

Molekularni oblaci - Faradayeva tomografija " Polarnog plamička "

Erceg, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:217:382589>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Ana Erceg

MOLEKULARNI OBLACI - FARADAYEVA
TOMOGRAFIJA “POLARNOG PLAMIČKA”

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Ana Erceg

Diplomski rad

**Molekularni oblaci - Faradayeva
tomografija “Polarnog plamička”**

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, 2019.

Željela bih zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima, koji su bili uz mene, ne samo tokom pisanja diplomskog rada, već tijekom cijelog studija. Ponajviše bih pak, htjela zahvaliti svom mentoru, Vitoru Jeliću, koji me vodio kroz izradu ovog rada i uložio svoje vrijeme i trud u njegov nastanak.

Sažetak

Molekularni oblaci su strukture međuzvezdane materije koje se sastoje od prašine i plina te molekula, u najvećem dijelu molekula vodika. Obzirom na relativno veliku gustoću i nisku temperaturu materije unutar oblaka, to su ujedno i područja nastanka zvijezda. No, u ranim stadijima razvoja oblaci imaju manju gustoću te su razlivenijeg, često filamentarnog, oblika. Ovaj rad se fokusira na istraživanje jednog takvog difuznog oblaka, tzv. Polarnog plamička (eng. Polaris Flare), koji se nalazi u neposrednoj blizini sjevernog nebeskog pola. U radu smo koristili promatranja radioteleskopa LOFAR kako bismo napravili tomografiju ionizirane materije unutar oblaka te smo ih usporedili s promatranjima teleskopa Herschel koji detektira neutralnu komponentu materije u oblaku. Rezultati upućuju na postojanje jake komponente magnetskog polja usmjerene u smjeru od promatrača u nekim dijelovima Polarnog plamička i daju nam uvid u trodimenzionalnu sliku magnetskog polja koje dominira procesima u tom području. Proučili smo prostornu raspodjelu neutralne i ionizirane materije korištenjem programa astroHOG i pronašli vrijednosti Faradayevih dubina na kojima različite faze materije pokazuju prostornu antikorelaciju, što ide u prilog slici da isti fizikalni procesi utječu na strukturu i raspored različitih faza međuzvezdane materije.

Ključne riječi: međuzvezdana materija, magnetsko polje, Faradayeva tomografija, molekularni oblak, polarizirano zračenje

Molecular clouds - Faraday tomography of the Polaris Flare

Abstract

Molecular clouds are interstellar medium structures composed of dust, gas and molecules, mainly hydrogen. Because of relatively high density and low temperature of matter in the cloud, molecular clouds are an ideal place for star formation. In the early stages of their development they have lower density and their forms are diffuse and often filamentary. This paper focuses on a nearby diffuse molecular cloud, Polaris Flare, found in vicinity of the north celestial pole. In this paper we used LOFAR radiotelescope observations and performed tomography of ionized medium in Polaris Flare. Furthermore we compared it to the Herschel telescope observations of the neutral component of gas contained in the cloud. We found a strong line of sight component of magnetic field in some parts of the Polaris Flare. This gives us insight in the configuration of 3D magnetic field that dominates processes in the area. We have also compared the spatial distribution of neutral and ionized medium in the cloud using the astroHOG program and have found Faraday depth values at which these two phases of interstellar medium show spatial anticorrelation. This result agrees with the idea that the structure and distribution of different interstellar medium phases are dictated by the same physical processes.

Keywords: interstellar medium, magnetic field, Faraday tomography, molecular cloud, polarized radiation

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Molekularni oblaci	1
1.1.1	Karakteristike molekularnih oblaka	1
1.1.2	Podjela molekularnih oblaka	6
1.1.3	Molekularni oblaci u našoj galaksiji	7
1.2	Polarni plamičak	9
2	Podaci	14
2.1	LOFAR-ova opažanja	14
2.2	Opažanja na drugim valnim duljinama	15
3	Faradayeva tomografija Polarnog plamička	17
3.1	Metoda RM sinteze	17
3.2	Rezultati RM sinteze za područje Polarnog plamička	19
3.3	Udio polariziranog zračenja u Polarnom plamičku	20
4	Usporedba s promatranjima na drugim valnim duljinama	23
4.1	Vizualna usporedba	23
4.2	Usporedba programom astroHOG	23
4.2.1	Histogram relativne orijentacije gradijenata	25
4.2.2	Evaluacija rezultata	25
4.2.3	Rezultati	27
5	Diskusija i zaključak	31
	Literatura	35

1 Uvod

1.1 Molekularni oblaci

Molekularni oblaci su strukture međuzvjezdane materije koje se sastoje od prašine i plina sastavljenog uglavnom od molekula vodika. Obzirom na relativno veliku gustoću i nisku temperaturu materije unutar oblaka, u odnosu na ostale strukture međuzvjezdane materije koje su difuzne, pojedini grumeni prašine i plina mogu postati zameci novih zvijezda. Kako bi se nova zvijezda razvila, gravitacijsko sažimanje materije mora nadvladati tlak plina. Drugi procesi koji se odvijaju unutar oblaka se povezuju s turbulentnim gibanjima hladne i magnetizirane materije. Ipak, o molekularnim oblacima se i dalje malo zna, a za njihovo razumijevanje potrebno je analizirati promatranja na različitim valnim duljinama u kombinaciji s magnetohidrodinamičkim simulacijama.

U ostatku poglavlja detaljnije ćemo opisati molekularne oblake, dati pregled njihovih karakteristika i podijeliti ih u skupine prema zajedničkim svojstvima, većinom bazirano na [1], [2].

1.1.1 Karakteristike molekularnih oblaka

Gravitacijska povezanost molekularnih oblaka i nastanak zvijezda

Zbog visoke gustoće ($> 10^2$ čestica / cm^3) i niske temperature (oko 10 K), molekularni oblaci su pogodna mjesta za nastanak zvijezda. To možemo potvrditi koristeći izraz za Jeansovu masu, tj. masu potrebnu da bi se oblak gustoće ρ_0 i temperature T gravitacijski sažeo:

$$M_J \simeq \left(\frac{5kT}{G\mu m_H} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho_0} \right)^{1/2}. \quad (1.1)$$

U velikim molekularnim oblacima prosječna temperatura iznosi oko 10 K, dok je koncentracija čestica (većinom molekularni vodik H_2) oko $n_{H_2} = 10^{10} \text{ m}^{-3}$, što odgovara gustoći od $\rho_0 = 2m_H n_{H_2} = 3 \times 10^{-17} \text{ kg m}^{-3}$ za $\mu \simeq 2$ [1]. Iz izraza 1.1, slijedi da molekularni oblak mora imati masu veću od $M_J \sim 8 M_\odot$ da bi se počeo sažimati, što odgovara redu veličine mase gustih jezgara velikih molekularnih oblaka [1].

Vrijeme potrebno za sažimanje plina povezuje se sa slobodnim padom te je dano izrazom [2]:

$$t_{sp} = \sqrt{\frac{1}{G\rho}} \sim \frac{10^8}{\sqrt{n_{H_2}}} \text{ god.} \quad (1.2)$$

Za $n_{H_2} = 10^{10} \text{ m}^{-3}$ vrijeme sažimanja iznosi 1000 godina. Plin će se brže sažeti ukoliko se može dovoljno brzo hladiti. Ako se toplina nastala oslobađanjem gravitacijske energije ne može dovoljno brzo izbaciti iz plina, temperatura raste, a s njom raste i Jeansova masa (prema 1.1) što usporava proces sažimanja. Ukoliko plin može dovoljno brzo otpuštati oslobođenu toplinu, temperatura ostaje konstantna, a Jeansova masa se smanjuje s porastom gustoće. Zbog toga se početni oblak može razlomiti na manje komade od kojih se svaki zasebno može sažeti u protozvijezdu.

Kada bi sav molekularni materijal unutar naše galaksije pretvorili u zvijezde, očekivana stopa nastanka zvijezda bila bi $\sim 100 M_{\odot}/\text{god}$ [2]. Promatranja pokazuju stopu od $(3 - 5) M_{\odot}/\text{god}$. Moguće je da razlika nastaje ili zato što unutar molekularnih oblaka dolazi do pretvaranja manjeg dijela mase u zvijezde ili zato što turbulencija i magnetska polja usporavaju proces nastanka zvijezda. Ovo je još uvijek pitanje na kojem se intenzivno radi.

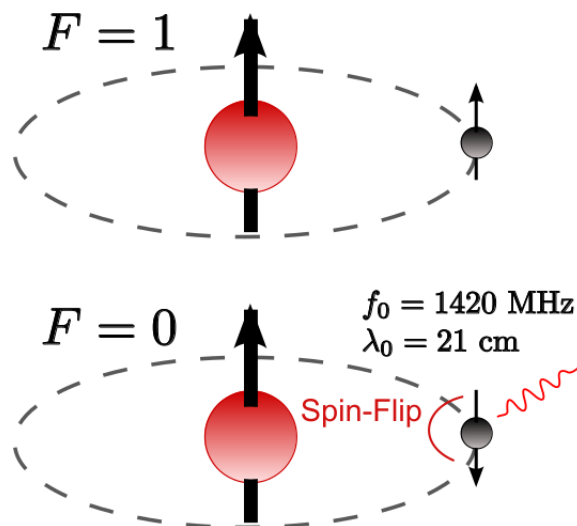
Formiranje molekula vodika

Formiranje molekula vodika moguće je samo u optički debelim dijelovima molekularnih oblaka u kojima prašina štiti vodik od izvora ultraljubičastog zračenja. Ultraljubičasto zračenje, koje pretežno stvaraju zvijezde tipa O i B, može razbiti molekule H_2 u atome vodika te ih fotodisocirati i stvoriti HII područja. Kao dodatni štiti mogu poslužiti i guste strukture atomskog vodika. Pokazano je da će plin biti većinom molekularan kada umnožak $nN^{2/3}$, gdje je n lokalna gustoća plina, a N gustoće stupca materijala koji štiti plin od zračenja (prašina i HI), dosegne kritičnu vrijednost koja ovisi o toku ultraljubičastog zračenja i količini prašine [3], [4].

Prašina potpomaže nastanku molekula vodika ne samo štiteći ga od ultraljubičastog zračenja, već služi i kao mjesto spajanja dvaju atoma vodika. Naime, vjerojatnost da se dva atoma susretnu i spoje unutar plina je vrlo malena. Problem je taj što nemaju kako osloboditi energiju, tj. takav proces je zabranjen simetrijom. S druge strane, zrnca prašine mogu preuzeti energiju koja se oslobađa prilikom nastanka molekule te na taj način ubrzati nastanak molekula vodika do 10^8 puta [2].

Detekcija molekularnih oblaka

Molekularni vodik je teško detektirati iz dva razloga. Prvi je taj što je intenzitet molekulske spektralne linije povezan sa simetrijom molekule. Molekula vodika je



Slika 1.1: Hiperfini prijelaz na valnoj duljini od 21 cm predstavlja okretanje spinova u energetski povoljniji položaj. Preuzeto s [5].

simetrična što povlači iznimno slabe spektralne linije. Drugi razlog je taj što su energije potrebne za rotaciju molekule ovisne o samoj masi molekule. Vodik je najlakša molekula i potrebno je apsorbirati veliku količinu energije kako bi mu se promijenilo rotacijsko stanje. Radi se o energiji koja odgovara temperaturi od 500 K, što je u molekularnom oblaku temperature 10 K statistički nedostižno i većina molekula je u osnovnom rotacijskom stanju. Detekcija vodika se zbog ovih komplikacija ne vrši direktno, već pomoću markera (engl. “tracers”). U molekularnim oblacima postoji više različitih molekula, a najčešće korišten marker za vodik je ugljikov monoksid (CO). Pronađena je korelacija između količine molekula CO i molekula vodika: na svaku molekulu CO dolazi oko 10 000 molekula vodika [2], [6].

Neutralni atomski vodik H I moguće je direktno detektirati pomoću spektralne linije hiperfinog prijelaza na valnoj duljini od 21 cm. U pobuđenom stanju spinovi elektrona i protona jednako su orijentirani, emisijom fotona valne duljine 21 cm atom prelazi u niže energetske stanje u kojem su spinovi okrenuti u suprotnim smjerovima. Vrijeme potrebno da dođe do ovog prijelaza je 11×10^6 godina, ali budući da vodik čini najveći dio mase u svemiru, zračenje na 21 cm prisutno je svugdje.

Tok energije unutar molekularnih oblaka

Zbog velike optičke debljine molekularnih oblaka, u iste može prodrijeti samo zračenje iz dalekog infracrvenog područja elektromagnetskog spektra te ono većih valnih



Slika 1.2: Maglica konjska glava je lijep primjer tamnog molekularnog oblaka u kojem nastaju zvijezde. Vidimo ga samo kao siluetu koju obasjavaju pozadinske zvijezde. Slika je preuzeta s [7].

duljina. Takvo zračenje zagrijava prašinu i razlog je zašto se temperatura molekularnih oblaka ne spušta ispod 10 K. Drugi način unosa energije u molekularne oblake su kozmičke zrake, odnosno mlazovi relativističkih čestica (visokoenergetske čestice koje se gibaju brzinama bliskim brzini svjetlosti). Kozmičko zračenje, nastalo većinom u eksplozijama supernova, može prodrijeti kroz prašinu i djelomično ionizirati plin u unutrašnjosti oblaka. Najveći dio energije u molekularne oblake unosi se upravo putem kozmičkih zraka.

