

Istraživanje zračenja međuzvezdanog vodika i prašine u Mliječnom putu

Pajski, Nikolina

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:217:195944>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Nikolina Pajski

ISTRAŽIVANJE ZRAČENJA MEĐUZVJEZDANOG
VODIKA I PRAŠINE U MLIJEČNOM PUTU

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

Nikolina Pajski

Diplomski rad

**Istraživanje zračenja međuzvezdanog
vodika i prašine u Mliječnom putu**

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Vibor Jelić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2022.

Prije svega htjela bih se zahvaliti svojoj obitelji: roditeljima na nesebičnoj podršci tijekom cijelog studiranja i bez kojih sve do sad postignuto ne bi bilo moguće, a posebno hvala mojoj sestri zbog koje se nalazim ovdje i koja mi je bila najveća motivacija i potpora u svakom trenutku.

Veliku zahvalnost dugujem i svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Viboru Jeliću, na mnogim savjetima prilikom pisanja ovog rada, strpljenju i uloženom vremenu. Hvala za svo pruženo znanje i novo iskustvo.

Na kraju bih se zahvalila kolegama i prijateljima za sve sretne trenutke koje su učinile ovaj studij lakšim i zabavnijim.

Sažetak

U našoj Galaksiji, Mliječnom putu, prostor između zvijezda prožet je magnetskim poljem, relativističkim kozmičkim zrakama i međuzvezdanom tvari koja se sastoji od plina u ioniziranom, atomskom i molekularnom stanju te prašine. Zanimljivo je promatrati kako različite faze plina međudjeluju te na koji način magnetsko polje oblikuje difuzni međuzvezdani plin. U tu svrhu ovaj rad bavi se proučavanjem zračenja neutralnog vodika i prašine te detektiranjem i određivanjem orijentacija linearnih struktura koje će se usporediti međusobno i sa smjerom magnetskog polja. Istraživanja su provedena pomoću magneto-hidrodinamičkih simulacija sudara super-ljusaka na temelju kojih je simulirano sinkrotronsko zračenje naše Galaksije te je predviđeno zračenje vodika i prašine. Linearne strukture dobivene sintetskim promatranjima iznenađujuće nalikuju na filamentarne strukture i depolarizacijske kanale koji se nalaze u stvarnim opažanjima. Analiza sinkrotronskog zračenja provodi se RM sintezom koja raspjetljava zračenje po Faradayevim dubinama budući da magneto-ionski medij uzrokuje Faradayevu rotaciju. Za identificiranje i kvantificiranje orijentacije ravnih depolariziranih kanala primjenjuje se Rolling Hough Transform algoritam. Nadalje, iz simulacije se odredi zračenje vodika na temelju čega se prikaže slika temperature sjaja gdje se RHT analizom odredi orijentacija opaženih filamentarnih struktura HI te se također promatra i polarizirano zračenje prašine koje mjeri orijentaciju magnetskog polja. Usporedbom orijentacija linearnih struktura dobiva se da filamenti vodika i depolarizacijski kanali prate orijentaciju magnetskog polja u ravnini neba, a takvi rezultati mogu se pronaći i u stvarnim mjerenjima.

Ključne riječi: Mliječni put, međuzvezdana tvar, MHD simulacija, sinkrotronsko zračenje, zračenje vodika i prašine, RM sinteza, RHT analiza

Diploma thesis title

Abstract

In our Galaxy, the Milky Way, the space between the stars is permeated with magnetic field, relativistic cosmic rays and interstellar matter consisting of gas in ionized, atomic and molecular states, and of dust. It is interesting to observe how different gas phases interact with each other and how magnetic field shapes diffuse interstellar gas. Therefore in this work we study the radiation of neutral hydrogen and cosmic dust, and determine orientations of linear structures which will then be compared with each other and with the orientation of the magnetic field. Study was conducted using magneto-hydrodynamic simulations of colliding super-shells, based on which was simulated synchrotron emission of our Galaxy and determined emission of neutral hydrogen and dust. The linear structures obtained from the synthetic observations surprisingly resemble the filamentary structures and depolarization canals found in the real data. An analysis of synchrotron radiation is performed by RM synthesis, which untangles the radiation by Faraday depths, since the magneto-ionic medium causes Faraday rotation. To identify and quantify the orientation of straight depolarization canals, the Rolling Hough Transform algorithm is applied. Furthermore, hydrogen emission is determined from MHD simulation. In an image of the temperature brightness the orientation of the observed filamentary HI structures is determined by RHT analysis. The polarized dust emission is also analysed since it measures the orientation of the magnetic field. Comparing orientations of linear structures shows that hydrogen filaments and depolarization canals follow orientation of the magnetic field in the plane of the sky, as found in the real observations.

Keywords: the Milky Way, interstellar medium (ISM), MHD simulation, polarized synchrotron emission, hydrogen and dust emission, RM synthesis, RHT analysis

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Mliječni put i međuzvezdana tvar	1
1.1.1	Međuzvezdana tvar	4
1.1.2	Sastav međuzvezdane tvari	5
1.1.3	Magnetsko polje i polarizirana zračenja u Mliječnom putu	8
1.2	Zračenje vodika	12
1.3	Zračenje kozmičke prašine	14
1.4	Motivacija za ovaj rad	17
2	Podaci i simulacije	19
2.1	Magneto-hidrodinamička simulacija	19
2.2	Sintetska promatranja	20
3	Metodologija	22
3.1	RM sinteza	22
3.2	Rolling Hough Transform	24
4	Rezultati	27
4.1	Rezultati RM sinteze	27
4.2	RHT analiza sinkrotronskog zračenja	28
4.3	Rezultati HI kocke	31
4.4	RHT analiza HI filamentarne strukture	31
4.5	RHT analiza polariziranog zračenja prašine	32
4.6	Usporedba rezultata	32
5	Zaključak	35
	Literatura	37

1 Uvod

1.1 Mliječni put i međuzvezdana tvar

Ljude je oduvijek zanimalo prostranstvo koje krije noćno nebo. No, sve do 17. stoljeća čovjek je svemir promatrao golim okom sve do izuma prvog teleskopa 1608. godine u Nizozemskoj. Iako ni tada teleskopi nisu u početku korišteni za promatranje svemira, pojava teleskopa uvelike je pridonijela razvoju moderne astronomije. Tek je Galileo Galilei bio među prvima koji je svoj unaprijeđeni teleskop uperio u noćno nebo te pismeno zabilježio nova otkrića i opažanja. Između ostalih istraživanja, prvi je promotrio brojne maglice i svijetle nakupine raspršene po nebu te je na taj način po prvi put proučena priroda naše Galaksije. Gledana sa Zemlje golim okom, naša Galaksija izgleda kao blijedi pojas rasute svjetlosti koji se proteže cijelim nebom. Odatle i naziv Mliječni put ili Mliječna staza. Galileo je ustanovio da se zapravo taj blijedi pojas svjetlosti sastoji od beskonačnog broja mutnih zvijezda slaba sjaja, to jest Mliječna staza je nakupina golemih rojeva individualnih zvijezda.

