

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet

Lovorka Gajović

**Potječe li opaženo sinkrotronsko zračenje iz
neutralnih područja naše galaksije?**

Zagreb, 2020.

Ovaj rad je izrađen u Zavodu za eksperimentalnu fiziku,
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom
prof. dr. sc. Krešimira Pavlovskog i predan je na natječaj za dodjelu
Rektorove nagrade u akademskoj godini 2019./2020.

SADRŽAJ

I. Uvod	1
I.1. Međuzvezdana materija	1
I.2. Faradayeva rotacija	2
I.3. Sinkrotronsko zračenje	2
I.4. Potječe li opaženo sinkrotronsko zračenje iz neutralnih područja naše galaksije?	3
II. Podatci i metode	5
II.1. Podatci prikupljeni teleskopom LOFAR	5
II.2. Faradayeva tomografija - metoda RM sinteze	6
II.3. Gaia-2MASS podatci 3D raspodjele međuzvezdane prašine	7
III. Analiza 3D raspodjele	7
IV. Usporedba s opažanjima teleskopom LOFAR i diskusija	9
V. Zaključak	11
Literatura	12
Zahvale	14
Sažetak	15
Summary	16

I. UVOD

I.1. Međuzvjezdana materija

Međuzvjezdana materija (Interstellar medium, ISM) je vrlo rijetka materija koja se nalazi u prostoru između zvijezda u galaksijama. Sastoji se većinom od neutralnog plina vodika (HI), molekularnog plina (većinom H_2), ioniziranog plina (HII) i prašine.¹ Približno 15% materije u Mliječnoj stazi je ISM.²

Molekularni oblaci međuzvjezdane materije su većinom pod utjecajem vlastite gravitacije, dok je u difuznom ISM-u gravitacija zanemariva. Također vrlo je značajno turbulentno gibanje i utjecaj magnetskih polja na međuzvjezdanu materiju. Difuzna međuzvjezdana materija na koju ćemo se uglavnom koncentrirati u ovom radu se nalazi se u nekoliko faza. Te faze su ili neutralne ili ionizirane.

Pod neutralne faze spadaju hladna i topla neutralna materija (CNM i WNM) s tipičnim temperaturama od približno 50 i 5000 K. U područjima s neutralnom materijom je opažena veća količina međuzvjezdane prašine.³ Također neutralna materija generalno ima zanemarivo malu gustoću termalnih elektrona i zato ne uzrokuje Faradayevu rotaciju (vidi poglavlje I.2.). Ionizirana materija također ima dvije faze: topla i vruća ionizirana materija (WIM i HIM), one imaju temperature od približno 8000 i $> 10^6$ K. Zbog ionizacije ova materija proizvodi značajnu Faradayevu rotaciju. Radi potpunosti valja spomenuti i toplu djelomično ioniziranu materiju koja nije generalno prepoznata zbog poteškoća s njenim opažanjem. Budući da je u ovom radu promatrana Faradayeva rotacija u međuzvjezdanoj materiji, najbitnija karakteristika će nam biti gustoća termalnih elektrona pojedinih faza koja je prikazana u tablici I.⁴

Tablica I: Gustoća termalnih elektrona za različite faze međuzvjezdane materije

vrsta materije	n_e [cm^{-3}]
hladna neutralna materija	0.016
topla neutralna materija	0.0007
topla ionizirana materija	0.25
vruća ionizirana materija	0.0034

I.2. Faradayeva rotacija

Informacije o međuzvijezdanoj materiji dobivamo tako da promatramo elektromagnetsko zračenje koje je interagiralo s njom ili koje je materija emitirala. Budući da smo promatrali linearno polarizirano zračenje bit će nam bitna promjena smjera polarizacije (za kut χ) pri prolasku elektromagnetskog vala kroz materiju u kojoj je prisutno magnetsko polje, ta pojava se zove Faradayeva rotacija. Do Faradayeve rotacije dolazi zato što se lijevo i desno kružno polarizirana komponenta vala propagiraju različitom brzinom kroz materiju. Kao osnovna mjera Faradayeve rotacije u astrofizici se koristi Faradayeva dubina:

$$\Phi(r) = 0.81 \int_{\text{izvor}}^{\text{promatrač}} n_e \mathbf{B}_{\parallel} dr \text{ [rad } m^{-2}] \quad (1)$$

gdje je n_e gustoća termalnih elektrona u cm^{-3} , \mathbf{B}_{\parallel} je komponenta magnetskog polja u smjeru doglednice u μG , a dr je infinitezimalna komponenta duljine u smjeru od izvora do promatrača u parsecima. Numerički faktor služi kako bi izračunata Faradayeva dubina bila u mjernim jedinicama $\text{rad } m^{-2}$, a predznak ovisi o smjeru magnetskog polja (pozitivan je za magnetsko polje u smjeru prema promatraču, a negativan od promatrača). Obično nas zanima raspodjela intenziteta zračenja po Faradayevim dubinama koja se dobiva iz podataka Faradayevom tomografijom, postupkom RM sinteze (eng. rotation measure synthesis) o kojem će biti detaljnije riječi kasnije (vidi poglavlje II.2.). Rezultat postupka RM sinteze za neko područje neba je takozvana Faradayeva kocka koja daje sliku intenziteta zračenja u određenom području neba za određeni broj Faradayevih dubina. Takva analiza omogućuje razlučivanje slabih izvora te razdvoji opaženo polarizirano zračenje po Faradayevim dubinama što daje raspodjelu ionizacije i magnetskog polja duž doglednice.⁵