Energija se može proizvesti i u unutrašnjosti samog molekularnog oblaka. Naime, kada se unutar molekularnog oblaka formiraju zvijezde tipa O i B, dolazi do razbijanja molekula vodika u atome i njihove fotodisocijacije u HII ione. Ovim procesom plin se može zagrijati do čak 10 000 K, pri čemu će narasti tlak plina, što može rezultirati ultrazvučnim izljevom plina iz molekularnog oblaka koji nalikuje izljevom šampanjca (engl. “champagne flow”) [2].

Molekularni oblaci gube energiju prvenstveno kroz milimetarsko zračenje CO molekula. Zbog niske temperature plina (< 100 K) sudari među česticama nisu dovoljno energetski da bi izazvali pobuđenja pojedinih atoma i molekula na više nivoe. Najniži

rotacijski nivo CO molekule nalazi se 5.5 K iznad pobuđenog stanja i pobuđuje se upravo sudarima blizu ili iznad tih energija. Takve energije postižu se u molekularnim oblacima i zbog toga se upravo CO molekule koriste kao markeri za molekularne plinove, a ne H₂ kojeg je teško detektirati.

Dinamičke skale u molekularnim oblacima

Zbog osjetljivosti molekula vodika na lokalne uvjete, kao što su gustoća okolne prašine i zračenje, sastav molekularnog oblaka može se brzo mijenjati. Vremenske skale na kojima te promjene nastaju odgovaraju vremenskim skalama na kojima se odvija nastanak zvijezda. Razlog tome možemo tražiti i u ciklusu života zvijezda koje nastaju u oblacima. Kao što je ranije objašnjeno, jako ultraljubičasto zračenje koje potječe od mladih zvijezda fotodisocira molekule vodika, a zvjezdani vjetrovi i supernove raspršuju materijal oblaka i tako ih uništavaju. Raspon starosti zvijezda pronađenih u molekularnim oblacima je $(10 - 20) \times 10^6$ godina [8], [9]. Također, većina najvećih molekularnih oblaka je u stadiju formiranja zvijezda, što znači da taj period u njihovom razvoju traje dugo. Možemo zaključiti da je vrijeme života molekularnog oblaka tek nešto duže od perioda aktivne formacije zvijezda i iznosi oko 10^7 godina.

Još jedna činjenica koja ide u prilog kratkim dinamičkim skalama evolucije molekularnih oblaka je ta da većina molekula u gustim molekularnim oblacima nije vezana za zrnca prašine. Razlog bi mogao ležati u tome što su molekularni oblaci relativno mladi ili u procesu turbulentnog miješanja unutarnjih i vanjskih slojeva oblaka.

Nehomogenost i turbulentnost molekularnih oblaka

Oblici molekularnih oblaka vrlo su nepravilni. Mnogi imaju filamentarnu strukturu ili nalikuju atmosferskim oblacima. Takvi oblici ne odgovaraju ravnotežnim konfiguracijama i mnogi autori se slažu da turbulentne pojave koje upravljaju izgledom atmosferskih oblaka i u molekularnim oblacima imaju veliku važnost. Modeli turbulencije na brzinama ispod lokalne brzine zvuka predviđaju da nasumične brzine unutar oblaka σ rastu s njegovom veličinom L kao $\sigma \sim L^{1/3}$, što se pokazalo približno točnim i za molekularne oblake [2].

Kompleksnosti molekularnih oblaka doprinosi i činjenica da nisu homogeni. Najveći molekularni oblaci sadrže područja u kojima gustoća može biti i nekoliko redova veličine veća od gustoće okoline. U najgušćim regijama zadovoljeni su uvjeti po-

trebni za nastanak protozvijezda.

Magnetska polja unutar molekularnih oblaka

Smjer magnetskog polja možemo odrediti proučavanjem (i) polariziranog termalnog zračenja prašine s maksimumom u infracrvenom području i (ii) ekstinkcije svjetlosti zvijezda u vidljivom području. Uslijed Barnett efekta (obrnutog Einstein-de Haas efekta) čestice prašine rotiraju i induciraju magnetski dipol koji se poravnava sa smjerom vanjskog magnetskog polja. Termalno zračenje poravnatih čestica prašine polarizirano je u smjeru okomitom na vanjsko magnetsko polje. Bazirajući se na ovoj činjenici, kolaboracija Planck izvršila je promatranja na mikrovalnim duljinama koja su rezultirala mapom magnetskog polja galaksije [10], [11] koju ćemo koristiti u ovom radu.

Promatranje ekstinkcije svjetlosti zvijezda prilikom prolaska kroz međuzvjezdane materiju također može poslužiti za određivanje magnetskog polja. Naime, zrnca prašine nepravilnog su oblika i imaju različit koeficijent apsorpcije za svjetlost različitih valnih duljina. Određivanjem polarizacije zračenja pojedine zvijezde možemo dobiti informacije o komponenti magnetskog polja u ravnini neba. Na tom principu radi instrument RoboPol [12], [13] čije ćemo podatke također koristiti u ovom radu.

O magnetskim poljima unutar molekularnih oblaka ne zna se mnogo. Njihova interakcija s molekularnim plinom te utjecaj u različitim uvjetima i stadijima nastanka i razvoja zvijezda još uvijek su otvorena pitanja na koja se nastoji pronaći odgovor. Magnetohidrodinamičke simulacije turbulencija pokazuju da relativne orijentacije struktura i magnetskog polja uvelike ovise o utjecaju gravitacije. U gustim, samogravitirajućim područjima, strukture su okomite na magnetsko polje. U rjeđim područjima, gdje gravitacija ima manji utjecaj, strukture su paralelne magnetskim poljima. Ovakvo ponašanje potvrđuju i promatranja [15].

1.1.2 Podjela molekularnih oblaka

Budući da se uvjeti unutar molekularnih oblaka mogu jako razlikovati, teško ih je strogo podijeliti. Ipak, moguće ih je podijeliti u šire skupine prema njihovim zajedničkim karakteristikama [1].

1. **Difuzni molekularni oblaci** (ili prozirni molekularni oblaci) sadrže plin uglav-

nom atomskog vodika, dok se molekularni vodik može pronaći u gušćim područjima. U ovakvim oblacima uvjeti su slični kao u HI područjima, a razlika je u tome što su difuzni molekularni oblaci veće mase (3 - 100 M_{\odot}). Veličine su nekoliko parseka te su obično nepravilnog oblika. U ovakvim molekularnim oblacima ne nastaju zvijezde.

2. **Divovski molekularni oblaci** su puno veći, u prosjeku su dimenzija 50 parseka i mase do 10 M_{\odot} . Karakteristika divovskih molekularnih oblaka je veliki broj tamnih i hladnih područja znatno veće lokalne gustoće. Najveće takve strukture su kompleksi tamnih oblaka koji se prostiru kroz područja promjera desetak parseka. Slične izolirane nakupine hladnog molekularnog plina (molekularne jezgre) možemo pronaći i na skalama od nekoliko parseka. Koncentracije u ovakvim strukturama još su veće, reda veličine 10^9 m^{-3} . Možemo ih detektirati prateći koncentraciju molekula CO. Na još manjim skalama (0.1 pc) nalazimo guste jezgre masa reda veličine 10 M_{\odot} . Njih detektiramo prateći količinu amonijaka. Također, u nekim lokaliziranim dijelovima velikih molekularnih oblaka, možemo pronaći i vruće jezgre veličina 0.05 do 0.1 pc iznimno visokih temperatura (do 300 K) i gustoće. Prema promatranjima infracrvenih teleskopa (NASA Spitzer Space Telescope, ESA Infrared Space Observatory), vruće jezgre sadrže masivne O i B zvijezde, što upućuje na to da se radi o područjima nedavne formacije zvijezda.
3. **Bokovi oblaci** su mali molekularni oblaci gotovo sferičnog oblika, velike mase od nekoliko stotina M_{\odot} . Pronalazimo ih na skalama od 1 pc. Istraživanja na infracrvenim frekvencijama pokazala su da u središtima Bokovih oblaka postoje mlade zvijezde niskog luminoziteta. Bokovi oblaci su također mjesta aktivne formacije zvijezda. Predstavljaju guste jezgre koje su izgubile okolni molekularni plin zbog utjecaja bliskih vrućih i masivnih zvijezda.

1.1.3 Molekularni oblaci u našoj galaksiji

Masa naše galaksije je oko $7 \times 10^{11} M_{\odot}$, masa neutralnog vodika HI sadržanog u Mliječnom putu je otprilike $(4 - 8) \times 10^9 M_{\odot}$, a masa molekularnog vodika je otprilike duplo manja [2]. Na slici 1.3 prikazana je raspodjela atomskog i neutralnog

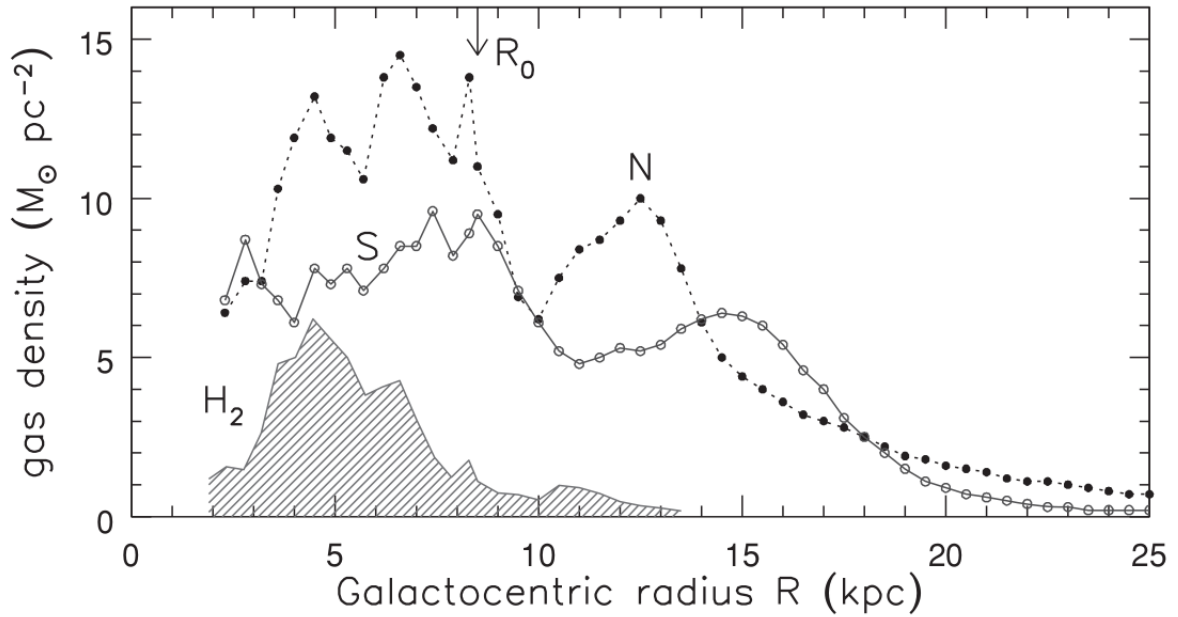
molekularni oblaci	koncentracija čestica [m^{-3}]	temperatura [K]	masa [M_{\odot}]	A_V
difuzni	5×10^9	15 – 50	3 – 100	1 – 5
divovski:	$1 - 3 \times 10^8$	15	10^5	
kompleksi tamnih oblaka	5×10^8	10	10^4	5
molekularne jezgre	10^9	10	30	10
guste molekularne jezgre	10^{10}	10	10	> 10
vruće jezgre	$10^{13} - 10^{15}$	100 – 300	10 – 3000	50 – 1000
Bokovi oblaci	$> 10^{10}$	10	1 – 1000	10

Tablica 1.1: Karakteristične vrijednosti veličina važnih za klasifikaciju molekularnih oblaka. A_V je međuzvezdana ekstinkcija u V pojasu valnih duljina centriranom na 551 nm. Međuzvezdana ekstinkcija predstavlja razliku u prividnoj magnitudi zračenja određene valne duljine do koje dolazi prilikom prolaska zračenja kroz molekularni oblak. Podaci su preuzeti iz [2].

plina u našoj galaksiji. Možemo vidjeti da je gotovo sav molekularni vodik smješten unutar radijusa R_0 na kojem se nalazi Sunce, dok se velika količina atomskog vodika može naći i na puno većim udaljenostima od središta galaksije. Iako molekularni vodik čini samo 1% ukupnog volumena međuzvezdane materije, zahvaljujući svojoj velikoj gustoći čini gotovo polovicu mase međuzvezdane materije sadržane unutar radijusa na kojem se nalazi Sunce. Također, možemo uočiti maksimum koncentracije molekularnog vodika u prstenu oko središta galaksije na radijusu od oko 4 kpc. Na manjim radijusima nalazimo puno manje atomskog i molekularnog vodika, sve do 200 pc, gdje se nakuplja velika količina prašine koja kruži oko središnje supermasivne crne rupe i štiti plin od zračenja te omogućava formiranje molekularnog vodika. U tom području nalazimo gotovo 10% ukupne mase molekularnog vodika u našoj galaksiji. Molekularni plin se uglavnom nalazi u galaktičkoj ravnini, na visinama ne većim od 75 pc, dok atomski plin nalazimo i na većim galaktičkim visinama. Iznad 1 - 2 kpc nalazimo gotovo samo ionizirani plin.

Mliječni put je spiralna galaksija i većinu gustih molekularnih oblaka, prašine i mladih zvijezda nalazimo upravo u spiralnim krakovima. Tu nalazimo divovske molekularne oblake i Bokove oblake, dok difuzne molekularne oblake možemo pronaći nekoliko kiloparseka iznad galaktičke ravnine.