Mnogi astronomi smatrali su sve do početka 20. stoljeća da je Mliječna staza isto što i čitavi vidljivi svemir, a tek je 20-ih godina 20. stoljeća potvrđeno da se mnoge maglice i zvijezde zapravo nalaze izvan Mliječne staze. Danas znamo da je svemir neopisivo velik i sadrži bezbroj galaksija koje se obično nalaze u većim nakupinama, jatima. Tako je i Mliječna staza dio Lokalne Grupe čiji se promjer prostire 10 milijuna svjetlosnih godina, a sastoji se od 40-ak gravitacijski vezanih galaksija među kojima su Galaksija Andromeda, Veliki i Mali Magellanov oblak te 30-ak patuljastih galaksija [1].

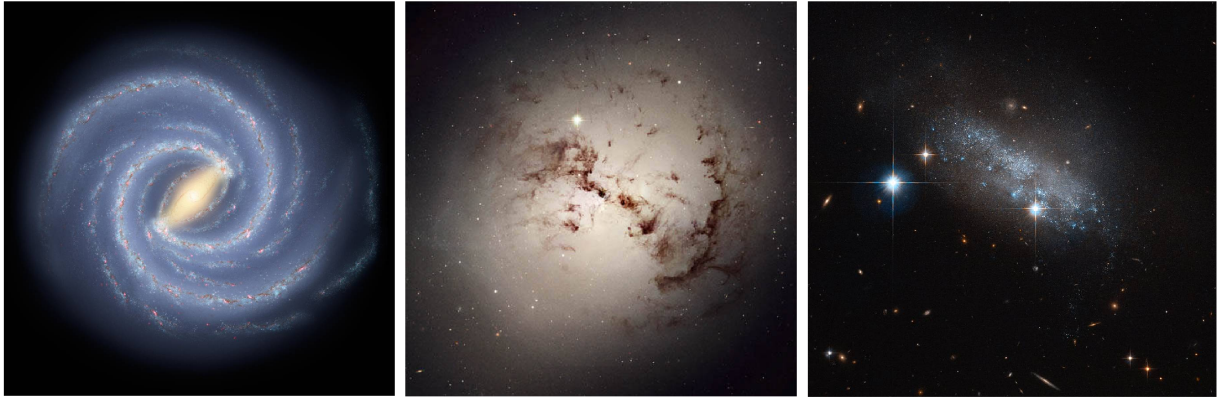
Postoje tri različite vrste galaksija. Jedna od njih je spiralna, a Mliječni put primjer je takve galaksije sa središnjom strukturom u obliku prečke. Sastoji se od rotirajućeg diska promjera oko 90 000 svjetlosnih godina (26.8 ± 1.1 kpc), prepunog međuzvezdane tvari i vrlo svijetlih i mladih zvijezda, te središnjeg zadebljanja, promjera približno 25 000 svjetlosnih godina, gdje se nalazi velika koncentracija uglavnom starijih zvijezda. Disk i jezgra uronjeni su u galaktički halo u kojem se nalazi oko 150 kuglastih skupova zvijezda zajedno uz različite vrste drugih zvijezda, raštrkanih kroz halo, te vrlo rijedak plin. Naš Sunčev sustav nalazi se na pola puta između središta i ruba diska Mliječnog puta, udaljen 27 000 svjetlosnih godina od Galaktičkog centra u kojem se, kao i u centru svake galaksije, nalazi masivna crna

rupa, Sagittarius A. [2]. Mliječni put, kao i ostali tipovi galaksija mogu se vidjeti na slici 1.1.

a) Mliječni put

b) eliptična galaksija NGC 1316

c) nepravilna galaksija IC 3583



Slika 1.1: Na slici su prikazani različiti tipovi galaksija. Slika a) prikazuje Mliječni put, našu spiralnu galaksiju. Slika je objavljena 27.8.2009. god. Na slici b) prikazana je eliptična galaksija NGC 1316 snimljena Hubble Space teleskopom, a objavljena 23.3.2008. god. Slika c) prikazuje nepravilnu galaksiju IC 3583 koja se nalazi u zvježđu Djevice, snimljena je Hubble teleskopom i objavljena 2.12.2016. god. Sve slike preuzete su i prilagođene prema ref. [3]

Spiralne galaksije karakteristične su po kracima koji se obavijaju oko središta. To su područja materije visoke gustoće, ali ne sastoje se uvijek od istih zvijezda, već zvijezde prolaze kroz krakove. Kutna brzina rotacije galaktičkog diska varira s udaljenošću od središta galaksije pa se unutrašnjost diska rotira mnogo brže od vanjskog dijela. U početku se vjerovalo da je to uzrok pojave spirala, međutim, čvrsti krak bi, nakon nekoliko galaktičkih rotacija, postajao sve zakrivljeniji i sve čvršće obavijen oko galaksije dok se konačno ne bi stopio u jedinstven disk. Postoji drugačiji mehanizam koji uzrokuje krakove kakvi se opažaju. Spiralna struktura nastaje zbog valova gustoće u kojima se zvijezde, prašina i oblaci plina gibaju poput auta u prometnoj gužvi: kad se približavaju gužvi kreću se ubrzano, a usred nje povećava se gustoća i kreću se sporije te nakon toga izlaze iz gužve. To objašnjava zašto su spiralni kraci vrlo aktivna područja u pogledu proizvodnje zvijezda. Kako materija doživljava varijacije u svojoj koncentraciji, oblaci plina i prašine koji ulaze u val gustoće sabijaju se i to omogućuje nastajanje mladih i masivnih (OB) zvijezda. Budući da se stva-

ranje ne događa odmah, novonastale masivne zvijezde nalaze se malo iza valova gustoće, no kako su kraćeg vijeka, umiru prije nego što potpuno napuste val gustoće zbog čega samo manje, uglavnom crvene zvijezde napuštaju val i raspodjeljuju se po galaktičkom disku.

Drugi tip galaksija su eliptične. One imaju elipsoidni oblik i klasificiraju se prema spljoštenosti u kategorije od E0, kojoj pripadaju eliptične galaksije gotovo savršenog sfernog oblika, to jest vrlo male ekscentričnosti, do E7 gdje spadaju vrlo izdužene galaksije, visoke ekscentričnosti. Za razliku od spiralnih galaksija, zvijezde se ne gibaju samo u ravnini diska, već po nasumičnim, izduženim orbitama zbog čega imaju nepravilnu strukturu te se uz to vrlo sporo okreću oko svoje osi. Sastoje se od starih zvijezda malih masa, uglavnom crvenih i žutih zvijezda raznih veličina te vrlo rijetko plavih i bijelih divova, a uzrok tome je nedostatak međuzvjezdane tvari. Znanstvenici smatraju da eliptične galaksije nastaju sudarima više galaksija, na što upućuje i njihova starost. Takav ishod očekuje i našu Mliječnu stazu koja će se kroz nekoliko milijardi godina sudariti i stopiti s galaksijom Andromedom te će nastati nova galaksija eliptičnog oblika. U takvim sudarima dolazi do interakcija prilikom kojih galaksija gubi većinu svoje mase (plin i prašina se rasprše u svemir) i prilikom kojih dolazi do iscrpljivanja značajne količine plina zbog stvaranja velikog broja novih zvijezda uslijed gravitacijskog djelovanja koje prouzroči udarni val. Prema tome, eliptične galaksije razlikuju se od spiralnih jer sadrže vrlo malo plina i prašine, gotovo da ni nemaju međuzvjezdanu tvar te dominiraju starije zvijezde manjih masa, budući da se nakon početnog vala nastajanja brojnih zvijezdi, formiranje novih u ovakvim galaksijama vrlo rijetko događa. S obzirom na to da eliptične galaksije nastaju sudarima, u većini slučajeva one su i najveće te se obično mogu pronaći u središtu jata galaksija.