I.3. Sinkrotronsko zračenje

Polarizirano zračenje koje smo promatrali je sinkrotronsko zračenje koje proizvode elektroni visokih energija pri gibanju oko magnetskih silnica. To zračenje međudjeluje Faradayevom rotacijom s međuzvijezdanom materijom te tako dobivamo informacije. Elektroni se u galaksiji gibaju spiralno duž smjera magnetskog polja i moraju imati centripetalnu akceleraciju kako bi zadržali tu putanju. Nabijene čestice čija akceleracija je u smjeru okomitom na smjer brzine emitiraju sinkrotronsko zračenje. To zračenje je polarizirano okomito na smjer magnetskog polja u kojem se

gibaju elektroni. Spektar sinkrotronskog zračenja je suma spektara pojedinih elektrona i može se pokazati da je intenzitet zračenja proporcionalan frekvenciji potenciranoj spektralnim indeksom.⁶

$$S_\nu = k \cdot \nu^\alpha \quad (2)$$

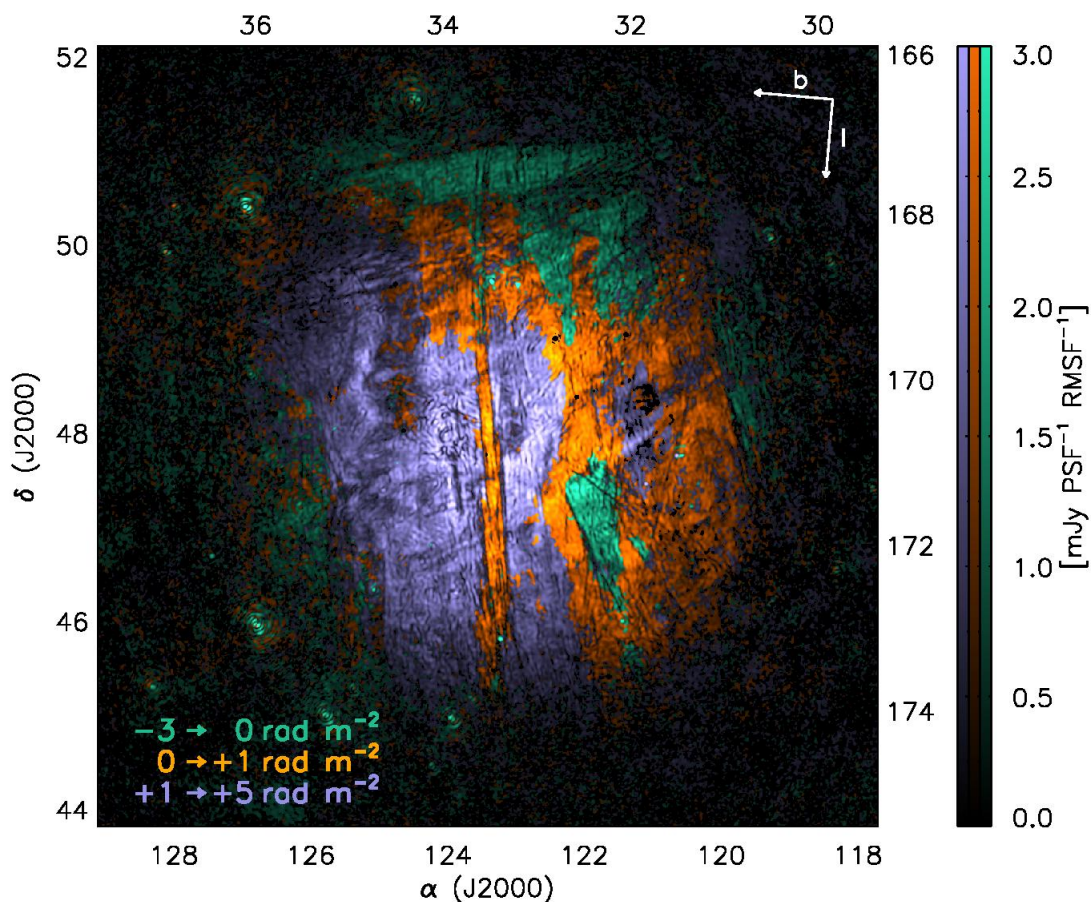
Spektralni indeks Mliječne staze u radiovalnom području je približno $\alpha = -2.5$.⁷

Ukupna količina radiozračenja u galaksiji na 408 MHz dana je na Haslamovoj mapi^{8,9} koja obuhvaća cijelu nebesku sferu. Iz nje se može očitati koliko zračenja dolazi iz smjera koji promatramo te poznavanjem spektra sinkrotronskog zračenja možemo odrediti koliki intenzitet zračenja imamo na frekvenciji na kojoj promatramo. Također je bitno spomenuti da je 70% ukupnog zračenja polarizirano.¹⁰

I.4. Potječe li opaženo sinkrotronsko zračenje iz neutralnih područja naše galaksije?

Na temelju opažanja radioteleskopom LOFAR i primjenom RM sinteze promatrana je 2015. godine raspodjela ionizirane materije u polju neba pod nazivom 3C196 (Slika 1). Polje 3C 196 je jedno od primarnih polja za kozmološki projekt radioteleskopa LOFAR, veličine je $8.5^\circ \times 8.5^\circ$ i nalazi se centrirano na $\alpha = 123^\circ$, $\delta = 48^\circ$. Opaženo je polarizirano zračenje intenziteta 5-15K na Faradayevim dubinama od -3 do $+8$ rad/m⁻². Najizraženija struktura opaženog zračenja je ravni filament u smjeru sjever-jug vidljiv na sredini slike, a prisutni su i vrlo ravni kanali depolarizacije. Promatranjem sjajnog kvazara 3C196 koji se nalazi u sredini polja određeno je da je magnetsko polje u smjeru doglednice 0.3 ± 0.1 μ G. Također je pokazano da filament ima povećanu gustoću termalnih elektrona u odnosu na okolinu. Zasada nije poznat razlog pojave ovakvih pravilnih struktura, ali postoji više pretpostavki opisanih detaljnije u radu Jelić (2015).¹¹