U ovom radu proučit ćemo jedan difuzni molekularni oblak koji se nalazi u blizini sjevernog nebeskog pola, tzv. Polarni plamičak. U sljedećem poglavlju navest ćemo za sada poznate karakteristike Polarnog plamička i osvrnuti se na rezultate nedavnih istraživanja koje ćemo koristiti u ovom radu.



Slika 1.3: Raspodjela atomskog i molekularnog vodika u Mliječnom putu. Površinska gustoća atomskog vodika je zasebno procijenjena za sjevernu (N) i južnu (S) polutku galaksije. Površinska gustoća molekularnog oblika procijenjena je iz intenziteta emisije molekula CO. R_0 označava radijus na kojem se nalazi Sunce. Preuzeto iz [2].

metoda	d(pc)	referenca
zvjezdana ekstinkcija, bliski oblaci	≤ 240	Heithausen et al. (1990) [16]
povezanost sa zvijezdama	125 ± 25	Zagury et al. (1999) [17]
relacija dimenzija - širina linije	205 ± 62	Brunt et al. (2003) [18]
zvjezdana ekstinkcija	390 ± 34	Schlafly et al. (2014) [19]

Tablica 1.2: Procjene udaljenosti Polarnog plamička iz različitih izvora. Preuzeto iz [15].

1.2 Polarni plamičak

Polarni plamičak (engl. “Polaris Flare”) je difuzni molekularni oblak koji se nalazi iznad galaktičke ravnine, u blizini sjevernog nebeskog pola i zvijezde Sjevernjače (engl. “Polaris”). Sastavljen je dijelom od neutralnog, a dijelom od molekularnog vodika i ne pokazuje znakove aktivne formacije zvijezda. Iako je Polarni plamičak jako difuzan, promatranja teleskopom Herschel-SPIRE otkrila su filamentarnu i grudastu strukturu međuzvjezdanog materijala [15].

Udaljenost molekularnih oblaka teško je odrediti pa je raspon udaljenosti Polarnog plamička još uvijek vrlo širok, od 100 do 400 parseka. Pregled radova i metoda korištenih za određivanje udaljenosti dan je u tablici 1.2 preuzetoj iz [15]. Budući da ne postoji konsenzus oko točne udaljenosti Polarnog plamička, tablica 1.2 prikazuje do sada napravljene procjene.

Procjena iz rada [16] temelji se na procjeni crvenjenja zvijezda uslijed ekstinkcije [14]. Budući da zvijezda Sjevernjača pokazuje polarizaciju induciranu prašinom, Polarni plamičak postavljen je ispred zvijezde. Tadašnja procjena udaljenosti zvijezde Polaris bila je 109 - 240 pc, pa je udaljenost Polarnog plamička procijenjena na < 240 pc.

U radu [17] uspoređena su promatranja IRAS satelita na 100 μm s optičkim slikama i zaključeno je da je zvijezda Sjevernjača izvor zračenja koje zagrijava molekularni oblak. Kako bi doprinos zagrijavanju prašine bio minimalan u odnosu na međuzvezdano zračenje, Polarni plamičak postavljen je na udaljenost 6 - 25 pc ispred zvijezde Sjevernjače.

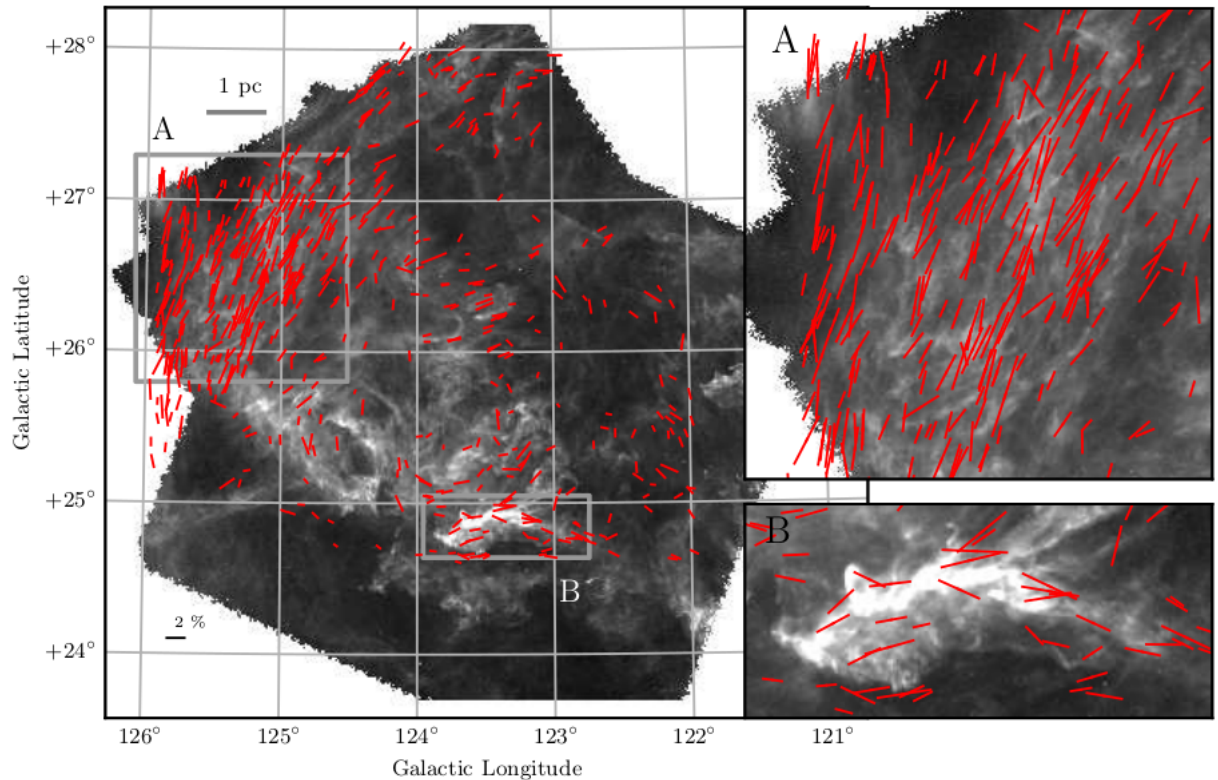
Udaljenost Polarnog plamička u radu [18] procijenjena je koristeći metodu PAC (“Principal Component Analysis”) za analizu podataka u više dijelova elektromagnetskog spektra. Istraživanje se temeljilo na relaciji veličina - širina linije, a dobiveni su rezultati konzistentni s prethodnima.

Udaljenost Polarnog plamička u radu [19] procijenjena je korištenjem fotometrijskih mjerenja Pan-STARRS1 pregleda neba. Dobivena procjena je znatno veća od ostalih, ali treba imati na umu da su korištena promatranja izvršena na samim rubovima molekularnog oblaka.

U radu [15] promatrana je polarizacija zračenja zvijezde Sjevernjače, a dobiveni rezultat ide u prilog ideji da je Polarni plamičak bliže Suncu nego zvijezda Sjevernjača koja se nalazi na udaljenosti od 99 do 133 pc [20].

Analiza spektra snage zračenja međuzvezdane materije u Polarnom plamičku pokazala je da ga možemo opisati zakonom potencija (engl. “power law”) s eksponentom -2.7 ± 0.1 [13]. Konstantan nagib spektra snage potvrđen je sve do skale od 0.01 pc (kutna rezolucija instrumenta SPIRE kojim je izvršeno promatranje), što upućuje na to da je turbulencija glavni faktor u organizaciji struktura čak i na tim skalama.

U radu [15] detaljno su proučena dva područja prikazana na slici 1.2. U području A nalaze se difuzne strukture prašine, tzv. brazde (engl. “striations”) i magnetsko polje je gotovo uniformno, dok se u području B nalazi filament koji ima najveću gustoću stupca materije duž doglednice, a magnetsko polje je manje uniformno u odnosu na područje A. Uz pretpostavku da magnetsko polje možemo rastaviti na turbulentnu i uređenu komponentu, pronađen je omjer turbulentnosti i uređenosti za dva odabrana polja od 0.2 za polje A i 0.8 za polje B. To znači da je magnetsko polje u oba



Slika 1.4: Slika dijela Polarnog plamička snimljena teleskopom Herschel na $250 \mu\text{m}$ prikazana je crno-bijelo. Crveni segmenti predstavljaju projekcije magnetskog polja na ravninu neba dobivene promatranjem polarizacije zračenja pozadinskih zvijezda, izračunate u radu [12]. Duljina segmenta odgovara udjelu linearne polarizacije. Područja A i B detaljno su proučena u radu [15], a ovdje navodimo njihove rezultate. Skale od 1 pc i 2% linearne polarizacije prikazane su u gornjem i donjem lijevom kutu. Preuzeto iz [15].

slučaja jače ili usporedivo s turbulentom komponentom te da ima dinamičku važnost u oba područja. Kombiniranjem navedenih rezultata zaključeno je da se nagib magnetskog polja u dva proučavana područja razlikuje od 6° do 30° .

Proučavanje Polarnog plamička instrumentom RoboPol pokazalo je da magnetsko polje na velikim galaktičkim širinama prati linearne, difuzne brazde, a u samom središtu Polarnog plamička ima vrtložnu strukturu [15], [12]. Otkriveno je da se orijentacija projekcije magnetskog polja na ravninu neba uglavnom poklapa s orijentacijom linearnih struktura prašine, filamenata i brazda, ali postoje i odstupanja. Poklapanje je najveće u područjima u kojima je udio linearne polarizacije zračenja najveći. Do razlike u udjelu linearno polariziranog zračenja u različitim područjima Polarnog plamička (npr. područja A i B na slici 1.2) može doći iz više razloga zato što udio

linearno polariziranog zračenja p_d u ukupnom zračenju ovisi o nekoliko faktora [21]:

$$p_d = p_0 R F \cos^2 \gamma, \quad (1.3)$$

gdje je γ kut između smjera magnetskog polja i ravnine neba, p_0 je faktor koji odražava polarizirajuću sposobnost zrnaca prašine s obzirom na njihova geometrijska i kemijska svojstva, R je Reyleighjev redukcijski faktor [22] koji kvantificira stupanj poravnanja zrnaca prašine s magnetskim poljem, a faktor F uzima u obzir promjene u orijentaciji magnetskog polja duž doglednice. Različite kombinacije ovih faktora mogle su imati utjecaj na razlike u p_d .

Rezultati iz rada [23] upućuju na činjenicu da su temperatura i gustoća prašine u Polarnom plamičku gotovo konstantne vrijednosti, što znači da nema značajnih razlika u svojstvima zrnaca prašine i da faktori p_0 i R vjerojatno nemaju velik utjecaj na razlike u udjelu linearno polariziranog zračenja.

S druge strane, moguće je da su razlike produkt 3D konfiguracije magnetskog polja, odnosno da područja s većim p_d imaju veću vrijednost faktora $\cos \gamma$. U područjima u kojima je magnetsko polje uglavnom u ravnini neba poklapanje je jače, a u područjima u kojima magnetsko polje ima jaku komponentu uzduž doglednice poklapanje je slabije i relativne orijentacije magnetskog polja i filamenata čine se nasumičnima. U radu [15] je zaključeno da bi razliku u udjelima polarizacije područja A i B sa Slike 1.2 reproducirali uz razliku u nagibu magnetskog polja $\gamma_A - \gamma_B = 6^\circ - 30^\circ$. Međutim, moguće je i da je do razlike u p_d došlo zbog razlike u homogenosti magnetskog polja duž doglednice, odnosno faktoru F . Izrazito uniformno magnetsko polje duž linije promatranja (veliki faktor F), rezultira visokim udjelom polariziranog zračenja. U radu [15] proučena je i ova mogućnost. Zaključeno je da su razlike u poljima A i B mogle nastati uz disperziju smjera magnetskog polja uzduž doglednice u vrijednostima od 10° do 25° .

Istraživanja provedena instrumentom RoboPol i na podacima teleskopa Herschel-SPIRE nisu mogla odrediti dolazi li do razlike u udjelu polarizacije uglavnom zbog 3D konfiguracije magnetskog polja ili zbog razlike u uniformnosti duž doglednice. Zato u ovom radu želimo iskoristiti promatranja radioteleskopom LOFAR i provjeriti koji od ovih efekata ima veći utjecaj na razlike u udjelima linearno polariziranog zračenja u Polarnom plamičku.

Kao difuzni molekularni oblak, Polarni plamičak predstavlja arhetip početnih faza nastanka gustih molekularnih oblaka u kojima se stvaraju zvijezde. Proučavanje raspodjele tvari u ovakvim oblacima može nam dati uvid u stadije kroz koje prolaze molekularni oblaci prije početka stvaranja zvijezda. U ovom radu želimo doprinijeti istraživanju utjecaja magnetskog polja na procese unutar Polarnog plamička. Cilj nam je napraviti tomografiju ionizirane materije unutar oblaka koristeći promatranja izvršena radioteleskopom LOFAR i usporediti ih s njegovom neutralnom komponentom.

U poglavlju 2 predstavljamo LOFAR-ova i Herschelova opažanja koja koristimo u analizi. U poglavlju 3 opisujemo metodu RM sinteze koju koristimo za Faradayevu tomografiju Polarnog plamička te dobivene rezultate. Poglavlje 4 koncentrirano je na usporedbu neutralnog i ioniziranog medija u Polarnom plamičku pomoću programa astroHOG. Rad završava diskusijom i zaključcima.