Prema osnovnoj klasifikaciji, u treći tip galaksija spadaju nepravilne galaksije. One nemaju definiranu strukturu ili simetriju, nemaju jezgru, masa im je mala i slabog su sjaja, a obično sadrže veliku količinu međuzvjezdane tvari pa se često u njima mogu pronaći mlade zvijezde. Postoje dvije vrste nepravilnih galaksija, Irr I i Irr II, od kojih prva pokazuje tragove spiralne strukture, ali obje vrste galaksija imaju neobičan izgled koji nastaje uslijed sudaranja i gravitacijskog međudjelovanja s drugim galaksijama. [4]

1.1.1 Međuzvjezdana tvar

Prostor između zvijezda naše galaksije prožimaju tri osnovna elementa: sveprisutno magnetsko polje, visokoenergetske kozmičke zrake i međuzvjezdana tvar sastavljena od plina i prašine. Ta tri osnovna elementa nalaze se na približno jednakom tlaku i vezana su elektromagnetskim silama te zbog te veze međusobno utječu jedni na druge: kozmičke zrake i magnetsko polje utječu na dinamiku i distribuciju plina i prašine pružajući potporu protiv gravitacijskog sažimanja, dok plin i prašina pojačavaju magnetsko polje, ubrzavaju kozmičke zrake te ograničavaju kozmičke zrake i magnetsko polje na područje Mliječnog puta. Osim toga, u međuzvjezdanom prostoru nalaze i druge bitne sastavnice, a to su elektromagnetska zračenja (fotoni iz raznih izvora, kozmičko pozadinsko zračenje, zračenja atoma, iona, molekula i prašine, itd.), gravitacijsko polje i tamna tvar [5]. Međutim, u ovom radu proučavanje će se ograničiti na međuzvjezdanu tvar i zračenje proizvedeno kozmičkim zrakama te usmjerenost njihovih struktura u odnosu na smjer magnetskog polja.

Međuzvjezdana tvar relativno je nehomogen medij male gustoće. Veće koncentracije mogu se pronaći u blizini Galaktičke ravnine i u spiralnim krakovima gdje čine 10 – 15 % ukupne mase Galaktičkog diska, ali ta masa ograničena je na diskretne oblake koji zauzimaju tek 1 – 2 % volumena između zvijezda [6]. Svoju prisutnost pokazuje spektralnom analizom zvijezda gdje se mogu se javiti linije koje ukazuju na postojanje nekih elemenata, a da nije predviđeno njihovo postojanje u tim zvijezdama, te stoga ti elementi moraju imati međuzvjezdano podrijetlo.

Jedan od najvažnijih aspekata međuzvjezdane tvari je recikliranje materije nakon umiranja zvijezda. Međuzvjezdana tvar nije uniformno raspoređena, već postoje dijelovi veće i manje gustoće te više ili niže temperature, poput gustih i hladnih molekularnih oblaka u kojima zbog gravitacijske nestabilnosti dolazi do urušavanja materije i formiranja nove zvijezde. Ukoliko bi temperatura u oblaku bila viša, tlak plina uzrokovao bi širenje oblaka čime bi se onemogućilo formiranje zvijezda. Nadalje, u zvijezdama plin prolazi kroz termonuklearne reakcije pri čemu nastaju teži elementi. Zvjezdani vjetrovi tijekom evolucije zvijezda, planetarne maglice i supernove vraćaju dio materije u međuzvjezdani prostor, a takvo obogaćivanje međuzvjezdane tvari zvjezdanom masom i energijom održava heterogenu strukturu u kojoj gusta i hladna područja postaju mjesta nove generacije zvijezda čime se nastavlja recikliranje materije.

Međutim, međuzvezdana tvar nije samo pasivni supstrat u kojem se rađaju zvijezde, ona također kontrolira i utječe na razna svojstva Galaksije jer prostorna raspodjela, zajedno s termalnim i kemijskim svojstvima međuzvezdane tvari određuju mjesto nastanka, masu i sjaj nove zvijezde, a to se odražava na cjelokupnu strukturu i dinamiku same Galaksije.

1.1.2 Sastav međuzvezdane tvari

Međuzvezdana tvar mješavina je nekoliko faza koje međusobno djeluju i utječu jedna na drugu, a razlikuju se po tome je li tvar u ionskom, atomskom ili molekularnom stanju te po temperaturi i gustoći tvari. Budući da je međuzvezdani prostor vrlo dinamičan i turbulentan, uzrokuje kruženje plina od potpuno ioniziranog difuznog stanja, kroz gušće neutralne sustave sve dok se ne formiraju gusti, hladni molekularni oblaci u kojima se rađaju nove zvijezde. Plinske faze međusobno se razlikuju i po stupnju ionizacije, što određuje sastav pojedine faze i način na koji se može opažati, a uglavnom se opisuju stanjima vodika od čega se za ionizirani vodik koristi oznaka HII, za neutralan atom vodika HI te za molekulu vodika uobičajeni oblik H_2 . U tablici 1.1 nabrojene su faze i zapisana neka njihova svojstva kao što su sastav, gustoća, temperatura i načini kojima mogu biti opažane.

Prateći stupanj ionizacije, prva faza je **vruća ionizirana tvar** (eng. *hot ionised medium*, HIM), izrazito male gustoće, $0,004 \text{ cm}^{-3}$, a javlja se na temperaturi 10^6 K uzrokovanoj udarnim valovima prilikom eksplozija supernova. Sadrži HII te vrlo ionizirane plinove („metale“) CIV, NV i OVI koji sudarima uzrokuju ionizaciju vodika. Opaža se uglavnom pomoću X-zračenja, apsorpcijskih linija ioniziranih metala u UV području te sinkrotronskog zračenja u radiovalnom području.

Toplu ioniziranu tvar (eng. *warm ionised medium*, WIM) karakteriziraju široko rasprostranjena područja gotovo potpuno ioniziranog vodika s gustoćom koja varira od $0,3 \text{ cm}^{-3}$ do 10^4 cm^{-3} i temperaturom reda veličine 10^4 K. Sadrži HII koji ioniziraju vruće zvijezde spektralnog tipa O ultraljubičastim zračenjem te su jedini izvori dovoljne energije koji mogu održati vodik ioniziranim. Primarno se proučava emisijom H_α linije i drugih optičkih linija te mjerenjem disperzije zračenja pulsara.