Bitan korak u razumijevanju ovog rezultata opažanja bi bilo znati kakva međuzvezdana materija bi mogla dati ovakav signal. Ideja za to je dana u radu Van Eck (2017)¹². Pretpostavka je da zračenje koje snimamo nastaje u neutralnim područjima, a Faradayeva rotacija se događa u ioniziranim područjima. Zračenje koje snimamo je polarizirano sinkrotronsko zračenje, a proizvode ga visokoenergetski elektroni u međuzvezdanom prostoru. Topla ionizirana međuzvezdana materija ima znatno veću gustoću termalnih elektrona nego topla neutralna materija i zato više zakreće ravninu polarizacije. Sinkrotronsko zračenje nastaje neovisno o vrsti međuzvezdane tvari, ali onaj dio koji nastane u ioniziranoj tvari se depolarizira jer se smjer polarizacije zakrene različito za zračenje



Slika 1: Polje 3C196 gdje je različitim bojama prikazano na kojem rasponu Faradayevih dubina se nalazi maksimum intenziteta zračenja. Primijetite filament u sredini polja i ravne kanale depolarizacije.¹¹

nastalo na različitim udaljenostima duž doglednice. Zračenje nastalo u području neutralne materije se neće depolarizirati i zato ćemo moći izmjeriti ukupni polarizirani intenzitet koji je nastao u tim područjima.¹²

Trodimenzionalna raspodjela neutralne materije u galaksiji je dobivena iz mjerenja ekstinkcije¹³. Opažaćka je činjenica da u područjima neutralne materije ima veća količina međuzvjezdane prašine³ što je potvrdio i Planck satelit¹⁴. Prašina je ta koja uzrokuje ekstinkciju svjetlosti zvijezda¹⁵ te su zato područja veće lokalne ekstinkcije ona gdje se nalazi neutralna materija. Kada znamo koliko ima tople neutralne materije u smjeru u kojem gledamo možemo izračunati koliki je intenzitet sinkrotronskog zračenja koje tamo nastaje. Također ako pretpostavimo da se u ostatku nalazi topla ionizirana materija, koja uzrokuje Faradayevu rotaciju tog zračenja, možemo odrediti na kojoj bismo Faradayevoj dubini trebali vidjeti signal. Cilj nam je napraviti ovakvu analizu za područja neba promatrana teleskopom LOFAR te provjeriti da li opaženi signal stvarno odgovara na ovaj način izračunatim očekivanjima.

II. PODATCI I METODE

II.1. Podatci prikupljeni teleskopom LOFAR

Teleskop LOFAR (LOw-Frequency ARray) je radiointerferometar nove generacije koji se nalazi sjeveru Nizozemske i sjeverozapadnom dijelu Europe. Za primanje radiovalava LOFAR koristi dvije vrste jednostavnih dipolnih antena: low-band antene koje pokrivaju spektralno područje od 10 do 90 MHz i high-band antene koje pokrivaju područje od 110 do 250 MHz. Radiostanice nemaju pomičnih dijelova te antene mogu efektivno promati radiovalove iz svih smjerova iznad horizonta. Signali s različitih antena, odnosno stanica digitalno se kombiniraju uzimajući u obzir razlike faze u dolasku signala na svaku od njih. Ovakav način rada omogućava trenutno mijenjanje smjera promatranja te čak istovremeno promatranje više dijelova neba koji su međusobno razmaknuti, jedino ograničenje u broju smjerova promatranja je procesorska snaga superračunala koje obrađuje signal.¹⁶

Polje 3C 196 je promatrano više puta u periodu između 2012. i 2014. godine. Podatci mjerenja su u rasponu frekvencija od 115 do 189 MHz podjeljenom na 380 frekvencijskih kanala. Nakon obrade i kalibracije kao rezultat je dobiven niz slika željenog djela neba u visokoj rezoluciji.^{11,17} Budući da je bilo potrebno promatrati linearno polariziranu svjetlost relevantnu informaciju čine Stokesovi parametri Q i U . Parametar Q daje intenzitet linearno polariziranog zračenja u smjeru paralelno s referentnom ravninu ili okomitom na nju dok je parametar U intenzitet zračenja linearno polariziranog u smjerovima pod kutem od 45° u odnosu na referentnu ravninu.¹⁸ Ta dva parametra skupa čine kompleksni intenzitet polarizacije:

$$P = Q + iU \quad (3)$$

koji je potreban za provođenje postupka Faradayeve tomografije.⁵

Intenzitet svjetlosti u radioastronomiji se često izražava u jedinicama temperature (T_b), tj. kelvinima te ćemo i mi koristiti tu konvenciju. Intenzitet svjetlosti označen jedinicama temperature je onaj koji bi emitiralo crno tijelo na promatranoj frekvenciji ako je zagrijano na tu temperaturu. Za niske frekvencije koje proučava radioastronomija vrijedi Rayleigh-Jeansova aproksimacija:

$$I_\nu = \frac{2\nu^2}{c^2} kT_b \quad \text{za } h\nu \ll kT \quad (4)$$

dajući linearnu relaciju između temperature i intenziteta.¹⁰

II.2. Faradayeva tomografija - metoda RM sinteze

Kut χ za koji se promjeni ravnina polarizacije zbog pojave Faradayeve rotacije snažno ovisi o valnoj duljini svjetlosti, preciznije o λ^2 . To svojstvo nam omogućuje da ako imamo mjerenja polariziranog intenziteta na nizu valnih duljina provedemo postupak RM sinteze da bismo dobili ovisnost intenziteta o Faradayevoj dubini. Postupak je konceptualno vrlo sličan Fourierovom transformatu i transformira signal, tj. kompleksni intenzitet polarizacije iz prostora valnih duljina λ^2 u prostor Faradayevih dubina Φ . Kompleksni intenzitet polarizacije u ovisnosti o valnoj duljini $P(\lambda^2)$ možemo povezati s kompleksnim intenzitetom polarizacije po jedinici Faradayeve dubine $F(\Phi)$ sljedećom relacijom:

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

Razlog zašto ne možemo direktno uzeti inverzni Fourierov transformat ove relacije je to što $P(\lambda^2)$ nije definiran za sve realne brojeve, nego samo za pozitivne i diskretne vrijednosti valnih duljina koje su opažene. Taj problem se rješava uvođenjem težinske funkcije $W(\lambda^2)$ koja je različita od nule samo za one vrijednosti valnih duljina za koje je izvršeno mjerenje. Nakon kraćeg izvoda (⁵) se dobiva izraz koji povezuje Faradayevu dubinu s mjerenim intenzitetom polarizacije $\tilde{P}(\lambda^2) = W(\lambda^2)P(\lambda^2)$:

$$\tilde{F}(\Phi) = K \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}(\lambda^2) e^{-2i\Phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (6)$$

$$K = \left(\int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) d\lambda^2 \right)^{-1} \quad (7)$$

gdje je $\tilde{F}(\Phi)$ aproksimativna rekonstrukcija raspodjele polariziranog intenziteta po Faradayevim dubinama $F(\Phi)$.⁵

Za provođenje RM sinteze korišten je kod `rm-synthesis` (<https://github.com/brentjens/rm-synthesis>) koji koristi aproksimacije spomenutih izraza. Više detalja o postupku RM sinteze, izvodu, ograničenjima i mogućnostima je dostupno u literaturi.⁵

II.3. Gaia-2MASS podatci 3D raspodjele međuzvjezdane prašine

U ovom podpoglavlju je ukratko opisano kako su dobivene 3D raspodjele međuzvjezdane prašine^{13,19} koje su korištene kao set podataka za pokušaj predviđanja raspodjele neutralne materije. Fotometrijski podatci iz Gaia DR2²⁰ su kombinirani s 2MASS mjerenjima²¹ kako bi se odredila ekstinkcija u smjeru zvijezda čija su fotometrijska mjerenja precizna, a relativne neodređenosti DR2 paralaksi su ispod 20%. Pri određivanju ekstinkcije je učinjena selekcija zvijezda temelju brojnih kriterija kako bi se omogućila preciznost, zatim je ekstinkcija određena primjenom empirijskih zakona na podatke o razlikama magnituda između filtera.¹³

Na individualne ekstinkcije je primijenjen hijerarhijski algoritam prilagođen za velike setove podataka i nehomogenu raspodjelu objekata. Glavna ideja algoritma je da transformira diskretne informacije o ekstinkcijama u smjeru svake zvijezde u kontinuiranu 3D raspodjelu krenuvši s krupnije prema sve boljoj razlučivosti. Pritom u svakom koraku prethodna distribucija služi kao početna točka. Prostorna rezolucija koju su podatci imali u poljima koje smo promatrali je približno 0.5° na nebu i 10 pc udaljenosti. Cijela dostupna mapa je u volumenu $6 \times 6 \times 0.8$ kpc oko Sunca.¹³

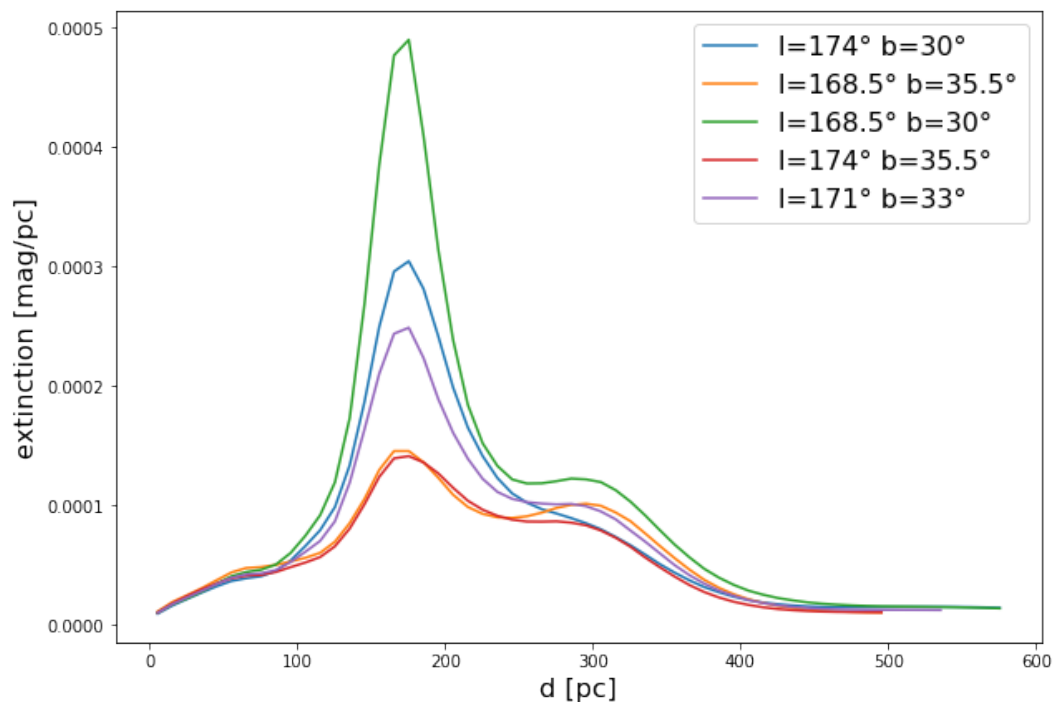
III. ANALIZA 3D RASPODJELE

Prvo što smo željeli pogledati je raspodjela neutralne materije u smjeru polja 3C196 te smo transformirali podatke o ekstinkciji u 3D kocku gdje su x i y koordinate galaktička duljina i širina, dok je z koordinata udaljenost od promatrača. Pritom podatci prekrivaju područje $l = 168.5^\circ$ - 174° i $b = 30^\circ$ - 35.5° te sežu od Sunca do udaljenosti između 500 i 580 pc ovisno o dijelu polja.