2 Podaci

2.1 LOFAR-ova opažanja

Radioteleskop LOFAR (“LOW-Frequency ARray”) predstavlja mrežu antena koje su rasprostranjene diljem Europe sa središtem u Nizozemskoj (slika 2.1). Antene mogu primati signale iz svih smjerova u rasponu frekvencija od 10 MHz do 240 MHz. Sama opažanja rade na principu interferometrije. LOFAR ima dva tipa antena; LBA (“Low Band Antenna”) i HBA (“High Band Antenna”) optimiziranih za opažanje frekvencija u rasponu 10 - 80 MHz i 120 - 240 MHz respektivno. Signali primljeni LOFAR-ovim antenama digitaliziraju se i šalju u središnji digitalni procesor, gdje se signal kombinira kako bi dobili sliku neba na promatranim radiofrekvencijama.

U ovom radu koristimo promatranja radioteleskopa LOFAR napravljena u HBA DUAL INNER konfiguraciji [24] korištenjem HBA antena koje su prikazane na slici 2.2. Radi se o skupovima od šesnaest antena organiziranih u tzv. HBA elemente. Odgovor jednog HBA elementa se formira kombiniranjem signala sa šesnaest dipolnih antena koji se potom šalje u središnji digitalni procesor na daljnju obradu. Detaljan opis obrade signala i specifikacije radioteleskopa LOFAR mogu se pronaći u [24].

U ovom radu koristimo već izrađene slike polariziranog sinkrotronskog zračenja dane u Stokes Q i U parametrima na različitim frekvencijama, baziranim na promatranjima radioteleskopa LOFAR u području Polarnog plamčica centriranog na koordinatama sjevernog nebeskog pola $RA = 0^\circ$, $DEC = 90^\circ$. Svaka slika obuhvaća oko $5^\circ \times 5^\circ$ te je dana za raspon frekvencija od 115 do 175 MHz. Rezolucija slika je 3.75 lučnih minuta, dok je spektralna rezolucija 183 kHz. Promatranje je napravljeno tijekom noći 23. na 24. listopada 2013. godine, a obuhvatilo je 13 sati te ima oznaku L182797. Obradu dobivenih podataka započinjemo korištenjem metode RM sinteze (engl. “Rotation Measure Synthesis”) koja nam omogućuje raspetljavanje zračenja po Faradayevim dubinama i otkriva prethodno neuočive uzorke. U sljedećem poglavlju opisat ćemo princip rada RM sinteze i način na koji smo ju primjenili na podatke radioteleskopa LOFAR.



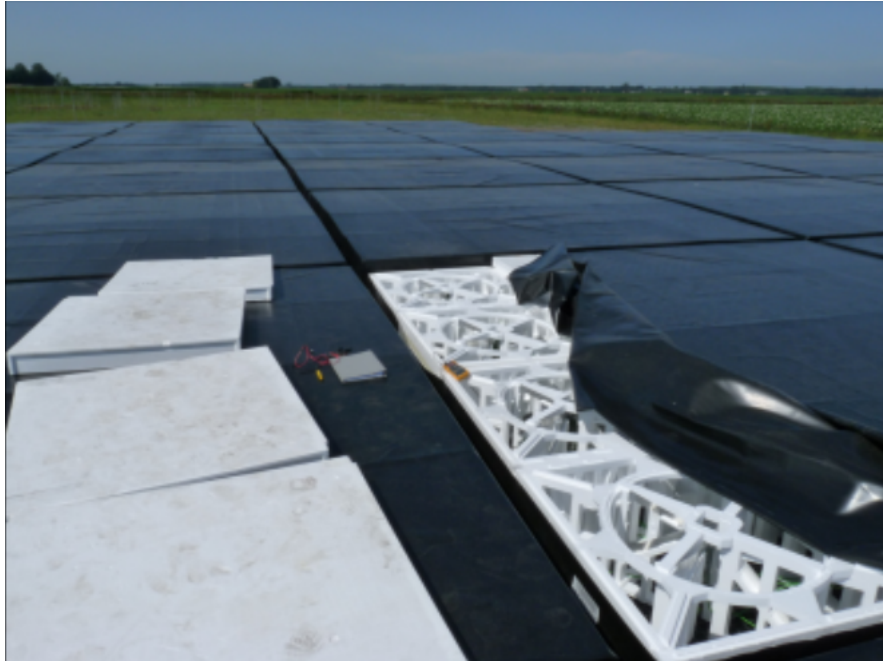
Slika 2.1: Prikaz središnjeg dijela radioteleskopa LOFAR u Nizozemskoj. Preuzeto iz [24].

2.2 *Opazanja na drugim valnim duljinama*

Uspoređivanje opažanja na različitim valnim duljinama može dovesti do novog razumijevanja procesa koji se odvijaju unutar molekularnih oblaka. S tom svrhom u ovom radu koristit ćemo podatke prikupljene teleskopima Herschel i Planck u mikrovalnom području.

Teleskop Herschel je teleskop Europske svemirske agencije koji nosi tri znanstvena instrumenta: PACS, SPIRE i HIFI. Koristili smo podatke snimljene instrumentima PACS (“Photodetector Array Camera and Spectrometer”) i SPIRE (“Spectral and Photometric Imaging REceiver”), radi se o kamerama i spektrometrima niske do srednje rezolucije optimiziranim za valne duljine od 55 do 210 μm i 194 do 672 μm respektivno. Iz arhive teleskopa Herschel ¹ (HSA, “Herschel Science Archive”) preuzeli smo mapu Herschel-PACS na valnoj duljini od 160 μm centriranu na koordinatama RA=19.693923°, DEC=88.540795°, dimenzija oko 2.4° x 2.4°, rezolucije 5 arcsec, identifikacijskog broja 1342198246 i mapu Herschel-SPIRE na valnoj duljini od 250 μm , centriranu na RA=25.475160°, DEC=88.449030°, dimenzija 2° x 2.2°, rezo-

¹<https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Herschel/nph-hsa>



Slika 2.2: Prikaz HBA antena koje opažaju frekvencije u rasponu 120 - 240 MHz. Preuzeto iz [24].

lucije 20 - 30 arcsec identifikacijskog broja 1342198246. Obje mape snimljene su u SpirePacsParallel konfiguraciji, a promatranja su obavljena 6.12.2010. godine i obuhvaćaju 5 sati.

3 Faradayeva tomografija Polarnog plamička

3.1 Metoda RM sinteze

Faradayevu rotaciju možemo uočiti ako promatramo linearno polarizirano zračenje koje prolazi kroz prozirni dielektrik. Naime, ravnina polarizacije promatranog zračenja će se, zbog različite brzine propagacije lijevo i desno polarizirane komponente zračenja kroz materiju, zarotirati za određeni kut χ koji mjerimo kroz Faradayevu rotaciju. To je upravo efekt kojem radiozračenje podliježe prolazeći kroz difuzne molekularne oblake na putu do naših antena. Mi ga želimo iskoristiti kako bismo otkrili više o svojstvima oblaka međuzvezdane materije koji uzrokuju Faradayevu rotaciju. RM sinteza je metoda koju koristimo kako bismo razložili primljeno zračenje po Faradayevim dubinama. Mjera Faradayeve rotacije je Faradayeva dubina, koja je dana izrazom [25] :

$$\Phi(\mathbf{r}) = 0.81 \int_{izvor}^{promatrac} n_e \mathbf{B}_{\parallel} \cdot d\mathbf{r} \quad [\text{rad m}^{-2}], \quad (3.1)$$

gdje je n_e gustoća elektrona u cm^{-3} , \mathbf{B}_{\parallel} je komponenta magnetskog polja paralelna smjeru doglednice u μG , a $d\mathbf{r}$ je infinitezimalni pomak u smjeru doglednice dan u pc. Predznak Faradayeve dubine određen je smjerom magnetskog polja. Ako je magnetsko polje usmjereno prema promatraču, Faradayeva dubina je pozitivna, a ako je usmjereno od promatrača, predznak je negativan. Značaj prostora Faradayevih dubina je očit iz izraza 3.1, Faradayeva dubina je veličina koju možemo odrediti iz promatranja, a daje nam uvid u fizikalna svojstva međuzvezdane materije, gustoću elektrona i jakost magnetskog polja duž doglednice. Osim toga, nakon provedene RM sinteze možemo uočiti i neke slabe izvore koji prethodno nisu bili vidljivi.

U metodi RM sinteze koristimo Fourierov transformat kako bi prebacili zračenje iz prostora frekvencija, odnosno valnih duljina λ^2 , u prostor Faradayevih dubina Φ . Detaljan izvod i opis RM sinteze može se pronaći u [25], a ovdje ćemo samo dati okvirnu ideju i navesti najvažnije rezultate.

Veličina koju radioteleskop LOFAR mjeri je kompleksni intenzitet polarizacije, čiju realnu i imaginarnu komponentu tvore Stokesovi Q i U parametri: $P(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2)$. Kompleksni intenzitet polarizacije na različitim valnim duljinama možemo povezati s kompleksnim intenzitetom polarizacije po jedinici Faradayeve dubine $F(\Phi)$

kroz izraz:

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\Phi) e^{2i\Phi\lambda^2} d\Phi. \quad (3.2)$$

Fundamentalna razlika između izraza 3.2 i Fourierovog transformata leži u tome što izraz 3.2 nema fizikalno značenje za $\lambda^2 < 0$. Zbog toga ne možemo jednostavno invertirati izraz 3.2, već je potrebno napraviti neke pretpostavke o vrijednostima $P(\lambda^2)$ za $\lambda^2 < 0$ ili, kako je prikazano u [25], generalizirati izraz 3.2 uvođenjem težinske funkcije $W(\lambda^2)$. Težinska funkcija je različita od nule za svaki λ^2 za koji je izvršeno mjerenje, a za sve ostale vrijednosti iznosi nula. Korištenjem ovako definirane težinske funkcije možemo invertirati generaliziranu funkciju i u slučaju nepotpunog uzorkovanja u λ^2 prostoru. Konačan rezultat koji povezuje Faradayevu dubinu s mjerenim intenzitetom polarizacije $\tilde{P}(\lambda^2)$ je funkcija $\tilde{F}(\Phi)$:

$$\tilde{F}(\Phi) = K \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}(\lambda^2) e^{-2i\Phi\lambda^2} d\lambda^2, \quad (3.3)$$

$$K = \left(\int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) d\lambda^2 \right)^{-1}, \quad (3.4)$$

gdje je $\tilde{P}(\lambda^2) = W(\lambda^2)P(\lambda^2)$ opaženi intenzitet polariziranog toka zračenja. $\tilde{F}(\Phi)$ predstavlja aproksimativnu rekonstrukciju raspodjele polariziranog intenziteta po Faradayevim dubinama $F(\Phi)$ iz izraza 3.2.

Metoda RM sinteze ograničena je spektralnom pojasnom širinom $\Delta\lambda^2$, spektralnom rezolucijom $\delta\lambda^2$ i minimumom λ_{min}^2 izmjerene distribucije λ^2 . Navedeni parametri direktno su povezani s tri fizikalne veličine u prostoru Faradayevih dubina: (i) najvećom Faradayevom dubinom koju možemo detektirati, $\Phi_{max} \approx \sqrt{3}/\delta\lambda^2$; (ii) najvećom strukturom koju možemo razlučiti u prostoru Faradayevih dubina, $\Delta\Phi_{scale} \approx \pi/\lambda_{min}^2$; i (iii) rezolucijom u prostoru Faradayevih dubina $\delta\Phi \approx 2\sqrt{3}/\Delta\lambda^2$, koja definira minimalnu udaljenost između dvije različite strukture koje možemo detektirati [26].

RM sintezu smo primjenili na naše podatke korištenjem koda `rm-synthesis`² koji implementira približne izraze izvedene u [25]. Tim postupkom sintetizirali smo Faradayevu kocku danu za raspon Faradayevih dubina od -50 do +50 rad m⁻². Rezolucija dobivenih slika je 3.75 lučnih minuta, a rezolucija u prostoru Faradayevih dubina određena je RMSF (Rotation Measure Spread Function) funkcijom i iznosi $\delta\Phi =$

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

0.9 rad m^{-2} . Najveća struktura koju možemo razlučiti širine je $\Delta\Phi_{scale} = 1.1 \text{ rad m}^{-2}$. Budući da su najveća razlučiva skala i rezolucija usporedive možemo detektirati samo tanke Faradayeve strukture ($\lambda^2\Delta\Phi_{scale} \ll 1$) [25].

3.2 Rezultati RM sinteze za područje Polarnog plamička

Konačan produkt RM sinteze je kocka koja pokriva raspon Faradayevih dubina od -50 do $+50 \text{ rad m}^{-2}$ u razmacima od po 0.25 rad m^{-2} . Strukture polariziranog zračenja u Polarnom plamičku primjećujemo većinom na negativnim Faradayevim dubinama. Zbog jakog instrumentalnog šuma u okolini 0 rad m^{-2} , odbacili smo sve podatke na Faradayevim dubinama većim od -5 rad m^{-2} . Iz tih razloga, kocka na kojoj vršimo analizu obuhvaća Faradayeve dubine od -40 do -5 rad m^{-2} .

Na Slici 3.1 prikazano je polarizirano zračenje u tri sloja Faradayevih dubina; -40 do -27 rad m^{-2} (zeleno); -27 do -22 rad m^{-2} (narančasto) i -22 do -5 rad m^{-2} (ljubičasto). Strukture polariziranog zračenja nalazimo i na velikim negativnim Faradayevim dubinama što upućuje na snažnu komponentu magnetskog polja usmjerenu od promatrača u tom području.

