with RoboPol. , v. 452, n. 1, p. 715–726, set. 2015.
- [10] Panopoulou, G. V.; Psaradaki, I.; Tassis, K. The magnetic field and dust filaments in the Polaris Flare. , v. 462, n. 2, p. 1517–1529, out. 2016.
- [11] van Haarlem, M. P. et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray. , v. 556, p. A2, ago. 2013.
- [12] BRENTJENS, M. *RM-Synthesis*. Disponível em: <<https://github.com/brentjens/rm-synthesis>>.
- [13] Clark, S. E.; Peek, J. E. G.; Putman, M. E. Magnetically Aligned H I Fibers and the Rolling Hough Transform. , v. 789, n. 1, p. 82, jul. 2014.
- [14] Jelić, V. et al. Magnetically aligned straight depolarization canals and the rolling Hough transform. , v. 615, p. L3, jul. 2018.
- [15] Haverkorn, M.; Heitsch, F. Canals beyond Mars: Beam depolarization in radio continuum maps of the warm ISM. , v. 421, p. 1011–1019, jul. 2004.
- [16] CLARK, S. *The Rolling Hough Transform (RHT)*. Disponível em: <<https://github.com/seclark/RHT>>.
- [17] Turić, L. et al. Multi-tracer analysis of straight depolarisation canals in the surroundings of the 3C 196 field. , v. 654, p. A5, out. 2021.