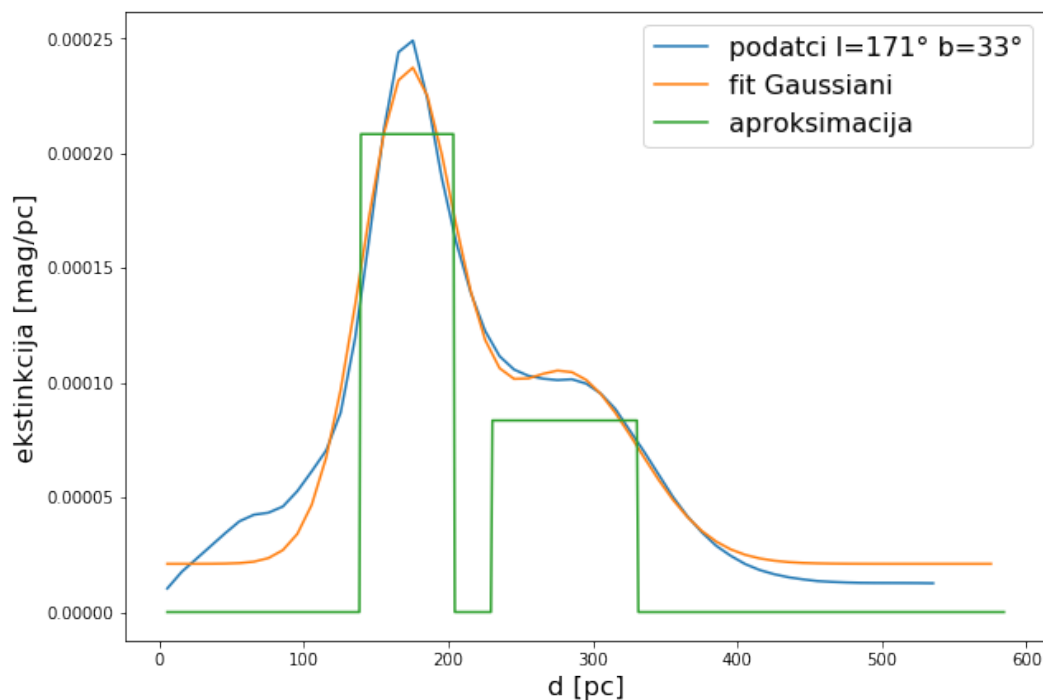
Vizualnim pregledom 3D kocke uočeno je da su razlike ovisno o udaljenosti primjetnije nego unutar polja i ne postoje posebne značajke ni u kojem dijelu vidnog polja. Odabrano je 5 karakterističnih točaka, konkretno četiri kuta slike i sredina te je za njih nacrtan graf ovisnosti ekstinkcije o udaljenosti. Taj graf se nalazi na slici 2.

Vide se dva distinktna područja s neutralnom materijom, na udaljenostima od oko 170 i 300 pc. Ta ista morfologija je prisutna na cijelom polju, jedino je količina ekstinkcije drugačija za različite dijelove polja. Budući da nas zanima samo na kojim udaljenostima je neutralna materija, a nije nam ključno koliko ekstinkcije uzrokuje, možemo zanemariti razlike u količini ekstinkcije i promatrati samo podatke za sredinu (ljubičasto na slici 2).

Podatci o ekstinkciji za sredinu polja ($l=171^\circ$, $b=33^\circ$) su prikazani na slici 3. Kako bismo opisali dva područja neutralne materije prilagođene su dvije funkcije Gausijana na podatke. Zatim su



Slika 2: Ekstinkcija na različitim mjestima na polju 3C196 koja nam govori o raspodjeli neutralne materije dobivene iz literature¹³



Slika 3: Ekstinkcija u sredini polja 3C196 koja nam govori o raspodjeli neutralne materije (plavo), Gaussijani prilagođeni na te podatke (narančasto) i kvadratne funkcije kojima su oni aproksimirani (zeleno)

ti Gausijani aproksimirani kvadratnim funkcijama odgovarajuće širine i amplitude. Kao područja gdje imamo neutralnu materiju su uzeta ona gdje su te kvadratne funkcije različite od nula. Naravno

da je prijelaz između područja u stvarnosti postepen, ali radi jednostavnosti u ovom modelu je uzeto da su prijelazi nagli, to je opravdano ako se količina termalnih elektrona kontinuirano mijenja. Eksplicitno u smjeru gledanja imamo:

- 1. područje ionizirane materije:** 0 – 134 pc
 - 1. područje neutralne materije:** 134 – 200 pc
 - 2. područje ionizirane materije:** 200 – 230 pc
 - 2. područje neutralne materije:** 230 – 328 pc
 - 3. područje ionizirane materije:** 328 – 500 pc
- Nemamo podatke:** >500 pc

IV. USPOREDBA S OPAŽANJIMA TELESKOPOM LOFAR I DISKUSIJA

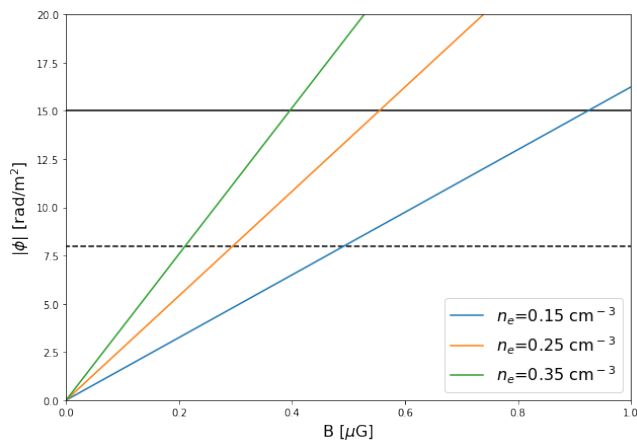
Za ionizirana područja u kojima se događa Faradayeva rotacija imamo dva slobodna parametra koja trebamo predvidjeti da bi mogli odrediti na kojoj Faradayevoj dubini ćemo vidjeti zračenje koje prolazi kroz njih. To su magnetsko polje i gustoća termalnih elektrona. Poznato je da je gustoća termalnih elektrona u toploj ioniziranoj materiji približno $(0.25 \text{ cm}^{-3})^4$. Također znamo da je iznos magnetskog polja u galaksiji reda veličine mikrogauza, specifično u polju 3C196 je $0.1\text{--}0.3 \mu\text{G}$.¹¹

Kako bismo vidjeli ovisnost Faradayeve dubine o oba parametra nacrtan je graf njene ovisnosti o magnetskom polju za tri gustoće termalnih elektrona 0.15 , 0.25 i 0.35 cm^{-3} . To je napravljeno za oba područja s ioniziranom materijom na slikama 4 i 5.