Emisija u području Polarnog plamička na svim Faradayevim dubinama vrlo je difuzna s prosječnim maksimumima površinskih intenziteta od oko $0.5 \text{ mJy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$, a RMS vrijednosti šuma iznosi $51 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Bogatstvo struktura u polariziranom zračenju prikazano je na slici 3.2. Kako Faradayeva dubina postaje negativnija, strukture polariziranog zračenja “pomiču” se s lijevog na desni dio Polarnog plamička, što implicira da je iznos komponentne magnetskog polje usmjerene od promatrača i/ili gustoća medija veći u desnom dijelu molekularnog oblaka. Isti trend primjećujemo na slici 3.1.

Prve strukture detektiramo već oko -37 rad m^{-2} na desnoj strani. Radi se o strukturi kružnog oblika, površinskog intenziteta $0.2 \text{ mJy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Veće strukture javljaju se u centralnom dijelu Polarnog plamička oko -31 rad m^{-2} . Izdužene su duž dijagonale slike, a maksimum intenziteta, koji postižu oko -30 rad m^{-2} , iznosi $0.3 \text{ mJy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Oko -28 rad m^{-2} započinje razvoj struktura iznad i paralelno s centralnom izduženom strukturom koja je razlučiva i na ovim Faradayevim dubinama. Maksimalan površinski intenzitet tih struktura je oko $0.25 \text{ mJy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Oko -25 rad m^{-2} strukture se počinju širiti na cijeli Polarni plamičak, a maksimum

intenziteta postiže se oko -22 rad m^{-2} na $0.3 \text{ mJy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Oko -19 rad m^{-2} strukture se premještaju prema donjem lijevom kutu i to se nastavlja sve do oko -11 rad m^{-2} . Intenzitet ovih struktura najveći je oko -19 rad m^{-2} gdje iznosi $0.2 \text{ mJy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$. Kako se približavamo nuli, emisija postaje sve više difuzna te se javljaju tek male lokalizirane strukture s površinskim intenzitetima $\leq 0.3 \text{ mJy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$, kao što su npr. strukture na -9 rad m^{-2} . Oko 0 rad m^{-2} instrumentalni šum postaje prevelik da bi mogli detektirati emisiju, a na pozitivnim Faradayevim dubinama nisu uočene strukture polariziranog zračenja.

3.3 Udio polariziranog zračenja u Polarnom plamičku

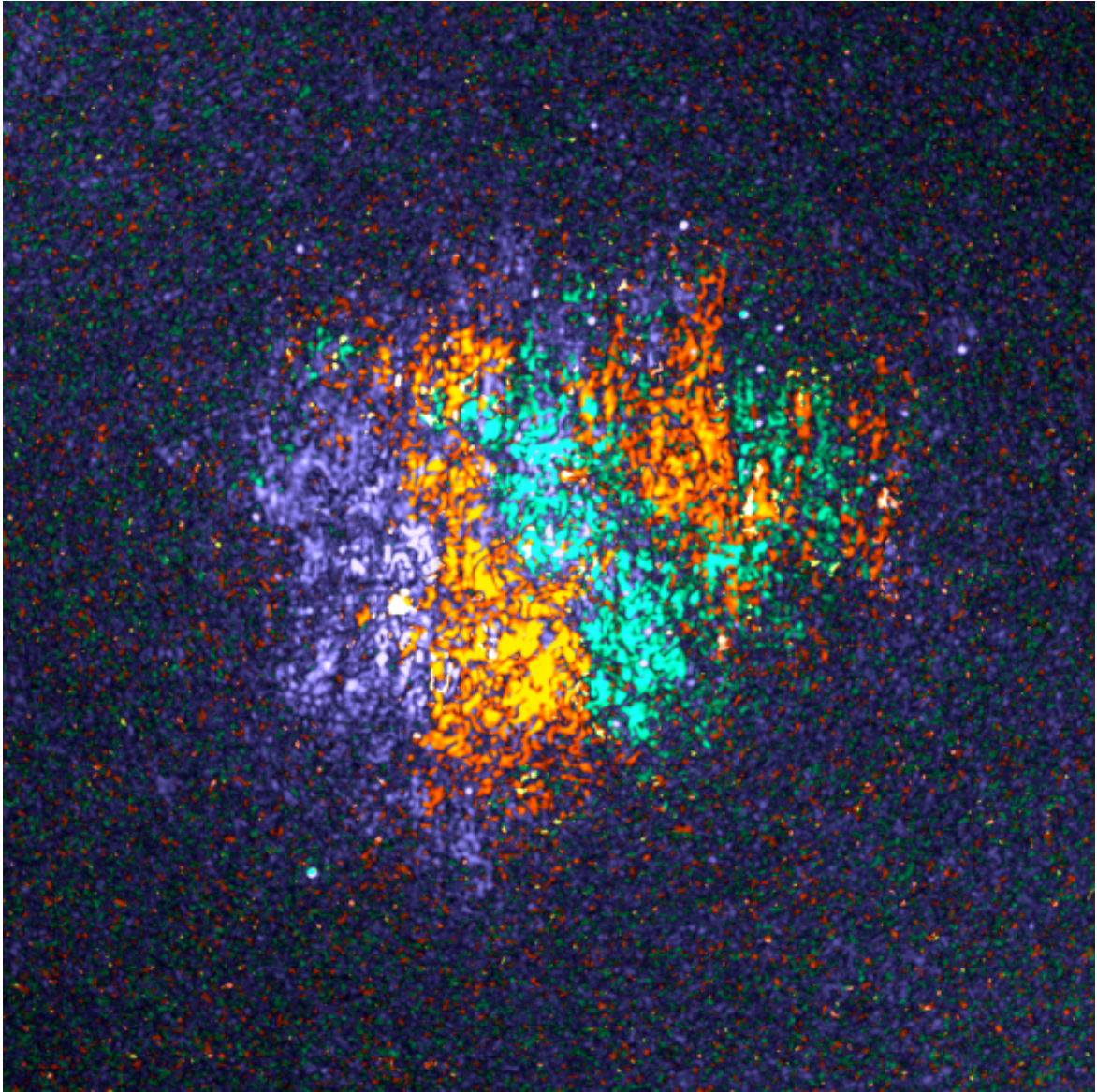
Kako bi odredili udio polarizacije zračenja u Polarnom plamičku, dijelimo integrirani polarizirani intenzitet s ukupnim intenzitetom na 130 MHz ekstrapoliranim iz mape ukupnog intenziteta na 408 MHz [27], [28]. Za ekstrapolaciju koristimo izraz:

$$T_{130} = T_{408} \left(\frac{408}{130} \right)^\beta, \quad (3.5)$$

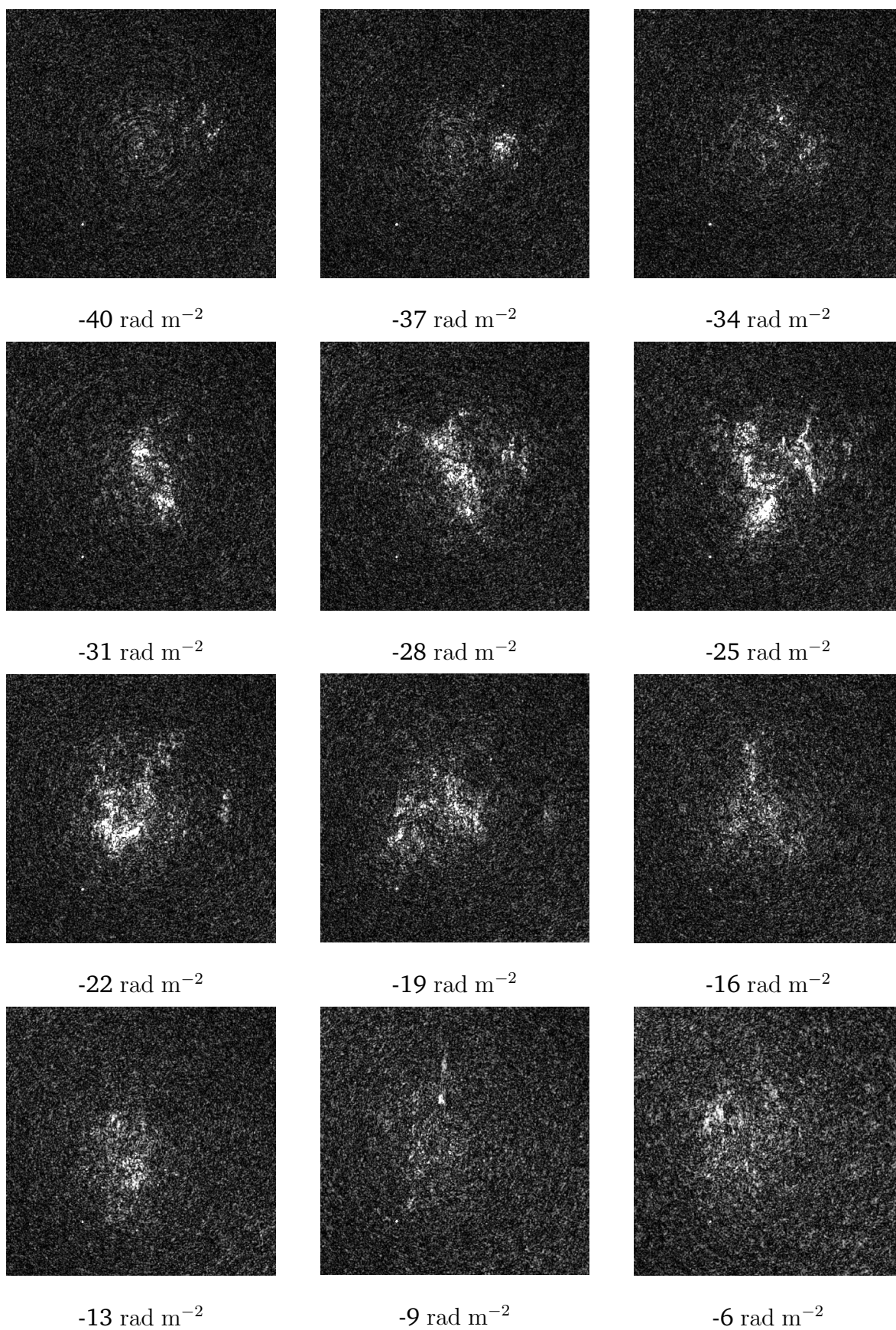
gdje je β spektralni indeks koji u ovom području iznosi -2.5 [29]. Ukupno zračenje u području Polarnog plamička na 408 MHz ima površinsku temperaturu od 22.5 K , a kada ju skaliramo na 130 MHz dobivamo temperaturu od 392.6 K . Iz površinske temperature možemo izračunati intenzitet ukupnog zračenja na 130 MHz [30]:

$$I_{130} = \frac{2k\nu^2 T_{130}}{c^2}, \quad (3.6)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta, c brzina svjetlosti, a $\nu = 130 \text{ MHz}$. Dijeljenjem integriranog intenziteta polariziranog zračenja s dobivenim ukupnim intenzitetom dobivamo udio polariziranog zračenja $p \approx 2\%$.



Slika 3.1: Polarni plamičak prikazan u slojevima Faradayeve dubine od -40 do -5 rad m^{-2} . Zelena boja prikazuje najveće Faradayeve dubine, od -40 do -27 rad m^{-2} ; narančasta prikazuje raspon od -27 do -22 rad m^{-2} ; a ljubičastom bojom su označene najmanje vrijednosti Faradayevih dubina od -22 do -5 rad m^{-2} .



Slika 3.2: Polarni plamičak prikazan u polariziranom zračenju na različitim Faradayevim dubinama. RMS šuma iznosi $51 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$.

4 Usporedba s promatranjima na drugim valnim dužinama

Radioteleskop LOFAR otkriva ioniziranu materiju, dok instrumenti SPIRE i PACS teleskopa Herschel otkrivaju položaj neutralne materije. Usporedbom podataka dobivenih teleskopima LOFAR i Herschel želimo proučiti postoje li Faradayeve dubine na kojima ionizirani i neutralni medij pokazuju prostornu antikorelaciju. Takvo ponašanje upućuje na to da na raspodjelu i strukture različitih faza međuzvezdanog medija utječu isti fizikalni procesi. To ćemo učiniti vizualno i korištenjem programa astroHOG.

4.1 Vizualna usporedba

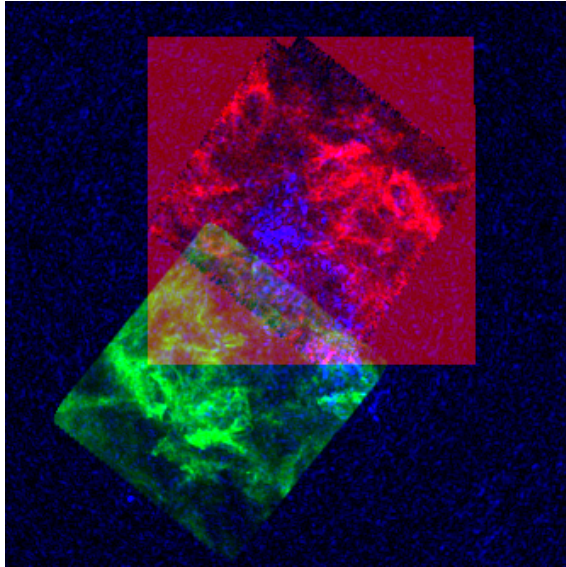
Preklapanjem slika dobivenih teleskopima LOFAR i Herschel u programu za vizualizaciju astronomskih podataka DS9³ uočili smo najveću antikorelaciju u rasponima Faradayevih dubina od -32.00 do -30.75 rad m^{-2} (uglavnom u PACS području), od -27.75 do -26.5 rad m^{-2} (u oba područja), od -16.75 do -15.75 rad m^{-2} (u oba područja) i od -14 do -12.75 rad m^{-2} (uglavnom u SPIRE području). Na slikama 4.1 plavom bojom prikazan je intenzitet polariziranog zračenja usrednjen po rasponu Faradayevih dubina na kojima je uočena antikorelacija, crvenom bojom prikazana su PACS opažanja, a zelenom SPIRE opažanja.