UV spektroskopija lokalne međuzvezdane tvari ukazuje na prisutnost plina na nižim temperaturama (5000 K) s ionizacijskim udjelom od oko 0,5. **Topla djelomično ionizirana tvar**, (eng. *warm partly ionised medium*, WPIM) je po fizikalnim

faza	sastav	n [cm ⁻³]	T [K]	način opažanja
HIM	HII, visoko ionizirani metali	0,004	10 ^{5,5}	emisija UV i X-zraka, sinkrotronsko radiovalno zračenje
WIM	HII	0,3-10 ⁻⁴	10 ⁴	optičke emisijske linije, kontinuirano toplinsko zračenje
WPIM	HII, HI	0,3	>5000	optičke i UV apsorpcijske linije
WNM	HI, HII	0,6	5000 - 10 ⁴	emisija i apsorpcija HI 21 cm linije, apsorpcijske linije optičkog i UV zračenja
LNМ	HI	4	100 - 5000	-
CNM	HI, CII	30	100	emisija i apsorpcija HI 21 cm linije, apsorpcijske linije optičkog i UV zračenja
difuzni molekularni plin	H ₂ , CO	100	50	emisija i apsorpcija HI 21 cm linije, emisija linije CO 2.6 mm, apsorpcijske linije vidljivog i UV zračenja
MC	H ₂ , CO, H ₂ O, OH, HCN, CO ₂ , ...	10 ³ – 10 ⁶	10 - 50	emisija linije CO 2.6 mm, zračenje prašine u dalekom infracrvenom dijelu spektra

Tablica 1.1: Tablica faza međuzvezdane tvari podijeljene prema temperaturi i gustoći uz opis sastava pojedine faze i načina na koji se može opažati. Nazivi faza imenovani su često korištenim engleskim kraticama. Više informacija može se pronaći u knjizi Brucea T. Drainea (2011) [5]

svojstvima i sastavu slična toploj ioniziranoj tvari, ali sadrži nešto manje HII. Može se detektirati pomoću optičkih i UV apsorpcijskih linija.

Većina međuzvezdane tvari u Galaktičkom disku je u obliku neutralnog atoma vodika, HI. Taj plin nalazi se na ravnotežnom tlaku u dvije stabilne faze kao: **topla neutralna tvar**, (eng. *warm neutral medium*, WNM) na temperaturama nešto nižim

od 10^4 K ili kao **hladna neutralna tvar**, (eng. *cold neutral medium*, CNM) na relativno niskim temperaturama oko 100 K. Ipak, postoje dokazi i o dodatnoj fazi između navedenih temperatura koja je termalno nestabilna – **mlačna neutralna tvar**, (eng. *lukewarm neutral medium*, LNM) [7]. Topla neutralna tvar popunjava značajan udio volumena međuzvezdane tvari, oko 40 %, i sadrži oko 75 % HI vodika, dok je volumni udio hladne neutralne tvari tek 1 % i sadrži preostalih 25 % neutralnog vodika. Zastupljenost tih dviju faza može se odrediti uspoređivanjem emisijske i apsorpcijske linije 21 cm, no ta tehnika opažanja zbog male vjerojatnosti prijelaza zahtijeva velike gustoće stupca neutralnog vodika [5].

Vruća tvar okupira mnogo veći volumen od hladne tvar, ali sadrži manje mase. Ona formira okruženje u kojem mogu nastati hladni neutralni i molekularni oblaci gdje glavnina molekularnog plina samogravitira i time sprečava širenje plina. Iako se astronomske molekule mogu detektirati u različitim okruženjima, generalno se povezuju s molekularnim oblacima i njihovim gustim nakupinama koje se sastoje i od plinovite i od krute faze malih čestica prašine.

Međuzvezdani oblaci (opisani u [8]) mogu se klasificirati u nekoliko tipova oblaka. Difuzni atomski oblaci sastoje se od hladnih nakupina neutralne tvari, dakle od neutralnih atoma vodika i ioniziranih atoma čiji je potencijal ionizacije manji nego kod vodika (npr. CII). Uzrok ionizacije je izloženost radijacijskom zračenju koje uz to uništava bilo kakvo formiranje molekula. Gustoća takvih oblaka obično je vrlo mala ($10 - 100 \text{ cm}^{-3}$) i niskih su temperatura (30 – 100 K) te su približno transparentni na svjetlost pozadinskih zvijezda.

Sljedeći tip oblaka su **difuzni molekularni oblaci** u kojima je međuzvezdano zračenje dovoljno potisnuto što omogućuje postojanje vodika u molekularnom obliku. Unutrašnjost oblaka zaštićena je od zračenja jer molekularni oblak okružen s tvari koja omogućava prelazak iz atoma vodika (HI) u molekulu vodika (H_2), a osim te dvije glavne komponente u molekularnom oblaku nalaze se i ioni, budući da i dalje postoji dovoljno zračenja za fotodisocijaciju, od kojih dominira ionizirani ugljik (CII). U takvim oblacima gustoća je obično $100 - 500 \text{ cm}^{-3}$, a temperatura 30 – 100 K te je ekstinkcija vrlo izražena.

Uz dovoljnu zaštitu od međuzvezdanog zračenja ugljik napokon prelazi iz ioniziranog u neutralan atom ili molekularni oblik (CO). Takvi oblaci nazivaju se prozirni oblaci, a radi zaštite od zračenja moraju biti okruženi difuznim molekularnim obla-

cima.

Na posljjetku preostaju još gusti **molekularni oblaci**, (eng. *molecular clouds*, MC) u kojima ugljik poprima potpuno molekularan oblik, to jest prelazi u stabilnu molekulu CO. Gustoća je viša od 10^4 cm^{-3} , temperature se kreću oko $10 - 50 \text{ K}$, a zanimljivi su po tome što je većina poznatih međuzvjezdanih molekula otkrivena upravo u ovim oblacima mikrovalnim prijelazima te postoje neki vrlo nestabilni kemijski spojevi, koji mogu opstati budući da nema dovoljno energije koja bi ih pretvorila u stabilnije oblike. Metoda kojom se istražuje i opaža molekularni plin je rotacijski prijelaz $J = 1 \rightarrow 0$ molekule CO valne duljine 2,6 mm.

Opisane faze međuzvjezdanog plina izrazito su rijetke, naročito u usporedbi s atmosferskim plinom na Zemlji, npr. čak i najgušća faza molekularnih oblaka sadrži između 10^3 i 10^6 molekula po cm^3 , dok atmosfera na Zemlji sadrži 10^{19} molekula po cm^3 . Sav plin zajedno čini otprilike 99 % materije međuzvjezdane tvari, a preostalih 1 % čini prašina, ali i taj mali postotak ima važnu ulogu u formiranju zvijezda i planeta. Plin je primarno sastavljen od vodika (90,8 % brojčano ili 70,4 % ukupne mase) od čega je udio ioniziranih atoma 23 %, neutralnih atoma 60 %, a molekula 17 %, zatim drugi najzastupljeniji kemijski element je helij (9,1 % brojčano ili 28,1 % ukupne mase), a preostalih težih elemenata kao što su ugljik, dušik, kisik, željezo, silicij, itd. je vrlo malo (0,12 % brojčano ili 1,5 % ukupne mase) [5], [6].

1.1.3 Magnetsko polje i polarizirana zračenja u Mliječnom putu

Magnetsko polje ima vrlo važnu ulogu u raznim procesima u Galaksiji, od distribucije mase i energije, do formiranja hladnog molekularnog plina važnog za nastajanje zvijezda. Međutim, dobivanje potpune slike ograničeno je dostupnim opažajkim metodama i nedovoljno preciznim načinima mjerenja magnetskog polja. Glavne metode opažanja su polarizirano zračenje i promatranje kozmičkih zraka, no zvjezdana polarimetrija daje informacije samo o smjeru polja, a određivanje jakosti polja provodi se mjerenjem Zeemanovog efekta za liniju 21 cm neutralnog vodika, radiovalnog sinkrotronskog zračenja relativističkih elektrona i Faradayeve rotacije linearno polariziranih radiovalova.