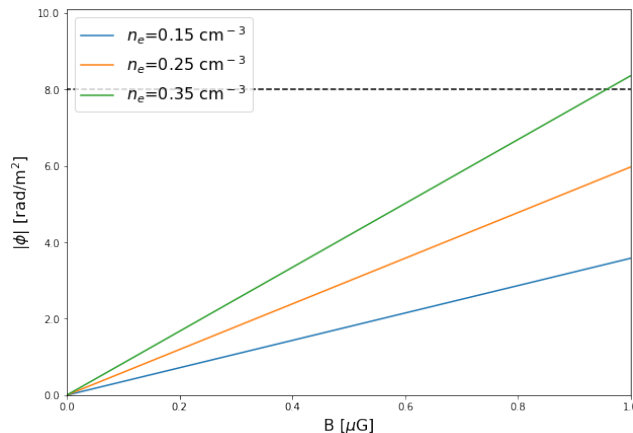
Za smjer magnetskog polja unutar svakog područja možemo uzeti da je isti ili suprotan tako da se Faradayeve dubine ili zbrajaju ili oduzimjau. Te dvije situacije su prikazane na slici 6.

U bližem neutralnom području se također događa Faradayeva rotacija, a ne samo emisija, međutim taj doprinos je puno manji jer je gustoća termalnih elektrona znatno manja. Kako bismo provjerili da li to može utjecati na signal koji vidimo izračunat ćemo koliki bi bio taj doprinos. Pretpostavimo da je magnetsko polje $1\mu\text{G}$ što je relativno velik iznos u odnosu na ono što nam pokazuju podatci i uzмимо podatak da je $n_e = 0.0007 \text{ cm}^{-3}$ ²². Dobivamo $\Phi \approx 0.04 \text{ rad/m}^2$ što je zanemarivo u odnosu na Faradayevu rotaciju u ioniziranim područjima. Dakle možemo zanemariti Faradayevu rotaciju koja se događa u neutralnim područjima.

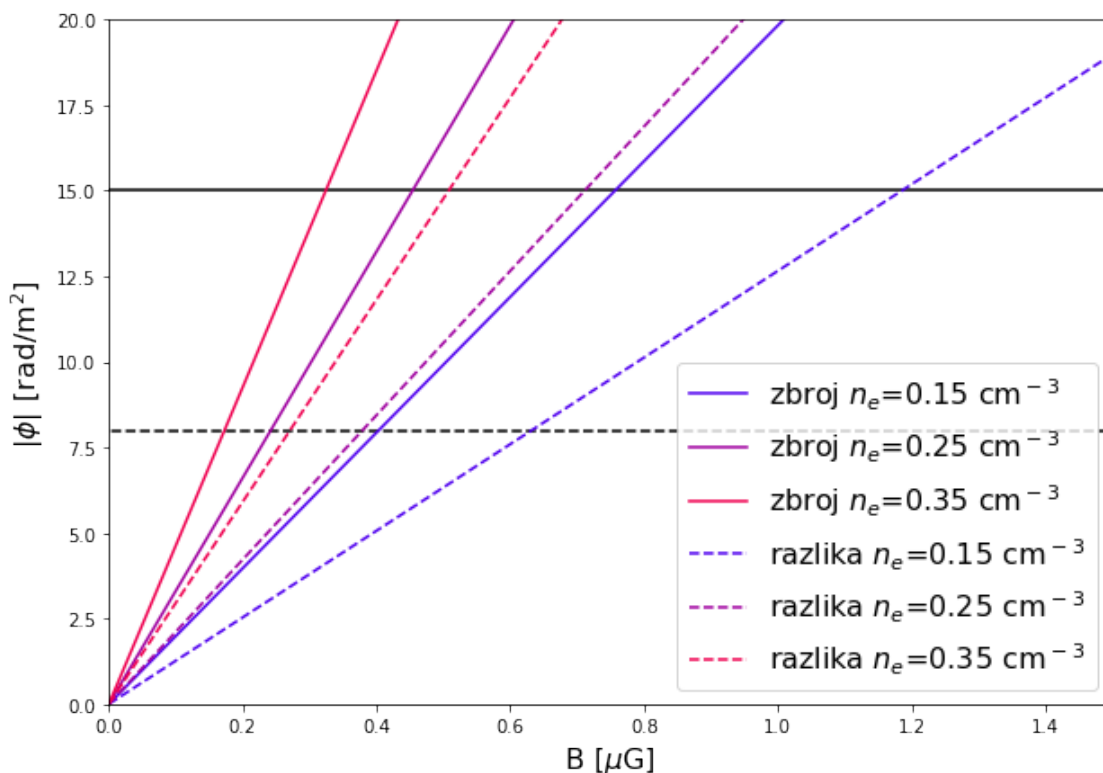
Razultati teleskopa LOFAR pokazuju da je većina emisije na Faradayevim dubinama manjim o 8 rad m^{-2} te da sigurno nema emisije na Faradayevim dubinama većim od 15 rad m^{-2} .¹¹ Ako pogledamo graf vidimo da smo to približno i dobili analizom područja neutralne materije ako uzmemo da je magnetsko polje u 3C196 približno $0.3 \mu\text{G}$ ¹¹. Budući da su u modelu dva slobodna



Slika 4: Faradayeva dubina prvog ioniziranog područja ovisno o magnetskom polju za tri vrijednosti gustoće termalnih elektrona. Crne crte označavaju granicu do koje Faradayeve dubine u opaženim podacima vidimo većinu zračenja (isprekidana linija) i nakon koje Faradayeve dubine -sigurno nemamo više signala (puna linija)¹¹.