U sljedećem poglavlju smo usporedbu radili pomoću programa astroHOG.

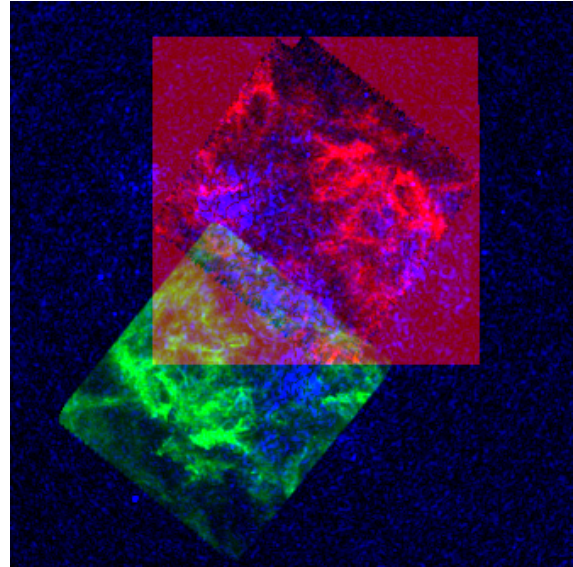
4.2 Usporedba programom astroHOG

HOG (“Histogram of Oriented Gradients”) je alat za računalni vid i računalnu obradu slika, koji se široko koristi za detekciju objekata, npr. prepoznavanje gesta ili detekcija ljudi [31], [32]. HOG metoda temelji se na pretpostavci da oblik objekta na slici možemo dobro karakterizirati distribucijom gradijenata lokalnog intenziteta, tj. određivanjem smjera ruba (okomito na gradijent). Jedna od primjena HOG-a je usporedba relativnih orijentacija lokalnih gradijenata na dvije slike koja daje informaciju o poklapanju rubova na različitim slikama.

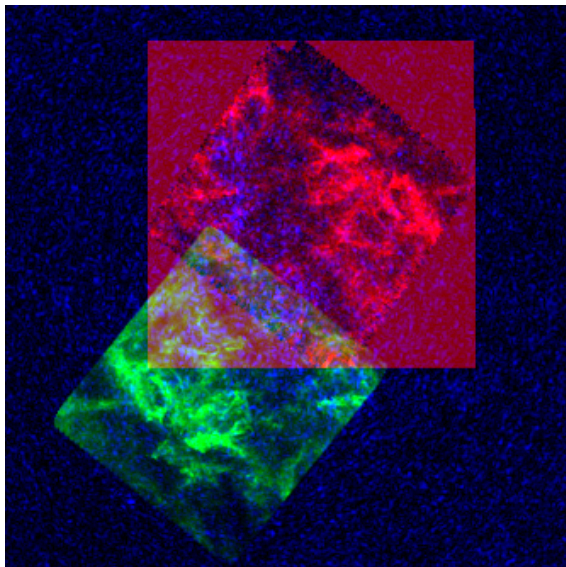
³<http://ds9.si.edu/site/Home.html>



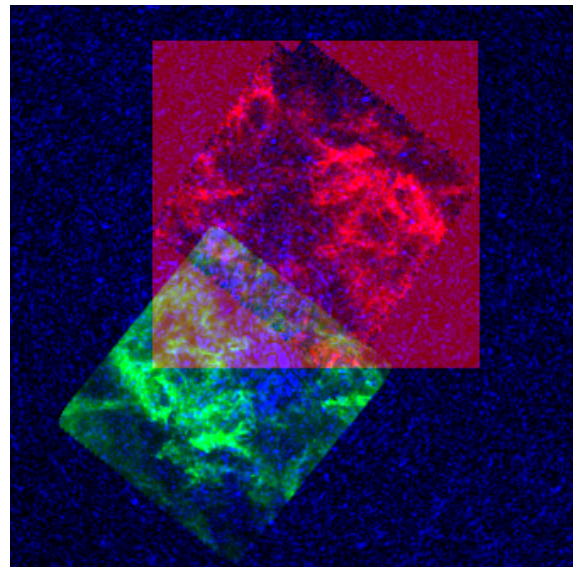
-32.00 do -30.75 rad m⁻²



-27.75 do -26.50 rad m⁻²



-16.75 do 15.75 rad m⁻²



-14 do -12.75 rad m⁻²

Slika 4.1: Preklop slika dobivenih teleskopima LOFAR (plavo), Herschel-SPIRE (zeleno) i Herschel-PACS (crveno), gdje su LOFAR-ove slike usrednjene po rasponima Faradayevih dubina za koje je uočena antikorelacija između položaja ionizirane (plavo) i neutralne (crveno i zeleno) materije.

U radu [33] razvijen je program astroHOG⁴ koji koristi metodu HOG u svrhu prepoznavanja prostornih korelacija različitih komponenti međuzvezdane materije. Iako su slike međuzvezdane materije difuzne i nemaju oštih rubova, astroHOG prepoznaje i blage razlike u intenzitetu koje vizualno možemo prepoznati kao filamente i nakupine plina.

Program astroHOG i njegove mogućnosti detaljno su opisane u radu [33]. U sljedećim poglavljima dajemo kratak pregled osnovnih koncepata i definicija potrebnih za primjenu programa na naše podatke slijedeći [33].

4.2.1 Histogram relativne orijentacije gradijenata

Kako bismo usporedili slike neutralne (N) i ionizirane (I) međuzvezdane materije, koristimo intenzitete I^N i I^I i definiramo kut relativne orijentacije gradijenata intenziteta:

$$\Phi_{i,j,l} = \arctan \left(\frac{(\nabla I_{i,j,l}^I \times \nabla I_{i,j}^N) \cdot \hat{z}}{\nabla I_{i,j,l}^I \cdot \nabla I_{i,j}^N} \right), \quad (4.1)$$

gdje indeksi i, j odgovaraju prostornim koordinatama piksela, a indeks l odgovara Faradayevoj dubini na kojoj vršimo usporedbu. Član $(\nabla I_{i,j,l}^I \times \nabla I_{i,j}^N) \cdot \hat{z} \equiv |\nabla I_{i,j,l}^I| |\nabla I_{i,j}^N| \sin \Phi_{i,j,l}$ je projekcija vektorskog umnoška gradijenata na z-os, a član $\nabla I_{i,j,l}^I \cdot \nabla I_{i,j}^N \equiv |\nabla I_{i,j,l}^I| |\nabla I_{i,j}^N| \cos \Phi_{i,j,l}$ je skalarni produkt vektora gradijenata. Iz definicije 4.1 vidimo da su kutevi relativne orijentacije definirani u intervalu $[-\pi/2, \pi/2)$, što znači da na ovaj način možemo odrediti samo orijentaciju gradijenta, ali ne i njegov smjer. Drugim riječima, program ne razlikuje prostornu korelaciju od antikorelacije, već može prepoznati samo preklapanje rubova.

4.2.2 Evaluacija rezultata

Za evaluaciju prostorne korelacije koristimo dvije veličine: (i) srednji rezultatni vektor r i (ii) projiciranu Rayleighjevu statistiku V .

Srednji rezultatni vektor

Svakom od N kuteva relativne orijentacije Φ_k možemo pridjeliti vektor čije su komponente definirane kao

$$x_k = \cos \Phi_k \text{ i } y_k = \sin \Phi_k. \quad (4.2)$$

⁴<http://github.com/solerjuan/astrohog>

Komponente rezultantog vektora tada definiramo kao

$$X = \sum_k w_k \cos \Phi_k \quad \text{i} \quad Y = \sum_k w_k \sin \Phi_k, \quad (4.3)$$

gdje je w_k statistička težina pridjeljena kutu Φ_k . Konačno, možemo definirati rezultantni vektor, r :

$$r = \frac{1}{\sum_k w_k} \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (4.4)$$

Ako su svi kutevi relativne orijentacije Φ_k jednaki, vrijedi $r = 1$, a rubovi na slikama se u potpunosti poklapaju. Ako su kutevi Φ_k jednoliko raspoređeni, vrijedi $r = 0$ te nema korelacije među slikama. Ukoliko su kutevi Φ_k raspodijeljeni neuniformno, imamo $r > 0$, a iznos r u nultoj aproksimaciji odgovara postotku vektora koji imaju preferiranu orijentaciju.

Projicirana Rayleighjeva statistika

Srednji rezultantni vektor može samo odrediti postojanje preferiranog smjera, ali ne može otkriti o kojem smjeru se radi. U našoj primjeni HOG-a zanima nas je li relativna orijentacija preferirano paralelna ($\Phi = 0$), a za te svrhe korisna je projicirana Rayleighjeva statistika (V-statistika):

$$V = \frac{\sum_k w_k \cos 2\Phi_k}{\sqrt{\sum_k (w_k)^2 / 2}}, \quad (4.5)$$

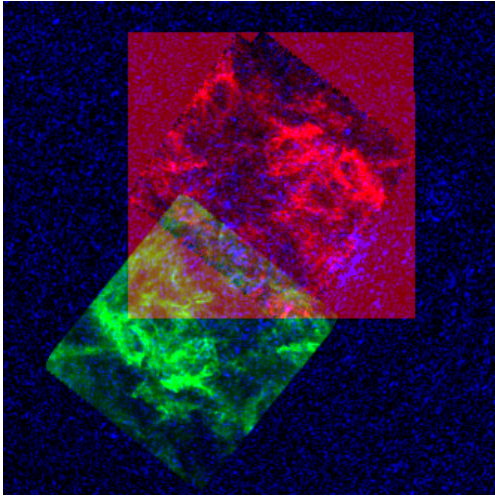
gdje koristimo istu konvenciju kao u 4.4. Svaka vrijednost V predstavlja test vjerojatnosti protiv von Mises distribucije, kružne normalne distribucije centrirane u 0° , odnosno predstavlja vjerojatnost da su gradijenti emisijskih mapa koje uspoređujemo većinom paralelni. Vrijednost $V > 0$ označava uglavnom paralelnu orijentaciju između vektora gradijenata, a vrijednost $V < 0$ označava uglavnom okomitu orijentaciju.

U sljedećem potpoglavlju pokazat ćemo rezultate dobivene primjenom astroHOG-a na naše podatke.

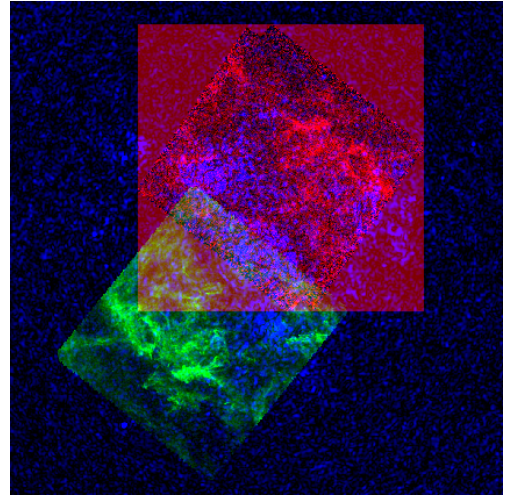
4.2.3 Rezultati

Usporedili smo slike dobivene radioteleskopom LOFAR sa slikama dobivenim teleskopom Herschel-PACS i Herschel-SPIRE zasebno. Na slikama 4.2 navodimo tri rezultata s najvećom vrijednosti projicirane Rayleighjeve statistike V , lijevo za usporedbu s PACS područjem, a desno za usporedbu sa SPIRE područjem. Dobivene vrijednosti Faradayevih dubina nalaze se unutar raspona koje smo odredili vizualno uz izuzetak na Faradayevoj dubini od $-37.75 \text{ rad m}^{-2}$, gdje vizualno uočavamo tek mali stupanj antikorelacije u donjem dijelu PACS područja.

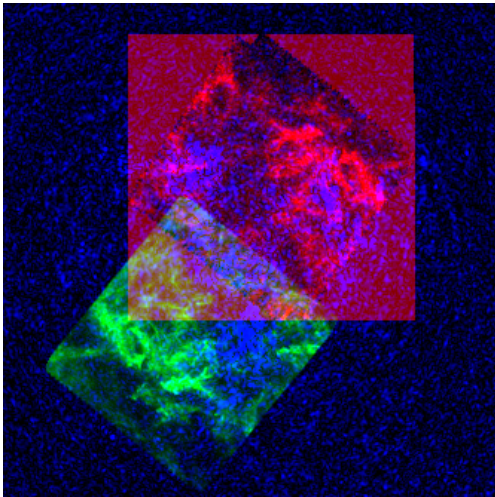
Na slikama 4.3 prikazani su kutevi relativne orijentacije među gradijentima (lijevo) i histogrami relativne orijentacije gradijenata (desno). Na grafu koji prikazuje kutove relativne orijentacije vektora gradijenata rozom bojom naznačena su područja u kojima ti kutevi imaju malu vrijednost, odnosno područja u kojima se rubovi na dvije slike poklapaju. Zbog zrnatosti LOFAR-ovih slika i difuznosti samog Polarnog plamička, grafovi na kojima su prikazani kutevi izgledaju kao da se radi o jednolikoj raspodjeli kuteva, no ako pogledamo i histograme relativne orijentacije gradijenata vidimo da ipak postoji vidljiva tendencija nakupljanja kuteva u blizini 0° , a i sve vrijednosti V su pozitivne što implicira preferirano paralelnu orijentaciju vektora gradijenata. S druge strane, ako se osvrnemo na duljine srednjeg resultantnog vektora, koji nam daje aproksimativan postotak vektora usmjerenih u preferiranom smjeru, vidimo da se radi o vrijednostima od 0.5% do 1%. Razmatrani samostalno dobiveni postoci su vrlo niski, ali razmatrani relativno, u odnosu na rezultate dobivene na drugim Faradayevim dubinama, dobiveni postotci su među najvećima. Na kraju krajeva, najpouzdaniji način provjere rezultata je vizualna usporedba, koja potvrđuje rezultate dobivene korištenjem programa astroHOG.