Polarizirano zračenje dolazi od *i*) termalnog zračenja asimetričnih zrnca prašine koje svoju kraću os usmjere paralelno sa smjerom magnetskog poja, a emitirano zračenje polarizirano je okomito na smjer magnetskog pola, te dolazi od *ii*) zvjezdane

svjetlosti koja prilikom interakcije sa zrcima prašine postaje linearno polarizirana u smjeru magnetskog polja. Mehanizmi polarizacije bit će detaljnije opisani u poglavlju 1.3

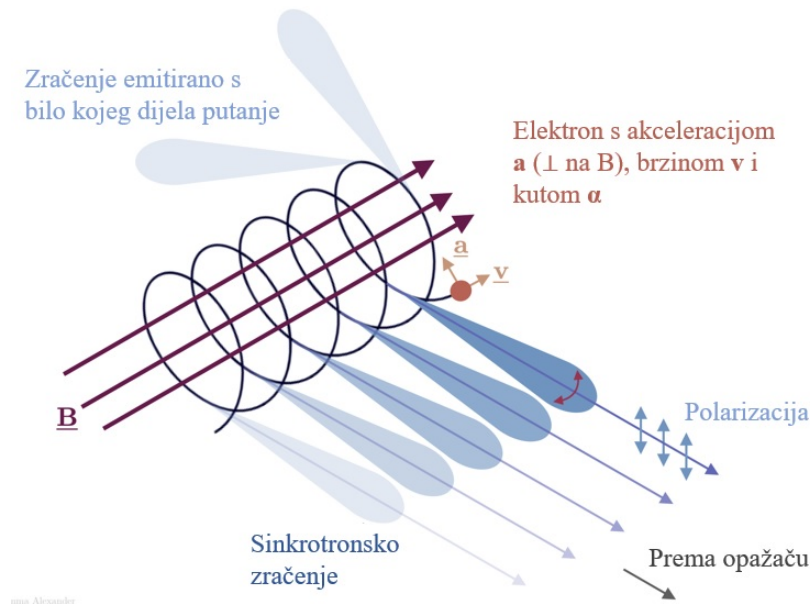
Osim fotona, mogu se promatrati i čestice kozmičkih zraka (protoni, elektroni i jezgre atoma) te njihovo gibanje relativističkim brzinama, a budući da imaju naboj reagiraju na magnetsko polje koje promijeni putanju čestica. Kako je gibanje čestica zakrenuto za neki kut u odnosu na smjer magnetskog polja, na komponentu brzine okomitu na polje djeluje Lorenzova sila i dolazi do ubrzavanja čestice, a posljedica je spiralno gibanje oko linija magnetskog polja. Ubrzanje uzrokuje emisiju elektromagnetskog zračenja, to jest pojavu radiovalnog sinkrotronskog zračenja, koje se može promatrati, ali time čestica gubi energiju i s vremenom se hladi. Na slici 1.2 može se vidjeti način gibanja i zračenja čestice te polarizacija sinkrotronskog zračenja do koje dolazi prilikom prolaska kroz međuzvezdanu materiju. Veliki dio sinkrotronskog zračenja, 69 % - 75 % [9], linearno je polarizirano, s postotkom polarizacije koji se određuje pomoću:

$$p = \frac{\gamma + 1}{\gamma + 7/3} \quad (1.1)$$

gdje su tipične vrijednosti γ između 2 i 3, no na niskim frekvencijama (ispod 200 MHz) opaža se puno manji postotak zračenja originalne polarizacije, zbog utjecaja Faradayeve rotacije, odnosno depolarizacije. Polarizirana sinkrotronska emisija radiovalnog zračenja važan je izvor informacija ne samo o magnetskom polju, već i relativističkim elektronima te materiji kroz koju zračenje prolazi na putu do opažača.

Do Zeemanovog cijepanja atomske ili molekularne linije dolazi prilikom interakcije magnetskog dipolnog momenta elektrona s vanjskim magnetskim poljem kada se određeni energijski nivoi atoma ili molekule podijele s razlikom među nivoima $\Delta\nu$ koja je proporcionalna jakosti magnetskog polja. Magnituda međuzvezdanog magnetskog polja je reda veličine 1-100 μG [5], što je vrlo malo i Zeemanov pomak je premali da bi se mjerio, čak i za liniju 21 cm, ali budući da dolazi do odvajanja frekvencije između lijeve i desne kružne polarizacije, moguće je mjeriti razliku između frekvencija i na taj način odrediti Zeemanov efekt.

Međutim, mjerenja Zeemanovog cijepanja usmjerena su prema područjima visoke gustoće stupaca HI, prema hladnim neutralnim oblacima pa se za ionizirana područja promatra Faradayeva rotacija. Magnetsko polje i termalni elektroni u ioniziranom



Slika 1.2: Sinkrotronsko zračenje emitiraju nabijene čestice čiji je smjer akceleracije okomit na smjer brzine. Gibaju se u magnetskom polju po spiralnoj putanji i s bilo kojeg mjesta putanje emitiraju radiovalno zračenje. Preuzeto i prilagođeno prema [10].

plinu duž linije gledanja Faraday rotiraju sinkrotronsko zračenje [7]. Propagiranje linearno polariziranih elektromagnetskih valova kroz ioniziranu tvar prožetu magnetskim poljem uzrokuje zakretanje ravnine polarizacije za neki kut zbog različite brzine propagacije lijevo i desno polarizirane komponente zračenja. Konkretnije, iznos kuta zakretanja na nekoj valnoj duljini $\lambda(m)$ jednak je [9] i [11]:

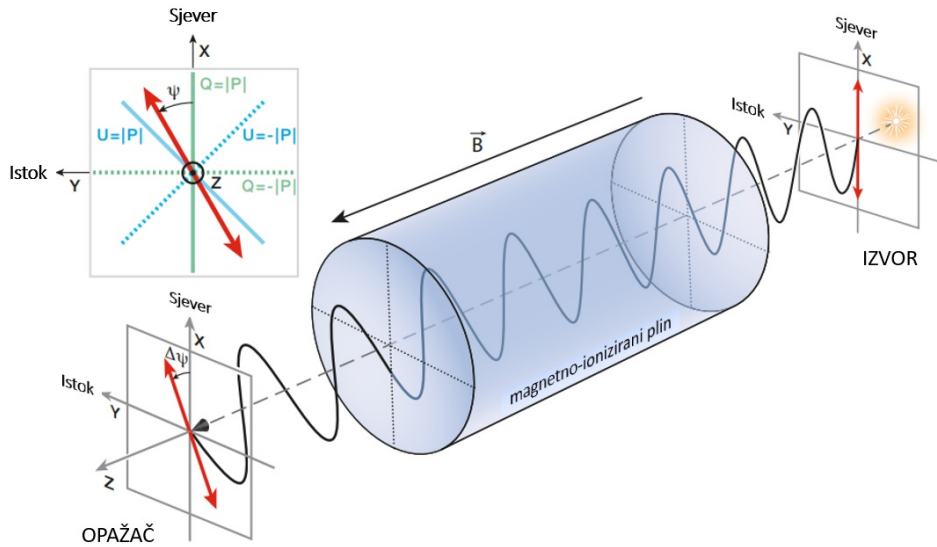
$$\Delta\psi = RM\lambda^2 \quad (1.2)$$

gdje je mjera rotacije (eng. *rotation measure*), RM, nagib funkcije kuta polarizacije χ ovisne o kvadratu valne duljine, mjerena u jedinicama rad m^{-2} , a zadana kao:

$$RM = 0,81 \int n_e \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} \quad (1.3)$$

Gustoća elektrona n_e izražena je u cm^{-3} , jakost magnetskog polja B je u μG , a $d\mathbf{r}$ je infinitezimalna duljina puta u parsecima. Ilustracija Faradayeve rotacije i kako ona utječe na orijentaciju polarizacije prikazana je na slici 1.3. Budući da sinkrotronsko zračenje (i polarizacija tog zračenja) prati komponentu magnetskog polja okomitog

na doglednicu i ovisi o svojstvima kozmičkih zraka, a Faradayeva rotacija daje informacije o paralelnoj komponenti magnetskog polja duž doglednice i ovisi o gustoći elektrona, zbog takvih komplementarnih informacija najčešće se mjerenja provode zajedno.