Slika 5: Faradayeva dubina drugog ioniziranog područja ovisno o magnetskom polju za tri vrijednosti gustoće termalnih elektrona. Crna isprekidana linija označavaju granicu do koje Faradayeve dubine u opaženim podacima vidimo većinu zračenja¹¹.



Slika 6: Zbroj i razlika Faradayevih dubina dvaju ioniziranih područja ovisno o magnetskom polju za tri vrijednosti gustoće termalnih elektrona. Crne crte označavaju granicu do koje Faradayeve dubine u opaženim podacima vidimo većinu zračenja (isprekidana linija) i nakon koje Faradayeve dubine sigurno nemamo više signala (puna linija)¹¹.

parametra teško je preciznije odrediti Faradayevu dubinu međutim ovo je dobra indikacija da je

ideja modela koju smo koristili dobra. Također ako uzmemo podatak o Faradayevoj dubini iz snimki LOFAR teleskopa ova metoda potvrđuje da je magnetsko polje stvarno onakvo kako je izmjereno promatranjem pulsara.

Sad nas zanima emisija koja može nastati u dva neutralna područja koja imamo. Ukupna količina radiozračenja u galaksiji na 408 MHz dana je Haslamovom mapom^{8,9} koja obuhvaća cijelu nebesku sferu. Iz nje je očitana količina zračenja od približno 22 K/kpc u 3C196 polju na frekvenciji 408 MHz. Odnos intenziteta i frekvencije dan je jednadžbom 2, a spektralni indeks za područje frekvencija koje gledamo je približno $\alpha = -2.5$.⁷

Da bismo odredili intenzitet na LOFAR frekvencijama koje su oko 150 MHz prvo računamo koliki je k koristeći intenzitet na 408 MHz. Zatim koristeći taj k dobivamo da je na 150 MHz količina zračenja 268 K/kpc. Od tog zračenja 70% je polarizirano.¹⁰ Kako bismo odredili koliko je točno zračenja iz svakog neutralnog područja množimo taj broj s rasponom udaljenosti na kojima je to područje. Dobiveno je za 1. područje iznos od 12.5 K, a za 2. područje iznos od 18.5 K, tj. ukupno 31K.

Dobivene vrijednosti su nešto veće od opaženih koje su između 5 i 15 K. Dobivena razlika je najvjerojatnije posljedica činjenice da nismo uzeli u obzir turbulentnu komponentu magnetskog polja. Inače se očekuje da samo oko 8% prvotno emitiranog polariziranog zračenja opažamo, dok je ostatak depolariziran¹². Budući da ovdje imamo veći postotak možemo pretpostaviti da je magnetsko polje u 3C196 dosta uređeno. To potvrđuju i pravilne strukture koje vidimo na nekim Faradayevim dubinama.

V. ZAKLJUČAK

Uspoređivali smo raspodjelu ionizirane materije dobivenu iz opažanja radioteleskopa LOFAR s raspodjelom neutralne međuzvjezdane materije (prašine) kako bismo ustanovili iz kojih područja u našoj galaksiji potječe polarizirano sinkrotronsko zračenje. Analiza je napravljena za polje 3C196. Faradayevu dubinu je moguće predvidjeti ako postoje dodatna ograničenja na moguću vrijednost magnetskog polja i gustoću termalnih elektrona dobivena iz drugih mjerenja. Intenzitet izmjenog radiozračenja se isto može odrediti i pritom je jedina nepoznata informacija udio turbulentne komponente magnetskog polja za koji u polju 3C196 pretpostavljamo da je malen. Na temelju ovog istraživanja možemo reći da je moguće da opažano sinhtrotronsko zračenje potječe iz neutralnih područja naše galaksije, ali da bi to mogli tvrditi sa sigurnošću potrebna su dodatna istraživanja koja uključuju analizu drugih vidnih polja na kojima trenutno radimo.