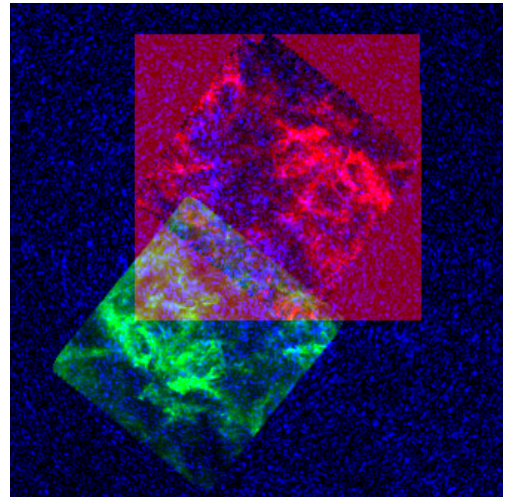
-37.75 rad m⁻²



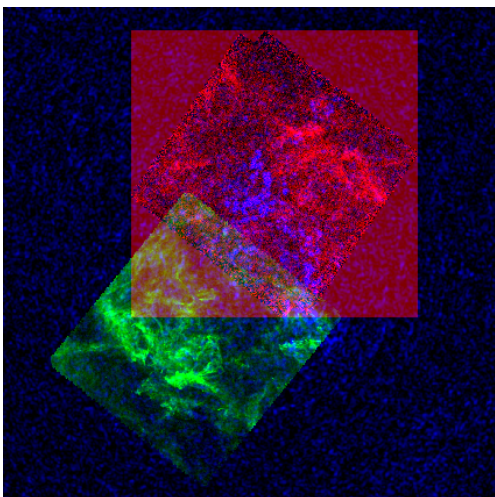
-27.50 rad m⁻²



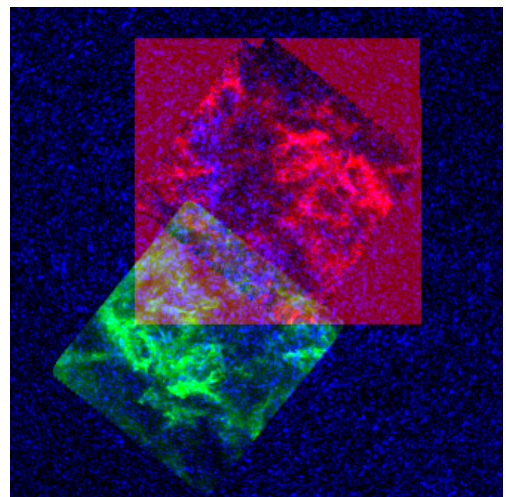
-26.25 rad m⁻²



-16.50 rad m⁻²

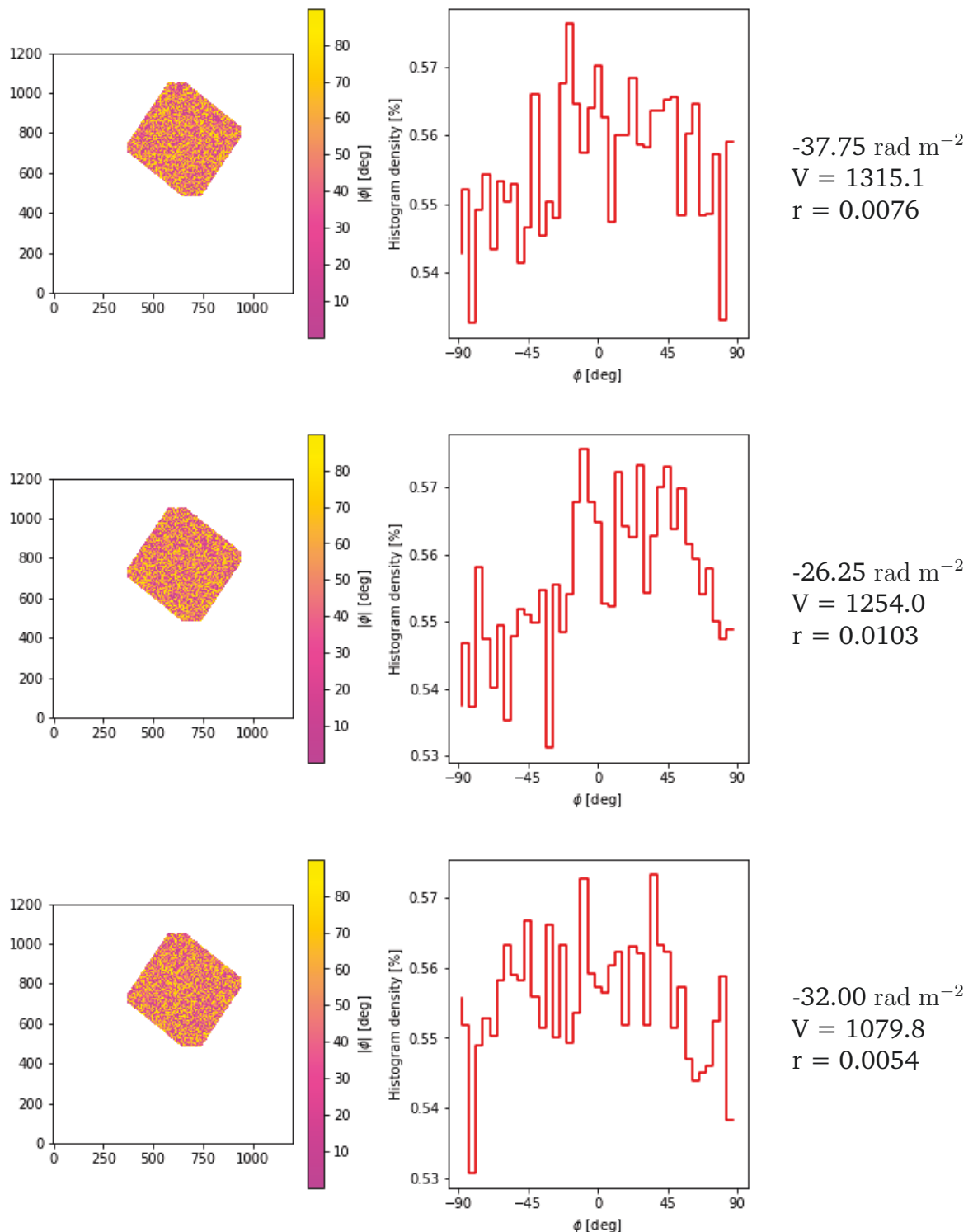


-32.00 rad m⁻²

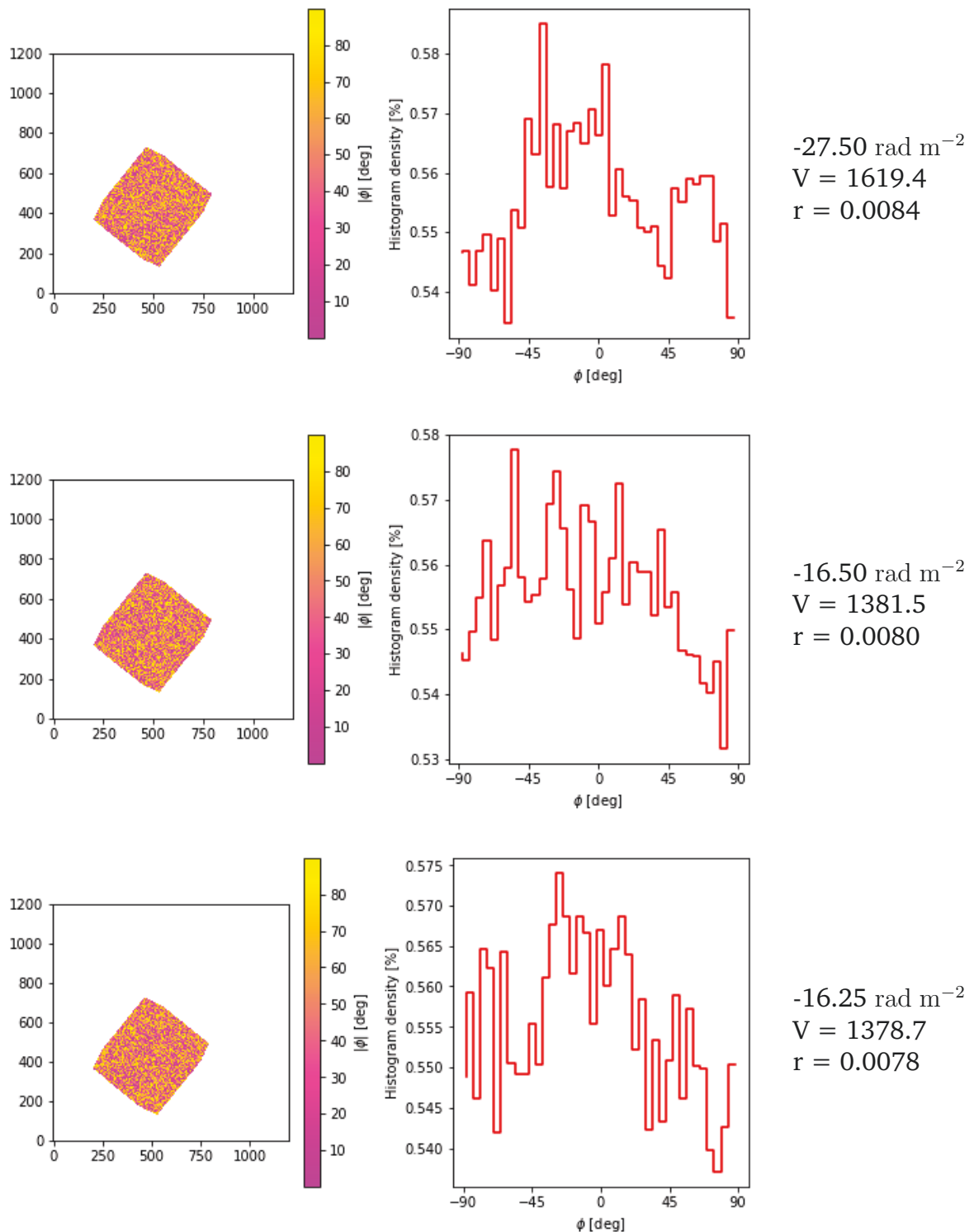


-16.25 rad m⁻²

Slika 4.2: Preklap slika dobivenih teleskopima LOFAR (plavo), Herschel-SPIRE (zeleno), Herschel-PACS (crveno) na Faradayevim dubinama određenim programom astroHOG napravljen u programu DS9. Na lijevoj strani prikazana su najbolja poklapanja za PACS podatke, a na desnoj za SPIRE podatke.



Slika 4.3: Rezultati usporedbe slike dobivene teleskopom Herschel-PACS i slike dobivene radioteleskopom LOFAR izvršene programom astroHOG. Na lijevoj slici prikazani su kutjevi relativne orijentacije među gradijentima koji su sumirani u histogramima relativne orijentacije gradijenata (desno) za tri najveće vrijednosti V . Vrijednost r u nultoj aproksimaciji odgovara postotku vektora preferirane orijentacije (0°).



Slika 4.4: Rezultati usporedbe slike dobivene teleskopom Herschel-SPIRE i slike dobivene radioteleskopom LOFAR izvršene programom astroHOG. Na lijevoj slici prikazani su kutjevi relativne orijentacije među gradijentima koji su sumirani u histogramima relativne orijentacije gradijenata (desno) za tri najveće vrijednosti V . Vrijednost r u nultoj aproksimaciji odgovara postotku vektora preferirane orijentacije (0°).