Slika 1.3: Na slici je prikazano kako električno polje linearno polariziranih radiovalova oscilira u smjeru propagiranja između izvora i opažača te kako Faradayeva rotacija utječe na orijentaciju polarizacije (prikazano crvenom obostranom strelicom) kada val prolazi ioniziranim plinom u magnetskom polju. Ako je magnetsko polje u smjeru opažača, tada je Faradayeva rotacija suprotna smjeru gibanja kazaljki sata te to odgovara pozitivnoj promijeni kuta $\Delta\psi$. U gornjem lijevom kutu prikazane su osi Stokes Q i U parametri, gdje je $Q = \pm|P|$ za $U=0$ i obratno. Preuzeto i prilagođeno prema [9].

Uz Faradayevu rotaciju vezan je još jedan bitan efekt. Radi se o depolarizaciji prilikom koje se gubi koherentnost zračenja. Sinkrotronsko zračenje linerano je polarizirano što znači da ima preferirani smjer titranja elektromagnetskih valova. Ako je izvor koherentan, tada će i linearno polarizirano zračenje biti koherentno, međutim, u Mliječnom putu distribucije termalnih i kozmičkih elektrona izmiješane su te elektromagnetsko zračenje s dva različita mjesta duž linije gledanja ne prolazi identičnu međuzvezdanu tvar što dovodi do Faradayeve rotacije s različitim kutovima zakretanja. Na taj način gubi se koherentnost polarizacije izvora, a budući da se teleskopom opaža suma zračenja, dolazi do međusobnog poništavanja valova, odnosno depola-

rizacije. Iz izraza 1.2 i 1.3 uočava se da je kut rotacije ovisan o gustoći elektrona i jakosti magnetskog polja, stoga su mogući uzroci depolarizacije također i nagle promjene u magnetskom polju ili turbulencije u međuzvezdanoj tvari nastale utjecajem zvijezda. Kako je Faradayeva rotacija proporcionalna kvadratu valne duljine, depolarizacija je izraženija za niže frekvencije zračenja.

Tanka depolarizirana područja gdje je opaženi intenzitet polarizacije jednak ili manji od razine šuma, sa širinom koja otprilike odgovara kutnoj rezoluciji teleskopa, nazivaju se depolarizacijski kanali. Uravo će određivanje orijentacije depolariziranih kanala sinkrotronskog zračenja biti jedan od predmeta istraživanja u ovom radu, a rezultati orijentacije uspoređivat će se s vlaknima neutralnog vodika.

1.2 Zračenje vodika

Hladni međuzvezdani plin ne emitira zračenje na vidljivim valnim duljinama. Međutim, neutralni vodik, koji čini većinu ovog materijala, može se detektirati promatranjem rijetkog prijelaza poznatog kao „spin-flip“. Razvoj uređaja dovoljno osjetljivog da otkrije ovaj prijelaz doveo je do procvata radioastronomije, a danas je prijelaz spin-flip pronašao široku primjenu od mapiranja plina u galaksijama do MRI u medicini.

Jaki učinci, kao što su elektrostatske interakcije elektrona i jezgre, elektron – elektron interakcije i kinetička energija elektrona, uzrokuju grubu strukturu atoma koja daje energije prijelaza između diskretnih energetske stanja. Međutim, za jednu vrijednost kvantnog broja, tj. za istu energiju može se dobiti više valnih funkcija što znači da su ta stanja degenerirana. Preciznijim mjerenjima, primjerice spektra vodika, ne dobivaju se samo glavne linije, već je moguće opaziti veći broj prilično bliskih, užih linija koje ukazuju na to da atom ima kompleksniju strukturu. Cijepanje degeneriranih energijskih nivoa daje finu i hiperfinu strukturu atoma, a uzrok su slabi učinci do kojih dolazi uslijed interakcija elektrona i jezgri s unutarnjim magnetskim poljima u atomu.

Budući da proton ima spin $\frac{1}{2}$, jezgra ima ukupan nuklearni angularni moment, I , koji se nalazi u magnetskom polju generiranom gibanjem elektrona oko jezgre. Spin jezgre interagira s magnetskim poljem što dovodi do hiperfinog cijepanja vrlo bliskih paralelnih i antiparalelnih stanja. Osnovno stanje neutralnog atoma vodika energije

13.6 eV nije zapravo jedino, konačno stanje energije. S obzirom na to da i elektron ima spin $\frac{1}{2}$ te spinovi mogu biti „up“ i „down“, postoje 4 moguća stanja. Ta stanja nemaju sasvim iste iznose energije, postoje male razlike među njima, a antiparaleno stanje niže je energije. U osnovnom stanju, gdje su kvantni brojevi $n = 1$ i $l = 0$, za antiparalelne spinove protona i elektrona zbroj ukupnog nuklearnog i elektronskog angularnog momenta, to jest ukupan atomski angularni moment je $F = 0$ (singlet stanje), dok je za paralelne spinove protona i elektrona $F = 1$ (triplet)

Razlika energija između ta dva stanja iznosi $\Delta E = 5.874 \mu\text{eV}$ što odgovara temperaturi $T_0 = \frac{h\nu_{10}}{k_B} = 0,0682 \text{ K}$, gdje je Boltzmannova konstanta $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ [12]. Vrlo mala energija pobude može usmjeriti spin elektrona paralelno spinu protona te se neutralan atom pronade u vrlo malo pobuđenom stanju. Uzrok promijene spina uglavnom su sudari s drugim atomima, elektronima ili protonima, no samo mali postotak svih sudara rezultira apsorpcijom ili emisijom fotona. Nakon vrlo dugog vremena elektron će spontano okrenuti spin kako bi se vratio iz stanja tripleta u niže osnovno stanje te će pritom emitirati foton energije jednake energiji prijelaza između ta dva hiperfina stanja. Frekvencija emitiranog fotona iznosi $\nu_{10} = 1420 \text{ MHz}$ što je ekvivalentno poznatoj valnoj duljini $\lambda_{10} = 21 \text{ cm}$ u vakuumu, gdje oznaka indeksa 1 i 0 predstavlja prijelaz iz stanja 1 (triplet) u stanje 0 (singlet). Temperatura pobude linije 21 cm obično se naziva temperatura spina, T_S , a definirana je pomoću omjera populacije hiperfina stanja HI atoma:

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{T_0}{T_S}} \quad (1.4)$$

s omjerom faktora statističke degeneracije $g_1/g_0 = 3$. Budući da je $n_1 \approx \frac{3}{4}n(HI)$ i $n_0 \approx \frac{1}{4}n(HI)$, taj omjer također iznosi približno 3 za slučaj $T_S \gg T_0$. Oblak vodika ima optičku dubinu koja se definira kao:

$$\frac{d\tau_\nu}{\text{km s}^{-1}} = -\kappa_\nu(s) d\left(\frac{s}{\text{cm}}\right) \quad (1.5)$$

gdje je κ_ν koeficijent apsorpcije s obrnuto proporcionalnom ovisnošću o temperaturi spina. Uključivanjem izraza za koeficijent apsorpcije u jednadžbu 1.5 dobiva se:

$$\frac{d\tau_\nu}{\text{km s}^{-1}} = -5,49 \cdot 10^{-19} \left(\frac{N_H}{\text{cm}^{-3}}\right) \left(\frac{T_S}{\text{K}}\right)^{-1} \left(\frac{\Phi_\nu}{\text{km}^{-1}\text{s}}\right) d\left(\frac{s}{\text{cm}}\right) \quad (1.6)$$

Funkcija Φ_ν opisuje raspodjelu apsorpcije ili emisije oko vrha frekvencije i zadovoljava $\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_\nu d\nu = 1$, a N_H je gustoća stupca neutralnog vodika definirana kao:

$$\frac{N_H}{\text{cm}^{-2}} = \int_0^\infty \frac{n_H(s)}{\text{cm}^{-3}} ds \quad (1.7)$$

Integriranjem izraza 1.6 po svim brzinama (=frekvencijama) na lijevoj strani i po duljini linije gledanja na desnoj strani, uz konstantnu temperaturu spina T_S , može se izvesti izraz za gustoću stupca vodika:

$$\frac{N_H}{\text{cm}^{-2}} = 1.82 \cdot 10^{18} \left(\frac{T_S}{\text{K}} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \tau_\nu d \left(\frac{\nu}{\text{km s}^{-1}} \right) \quad (1.8)$$

Međutim, precizna mjerenja T_S za stvarni oblak plina prilično su teška. Određivanje parametara za međuzvezdani plin točnije je ako postoji pozadinski izvor s malom kutnom veličinom, mjereno velikim teleskopom. Za HI liniju 21 cm dvije varijable koje se mogu mjeriti su optička dubina τ dobivena proučavanjem apsorpcije u odnosu na pozadinski kontinuirani radiovalni izvor čija je temperatura sjaja T_C i temperatura sjaja opažene linije T_L dobivena iz spektroskopske emisije. Opažanje neke linije apsorpcijskog ili emisijskog spektra ovisit će o geometriji izvora i snopa teleskopa, prema tome mjerljive varijable povezane su izrazom:

$$T_L = (f_d T_S - f_0 f_C T_C)(1 - e^{-\tau}) \quad (1.9)$$

gdje su f_d i f_C faktori popunjenja snopa oblakom i kontinuiranim izvorom te f_0 faktor koji pokazuje koliki dio kontinuiranog izvora prekriva oblak.

Okretanje spina vrlo je rijedak događaj, prosječno se dogodi jednom u 10 milijuna godina, ali kako u svemiru postoji izuzetno velik broj vodikovih atoma, može se opaziti i mjeriti. Sam svemir pozadinskim zračenjem okreće spin elektrona pa vodici emitiraju liniju 21 cm. Ta linija često se mjeri u radio astronomiji budući da radiovalovi mogu prolaziti kroz oblake međuzvezdane kozmičke prašine koja ne propušta vidljivi dio spektra. Mjerenjem pomaka u frekvenciji za liniju 21 cm, do kojeg dolazi zbog Dopplerovog efekta, može se proučavati gibanje plina u galaksiji te se pomoću nje 50-ih godina pokazala spiralna struktura naše galaksije.

1.3 Zračenje kozmičke prašine

Kozmička prašina je nakupina velikog broja molekula i atoma poput grafita, silikata, željeza, leda, itd. Zrnca prašine reda su veličine μm i čine tek 1 % međuzvezdane

tvori, ali bez obzira na tako mali udio imaju vrlo važnu ulogu u formiranju zvijezda i planeta, raznim kemijskim procesima, grijanju i hlađenju međuzvjezdane tvari te je jedno od glavnih načina istraživanja gustih oblaka. Uvelike pridonose formiranju molekula vodika na način da služe kao katalizatori gdje adsorpcijom atoma vodika omogućuju kemijsko vezanje Van der Waalsovih silama u molekulu, a uz to štiti molekule od UV zračenja koje bi uzrokovalo disocijaciju. Osim vodika, na površini zrna mogu se vezati i drugi atomi te nastati kompleksnije organske molekule čime se dobiva složenija struktura zrna, a to može značajno promijeniti optička svojstva.

Podrijetlo međuzvjezdane prašine još nije potpuno razjašnjeno i potrebna su još brojna istraživanja, ali poznato je da dio zrnaca prašine nastaje u hladnoj, vanjskoj atmosferi crvenih divova i superdivova te u planetarnim maglicama gdje su pogodni uvjeti za kondenzaciju ugljičnih tvari (grafita i amorfno ugljika) i silikata. Pritisak zvjezdanog zračenja zatim izbacuje novonastale čestice u međuzvjezdani prostor. U teoriji se smatra da udarni valovi velikih brzina, nastali eksplozijama supernove, uništavaju zrnca prašine puno brže nego što nastaju i budu izbačena zračenjem zvijezda, zbog čega su nužni drugi izvori kako bi se održala postojeća populacija zrnaca.

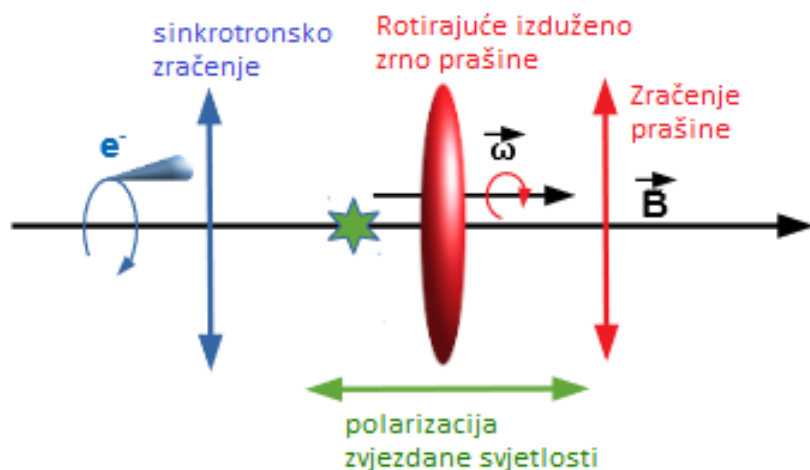
Kozmička prašina prvo je prepoznata zbog svojih učinaka zatamnjenja zbog čega je u početku predstavljala veliku smetnju i prepreku astronomima budući da apsorbira i raspršuje vidljivu svjetlost te je tako onemogućivala izvođenje opažanja optičkim teleskopima, a potreba za ispravljanjem opaženih intenziteta postoji i danas. Pojavom teleskopa osjetljivih na infracrveno i submilimetarsko zračenje omogućeno je istraživanje i tih tamnih dijelova svemira iza kojih su sakrivene zvijezde te fizikalnih i kemijskih svojstva prašine. Međutim, kako infracrveno zračenje ne prolazi kroz Zemljinu atmosferu, promatranja su moguća sa svemirskim teleskopima.