LITERATURA

- ¹ Gene smith's astronomy tutorial, the interstellar medium. <https://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/ISM.html>. Pregledano: 2.4.2020.
- ² Interstellar medium. <https://www.nature.com/subjects/interstellar-medium>. Pregledano: 2.4.2020.
- ³ S. E. Clark, J. E. G. Peek, and M. E. Putman. Magnetically aligned h i fibers and the rolling hough transform. *The Astrophysical Journal*, 789(1):82, Jun 2014.
- ⁴ Carl Heiles and Marijke Haverkorn. Magnetic fields in the multiphase interstellar medium. *Space Science Reviews*, 166(1):293–305, May 2012.
- ⁵ Brentjens, M. A. and de Bruyn, A. G. Faraday rotation measure synthesis. *A&A*, 441(3):1217–1228, 2005.
- ⁶ Cosmos - the sao encyclopedia of astronomy, swinburne university of technology. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/S/Synchrotron+Emission>. Pregledano: 30.5.2020.
- ⁷ C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, M. R. Nolta, N. Odegard, L. Page, D. N. Spergel, J. L. Weiland, E. L. Wright, M. Halpern, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, and E. Wollack. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission. *ApJS*, 148(1):97–117, September 2003.
- ⁸ C. G. T. Haslam, U. Klein, C. J. Salter, H. Stoffel, W. E. Wilson, M. N. Cleary, D. J. Cooke, and P. Thomasson. A 408 MHz all-sky continuum survey. I - Observations at southern declinations and for the North Polar region. *A&A*, 100:209–219, Jul 1981.
- ⁹ C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, and W. E. Wilson. A 408 MHz all-sky continuum survey. II. The atlas of contour maps. *A&AS*, 47:1–143, Jan 1982.
- ¹⁰ George B. Rybicki and Alan P. Lightman. *Radiative Processes in Astrophysics*. 1986.
- ¹¹ Jelić, V., de Bruyn, A. G., Pandey, V. N., Mevius, M., Haverkorn, M., Brentjens, M. A., Koopmans, L. V. E., Zaroubi, S., Abdalla, F. B., Asad, K. M. B., Bus, S., Chapman, E., Ciardi, B., Fernandez, E. R., Ghosh, A., Harker, G., Iliev, I. T., Jensen, H., Kazemi, S., Mellema, G., Offringa, A. R., Patil, A. H., Vedantham, H. K., and Yatawatta, S. Linear polarization structures in lofar observations of the interstellar medium in the 3c field. *A&A*, 583:A137, 2015.
- ¹² Van Eck, C. L., Haverkorn, M., Alves, M. I. R., Beck, R., de Bruyn, A. G., Enßlin, T., Farnes, J. S., Ferrière, K., Heald, G., Horellou, C., Horneffer, A., Iacobelli, M., Jelić, V., Martí-Vidal, I., Mulcahy, D. D., Reich, W., Röttgering, H. J. A., Scaife, A. M. M., Schnitzeler, D. H. F. M., Sobey, C., and Sridhar, S. S. Faraday tomography of the local interstellar medium with lofar: Galactic foregrounds towards ic 342. *A&A*, 597:A98, 2017.
- ¹³ Lallement, R., Babusiaux, C., Vergely, J. L., Katz, D., Arenou, F., Valette, B., Hottier, C., and Capitanio, L. Gaia-2mass 3d maps of galactic interstellar dust within 3 kpc. *A&A*, 625:A135, 2019.

- ¹⁴ Planck Collaboration. Planck early results. xxiv. dust in the diffuse interstellar medium and the galactic halo. *A&A*, 536:A24, 2011.
- ¹⁵ David M. Gottlieb and II Upson, Walter L. Local Interstellar Reddening. *Astrophys. J.*, 157:611, August 1969.
- ¹⁶ van Haarlem, M. P. et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray. *A&A*, 556:A2, August 2013.
- ¹⁷ Podatci su dostupni na <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/583/A137>.
- ¹⁸ Stokes parameters. <https://www.ess.uci.edu/~cmclinden/link/xx/node11.html>. Pregledano: 11.8.2020.
- ¹⁹ Podatci su dostupni na <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/625/A135>.
- ²⁰ Gaia Collaboration (Brown, A. G. A. et al.). Gaia data release 2 - summary of the contents and survey properties. *A&A*, 616:A1, 2018.
- ²¹ M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk, and S. Wheelock. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ*, 131(2):1163–1183, February 2006.
- ²² M. G. Wolfire, D. Hollenbach, C. F. McKee, A. G. G. M. Tielens, and E. L. O. Bakes. The Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium. *Astrophys. J.*, 443:152, Apr 1995.

Željela bih se posebno zahvaliti dr. sc. Viboru Jeliću na pomoći u vođenju kroz izradu ovog rada koji je velikim dijelom napravljen u Laboratoriju za astročestičnu fiziku i astrofiziku na Institutu Ruđer Bošković. Također bih se htjela zahvaliti svom mentoru prof. dr. sc. Krešimiru Pavlovskom na podršci.

SAŽETAK

Autor: Lovorka Gajović

Naslov rada: Potječe li opaženo sinkrotronsko zračenje iz neutralnih područja naše galaksije?

Sažetak: U našoj galaksiji polarizirano radiozračenje je sinkrotronsko zračenje koje proizvode visokoenergetski elektroni. U međuzvjezdanoj materiji u kojoj je prisutno magnetsko polje se zbog Faradayeve rotacije zakreće kut polarizacije emitiranog sinhrotronskog zračenja. Taj efekt je znatno izraženiji u ioniziranoj međuzvjezdanoj materiji zato što ona ima veću gustoću termalnih elektrona te zbog toga sinhrotronsko zračenje koje nastaje u tim područjima biva depolarizirano. Kao posljedica toga trebali bi moći opaziti samo polarizirano zračenje koje nastaje u područjima s neutralnom međuzvjezdanom materijom.

Identificirali smo područja neutralne materije duž dogednice iz 3D raspodjele međuzvjezdane prašine dobivene iz podataka o ekstinkciji koje je prikupio satelit GAIA te smo to iskoristili za predviđanje intenziteta i Faradayeve dubine polariziranog zračenja u polju 3C196. Predviđanje je uspoređeno s promatranjima radiozračenja teleskopom LOFAR što je pokazalo da je moguće da opažamo samo sinkrotronsko zračenje koje potječe iz neutralnih područja Mliječne staze.

Ključne riječi: lokalna međuzvjezdana materija, sinkrotronsko zračenje, Faradayeva dubina, magnetsko polje

SUMMARY

Author: Lovorka Gajović

Title: Does the observed synchrotron emission come from the neutral regions in our Galaxy?

Summary: Polarized radiation in our galaxy, produced by high energy electrons, is synchrotron radiation. In the interstellar medium which contains magnetic fields the angle of polarization changes due to Faraday rotation. This effect is significantly stronger in ionized interstellar medium because of higher thermal electron density. For this reason the radiation from the areas within the ionized medium is depolarized and we should only be able to observe polarized radiation from areas within the neutral medium.

We identified the areas of neutral medium along the line of sight from the 3D distribution of the interstellar dust made from extinction data obtained by GAIA satellite and used this to predict the intensity and Faraday depth of polarized radiation in the 3C196 field. The prediction was compared to LOFAR radiotelescope radiowave observations and it showed that it is possible that we observe only the synchrotron radiation coming from the neutral regions of the Milky Way.

Keywords: local interstellar medium, synchrotron radiation, Faraday depth, magnetic fields