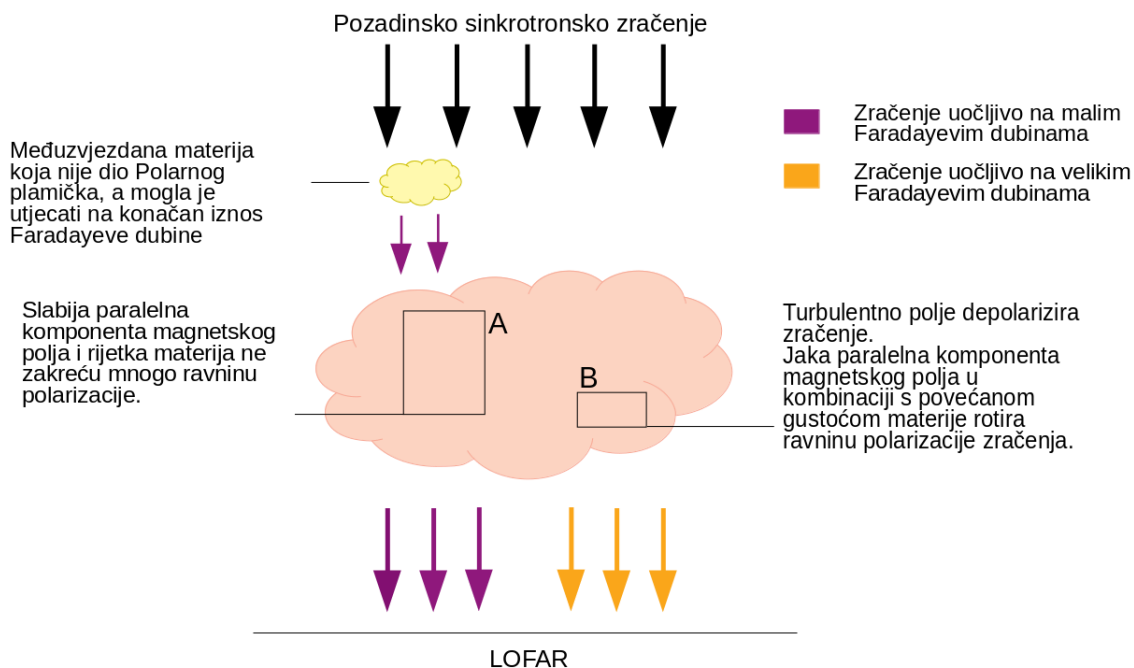
5 Diskusija i zaključak

Koristeći LOFAR-ova mjerenja napravili smo Faradayevu tomografiju Polarnog plamička i proučili strukture polariziranog zračenja. Strukture su pronađene na velikim negativnim Faradayevim dubinama, što upućuje na snažnu komponentu magnetskog polja u smjeru od promatrača. Također, primjetili smo da su strukture najvećeg intenziteta u središnjem dijelu Polarnog plamička, a kako se pomičemo prema lijevo intenzitet opada.

U području A sa slike 1.2 intenzitet polariziranog zračenja je manji nego u području B, što može upućivati na manju gustoću materije, na manji iznos paralelne komponente magnetskog polja ili kombinaciju smanjenja oba parametra. Teleskopom Herschel-SPIRE u području A uočene su difuzne brazde, a u radu [15] procijenjena je koncentracija neutralnog vodika $n_H = 300 \text{ cm}^{-3}$. Također, određeno je da omjer turbulentnosti i uređenosti magnetskog polja iznosi 0.2. Turbulentna komponenta magnetskog polja depolarizira zračenje i na taj način smanjuje ukupan intenzitet polariziranog zračenja. Efekt turbulentne komponente u ovom području nema velik značaj jer je njegov udio u ukupnom magnetskom polju malen. Budući da je magnetsko polje u području A većinom uređeno, a mi iz LOFAR-ovih podataka vidimo da komponenta u smjeru promatranja B_{\parallel} ne može imati prevelike vrijednosti, možemo zaključiti da dominantna komponenta uređenog dijela magnetskog polja leži na ravni neba.

U području B intenzitet polariziranog zračenja je veći što upućuje na povećanu koncentraciju materija, jaču komponentu magnetskog polja B_{\parallel} ili oboje. Procijenjena koncentracija gustoće materije napravljena u radu [15] je oko 10 puta veća nego procjena napravljena za polje A, a omjer turbulentnosti i uređenosti je 0.8. Turbulentna komponenta je gotovo usporediva s uređenom i značajno depolarizira zračenje. Uprkos tome, LOFAR u području B otkriva strukture na velikim Faradayevim dubinama ($\Phi \approx -22 \text{ rad m}^{-2}$) što nam govori da, uz povećanu gustoću, većem intenzitetu polariziranog zračenja u području B vjerojatno doprinosi jaka komponenta magnetskog polja B_{\parallel} .

Promatrajući rezultate istraživanja provedenog instrumentom RoboPol [15], [12] i rezultate dobivene iz podataka radioteleskopa LOFAR, možemo naslutiti da dominantna komponenta magnetskog polja u području B postaje ona koja je usmjerena



Slika 5.1: Na ovoj skici prikazan je jedan od mogućih scenarija i naglašen je utjecaj pojedinih regija na radiozračenje. Područje A ne rotira jako ravninu polarizacije, pa je moguće da je Faradayevoj rotaciji dijelom doprinjeo i prolazak kroz druge nakupine međuzvezdane materije. Iznos komponente magnetskog polja duž doglednice u području B je velik, a ukupni efekt je zračenje detektirano na velikim Faradayevim dubinama, usprkos depolarizirajućem efektu turbulentne komponente magnetskog polja. Moguće je da je svo zakretanje do kojeg nije došlo u Polarnom plamičku zanemarivo u području B.

od promatrača, odnosno da magnetsko polje u području B ponire u smjeru od promatrača. Zaključujemo da razlike u udjelu polarizacije u područjima A i B nastaju velikim dijelom zbog konfiguracije 3D magnetskog polja.

Kako bismo provjerili imaju li naši rezultati smisla u kontekstu rezultata ranije provedenih istraživanja, procijenili smo Faradayeve dubine zračenja koje očekujemo detektirati nakon prolaska kroz Polarni plamičak u području B sa slike 1.2. Prilikom izračuna pretpostavljamo da su paralelna komponenta magnetskog polja i gustoća elektrona duž linije promatranja konstantni tokom prolaska kroz Polarni plamičak te da je najveći doprinos Faradayevom zakretanju pozadinskog zračenja zakretanje prilikom prolaska kroz Polarni plamičak. Sve druge doprinose Faradayevoj rotaciji zanemarujemo. Tada jednadžba 3.1 postaje:

$$\Phi = 0.81n_e B_{\parallel} \Delta r, \quad (5.1)$$

$n_e \downarrow$	$B_{\parallel} \rightarrow$	30 μG	70 μG	110 μG
0.30 cm^{-3}		3.6 rad m^{-2}	8.5 rad m^{-2}	13.3 rad m^{-2}
0.45 cm^{-3}		5.5 rad m^{-2}	12.8 rad m^{-2}	20.0 rad m^{-2}
0.60 cm^{-3}		7.3 rad m^{-2}	17.0 rad m^{-2}	26.7 rad m^{-2}

Tablica 5.1: Procjena Faradayevih dubina za koncentracije elektrona od 0.3 do 0.6 cm^{-3} , vrijednosti B_{\parallel} od 30 do 110 μG i dimenziju Polarnog plamička uzduž doglednice 0.5 pc izračunata korištenjem 5.1. Podaci preuzeti iz [15], [34].

gdje Δr predstavlja dimenziju Polarnog plamička duž linije promatranja za koju smo uzeli vrijednost od 0.5 pc [15]. Koncentraciju elektrona računamo iz procjene koncentracije atomskog vodika za polje B, koja iznosi $n_H = 1500 - 3100 \text{ cm}^{-3}$ [15]. Koristeći procjenu iz rada [34], $n_e = 2 \cdot 10^{-4} n_H$, za koncentraciju elektrona dobivamo raspon od 0.3 do 0.6 cm^{-3} . Pretpostavljamo i da je iznos komponente magnetskog polja B_{\parallel} usporediv s iznosom komponente u ravnini neba procijenjenoj u rasponu od 30 do 111 μG korištenjem instrumenta RoboPol [15]. Rezultati su prikazani u tablici 5.1, a oni dobiveni uvrštavanjem većih vrijednosti parametara n_e i B_{\parallel} odgovaraju Faradayevim dubinama na kojima smo uočili postojanje struktura u polju B. Zbog depolarizacije uzrokovane turbulentnom komponentom magnetskog polja vjerojatno je da je iznos komponente magnetskog polja B_{\parallel} znatno veći od procijenjenog iznosa komponente koja leži u ravnini neba.

Iz mape ukupnog zračenja na 408 MHz [27], [28] izračunali smo intenzitet ukupnog zračenja i usporedili ga s integriranim intenzitetom polariziranog zračenja te dobili udio polarizacije od 2%. Vrijednost je slična vrijednosti dobivenoj za 3C196 polje (4%) [35]. Dobiveni visoki stupanj polarizacije implicira da područjem dominira uređeno magnetsko polje koje stvara strukture detektirane u polariziranom zračenju, što se slaže sa zaključcima donesenim u [15].

Usporedbom LOFAR-ovih podataka koji prikazuju ioniziranu materiju sa Herschelovim podacima koji prikazuju neutralnu materiju, proučili smo prostornu raspodjelu materije u Polarnom plamičku. Vizualno smo pronašli raspone Faradayevih dubina u kojima neutralna i ionizirana materija pokazuju najveću prostornu antikorelaciju. Uočena veza između neutralne i ionizirane materije upućuje na to da raspodjelu različitih faza međuzvezdane materije diktiraju isti fizikalni procesi.

Uočene antikorelacije detektirali smo i primjenom programa astroHOG [33]. Rezultati dobiveni programom astroHOG isprva izgledaju kao nasumično poklapanje,

ali kada ih promotrimo zajedno s rezultatima dobivenim na svim Faradayevim dubinama, vidimo da se rezultati na pojedinim Faradayevim dubinama ističu vrijednostima projicirane Rayleighjeve statistike i udjelom vektora usmjerenim u preferiranom smjeru. Također, histogrami relativne orijentacije gradijenata dobiveni za istaknute Faradayeve dubine pokazuju tendenciju nakupljanja kuteva relativne orijentacije u širem području oko 0° . Ako želimo da astroHOG s većom sigurnošću pronalazi antikorelaciju između difuznih struktura, potrebno je napraviti bolju predobradu slike koja bi mogla utjecati na bolje razlikovanje vanjskih i unutarnjih rubova zrnatih struktura.

Iako istaknute Faradayeve dubine ulaze u vizualno određene raspone, napravljeno istraživanje ne može nam reći je li antikorelacija uistinu najveća na tim Faradayevim dubinama. Razlike između antikorelacija na nekim od Faradayevih dubina koje smo vizualno odredili jako je teško primjetiti golim okom jer su vrlo male. Pokazali smo da je astroHOG sredstvo kojim možemo dobiti mjeru poklapanja i kvantificirati prostorne antikorelacije, no kako bismo bili sigurni da astroHOG daje pouzdane rezultate, potrebno je napraviti daljnje istraživanje.

Bibliography

- [1] Carroll, B. W.; Oestlie, D. A. An Introduction to Modern Astrophysics. 2nd ed.
- [2] Sparke, L. S.; Gallagher J. S. Galaxies in the Universe, An introduction. 2nd ed.
- [3] Elmegreen, B. G. 1989, ApJ, 338, 178
- [4] Elmegreen, B. G. 1993, ApJ, 411, 170
- [5] Hydrogen line, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_line, 5.4.2019.
- [6] Molecular cloud, COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy, <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/M/Molecular+Cloud>, 28.2.2019.
- [7] Astronomy Picture of the Day, NASA, <https://apod.nasa.gov/apod/ap090721.html>, 5.4.2019.
- [8] Cohen, M.; Kuhl, L. V. 1979, ApJS, 41, 743
- [9] Blaauw, A. 1964, ARA&A, 2, 213
- [10] Planck Collaboration Int. XIX. 2015, A&A, 576, A104
- [11] Planck Collaboration I. 2016, A&A, 594, A1
- [12] Panopoulou, G. V.; Tassis, K.; Blinov, D. et al. 2018
- [13] Miville-Deschênes, M.-A.; Martin, P.G.; Abergel, A., et. al. 2018, A&A,
- [14] Keenan P. C., Babcock H. W., 1941, ApJ, 93, 64K
- [15] Panopoulou, G. V.; Psaradaki, I.; Tassis, K. 2018
- [16] Heithausen A., Thaddeus P., 1990, ApJL, 353, L49
- [17] Zagury F.; Boulanger F.; BanchetSIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg) V., 1999, A&A, 352, 645
- [18] Brunt C. M., Heyer M. H., Vázquez-Semadeni E., Pichardo B., 2003, ApJ, 595, 824B

- [19] Schlafly E. F. et al., 2014, *ApJ*, 786, 29S
- [20] SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg), (4.3.2018), <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=Polaris&submit=SIMBAD+search>, 2.4.2019.
- [21] Lee H. M.; Draine B. T. 1985, *ApJ*, 290, 211
- [22] Greenberg J. M., 1968, *Stars & Stellar Systems*, 7, 221
- [23] Men'shchikov A. et al., 2010, *A&A*, 518, L103
- [24] van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al. 2013, *A&A*, 556, A2
- [25] Brentjens, M. A. & de Bruyn, A. G. 2005, *A&A*, 441, 1217
- [26] Jelić, V., de Bruyn, A. G., Mevius, M., et al. 2014, *A&A*, 568, A101
- [27] Haslam, C. G. T., Klein, U., Salter, C. J., et al. 1981, *A&A*, 100, 209
- [28] Haslam, C. G. T., Salter, C. J., Stoffel, H., & Wilson, W. E. 1982, *A&AS*, 47, 1
- [29] Guzmán, A. E., May, J., Alvarez, H., & Maeda, K. 2011, *A&A*, 525, A138
- [30] NRAO courses, Interferometers II, <https://www.cv.nrao.edu/course/astr534/Interferometers2.html>, 1.5.2019.
- [31] McConnell, R. 1986, Method of and apparatus for pattern recognition, uS Patent 4,567,610
- [32] Leonardis, A., Bischof, H., & Pinz, A., eds. 2006, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3951, Histograms of Oriented Gradients for Human Detection, ed. A. Leonardis, H. Bischof, & A. Pinz (Springer)
- [33] Soler, J. D., Beuther, H., Rugel, M., et al. 2019, *A&A*, 622, A166
- [34] Heiles, C. & Haverkorn, M., 2012, *Space Science Reviews*, 166, 293
- [35] V. Jelić, A. G. de Bruyn, V. N. Pandey, et al. 2014., *A&A*, 583, A137