Zrno prašine sastoji se od diskretnih električnih naboja koji pod utjecajem elektromagnetskih valova osciliraju i induciraju dipolne momente. Akcelerirajući naboj u svim smjerovima zrači elektromagnetske valove iste frekvencije kao upadni val i raspršuje sekundarno zračenje u svim smjerovima. Pritom, plava svjetlost raspršuje se više nego crvena, a manje valne duljine kao crveno i infracrveno zračenje mogu biti transmitirane i lako stići do detektora zbog čega se promatranjem nekog izvora svjetlosti iza oblaka prašine uočava da je izvor crveniji nego bi trebao biti - radi se o međuzvjezdanom crvenjenju. Zbog raspršivanja upadni val gubi dio energije, a dio energije se apsorbira na način da pobuđene čestice pretvaraju energiju fotona u to-

plinsku energiju. Kombinacija raspršivanja i apsorpcije poznata je kao „ekstinkcija“ te ona ovisi o veličini, obliku i kemijskom sastavu prašine.

Zrnca kozmičke prašine apsorpiranjem fotona pristiglih sa zvijezda zagrijavaju se na temperature od ~ 15 K koju zatim gube emisijom infracrvenog zračenja. Kada su zagrijana okolnom zvjezdanom svjetlošću pokazuju čitav raspon temperatura, čija širina raste što je radijus zrna manji. Širenje temperatura proizlazi iz diskretnog procesa zagrijavanja gdje se apsorpcijom fotona prenese energija koja, uspoređujući je s toplinskom energijom zrnca prašine, nije neznčajna i uzrokuje konačne skokove u temperaturi, a uzastopnom emisijom infracrvenog zračenja temperatura se kaskadno smanjuje [6]. Termalne emisije omogućile su istraživanje prostorne raspodjele, sastava i fizikalnih svojstava prašine. Daleko infracrveno zračenje iznad $140 \mu\text{m}$ emitirano je uglavnom iz velikih grafitnih i silikatnih zrna čija je temperatura $17 - 20$ K, to jest $15 - 18$ K, dok su zračenja manja od $100 \mu\text{m}$ emitirana s malih zrnaca zagrijanih na više od 20 K.

Način na koji se prašina može detektirati i istraživati su polarimetrijska mjerenja koja se obično koriste u područjima u kojima nije izražen efekt crvenjenja. Zrno prašine ima asimetričan oblik s dužom i kraćom osi te se vrlo brzo rotira oko svoje kraće nastojeći poklopiti os vrtanje paralelno smjeru lokalnog magnetskog polja. Takvo poravnanje zrnaca prašine s magnetskim poljem izaziva polarizaciju zvjezdane svjetlosti paralelno magnetskom polju. S druge strane termalno zračenje prašine polarizirano je okomito na smjer magnetskog polja, a uzrok je također usmjerenost zrnaca s magnetskim poljem. Ukoliko je magnetsko polje koherentno u određenom području neba, zrno prašine usmjerit će dužu os okomito na linije polja i rotirati oko osi vrtanje usmjerene paralelno magnetskom polju. Razlog zbog kojeg se zrnca baš tako poravnaju je taj što fotoni udaranjem u nesimetrično zrno prašine prenose količinu gibanja i uzrokuju zakretni moment koji zrno prašine zarotira oko osi s najvećim momentom inercije. Angularni moment zrnca veže se sa spinovima pojedinih elektrona čime se stvara magnetski moment paralelan angularnom momentu te se na taj način vrtanje usmjeri paralelno magnetskom polju. Stoga, ukupno polarizirano zračenje koje emitira prašina paralelno je dužoj osi zrna, to jest okomito je na magnetsko polje. Shematski prikaz smjera polarizacije zvjezdane svjetlosti i smjera polariziranog zračenja u odnosu na magnetsko polje može se vidjeti na slici 1.4.



Slika 1.4: Shematski prikaz smjera polarizacije sinkrotronskog zračenja, termalnog zračenja prašine i zvjezdane svjetlosti. Preuzeto i prilagođeno prema [13]

1.4 Motivacija za ovaj rad

U Mliječnom putu prostor između zvijezda prožet je međuzvjezdanom tvari koja se sastoji od plina u ioniziranom, atomskom i molekularnom stanju, kozmičke prašine, visokoenergetskih kozmičkih zraka i magnetskog polja. Većinu plina u međuzvjezdanoj tvari čini vodik, od čega je najzastupljeniji neutralan vodik HI koji se istražuje promatranjem poznate emisijske linije valne duljine 21 cm. S druge strane, iako je udio prašine u međuzvjezdanoj tvari vrlo mali i često predstavlja smetnju ili komplikaciju prilikom astronomskih istraživanja, ipak njezina uloga bitna je u mnogim procesima te između ostalog otkriva orijentaciju magnetskog polja, a istražuje se opažanjem polariziranog termalnog zračenja u mikrovalnom području. Za proučavanje ioniziranog stanja plina koriste se polarimetrijska mjerenja sinkrotronskog zračenja koje međudjeluje s ioniziranom materijom.

Zanimljivo je promatrati kako pojedine faze plina međusobno međudjeluju, a nedavna promatranja radioteleskopom LOFAR (LOW Frequency ARray) donijela su zanimljive informacije o difuznoj i magnetiziranoj međuzvjezdanoj tvari i neočekivanoj korelaciji između strukture polariziranog sinkrotronskog zračenja i strukture neutralnog plina što je opisano u radu [7]. Jedan od načina kojima se istraživanja mogu provoditi je opažanjima, a drugi magneto-hidrodinamičkim simulacijama (MHD).

U ovom radu će se upravo pomoću MHD simulacija sudara super-ljuski, koje je provela Ntormousi et. al. 2017. [14] napraviti analiza sintetskih promatranja zračenja vodika i prašine te polariziranog sinkrotronskog zračenja. Istraživanje je

usmjereno na kvantitativnu analizu filamentarnih struktura neutralnog vodika i linearnih struktura depolarizacijskih kanala sinkrotronskog zračenja dobivenih iz simuliranih emisija. Također će se odrediti njihova relativna distribucija te usporediti sa smjerom magnetskog polja dobivenog iz simuliranog zračenja zrnaca prašine.

2 Podaci i simulacije

U astronomiji se za pohranu, prijenos i obradu pravilno raspoređenih nizova podataka koristi digitalni format datoteke FITS (eng. *Flexible Image Transport System*). Nizovi mogu biti 1D spektri, 2D slike ili podatkovne kocke s 3 ili više dimenzija. Takav format datoteke omogućuje pohranu velike količine astronomskih podataka dobivenih raznim mjerenjima, opažanjima i simulacijama, koja se zatim mogu dalje proučavati, analizirati i oblikovati. Zračenje se uglavnom iskazuje Stokesovim parametrima I , Q , U , V , od čega I predstavlja ukupan intenzitet, Q i U mjere linearno polarizirano zračenje, a V kružno polarizirano zračenje. U ovom radu koristit će se različita sintetska promatranja zračenja, dobivena na temelju magneto-hidrodinamičkih simulacija te zapisana u FITS datotekama.

2.1 Magneto-hidrodinamička simulacija

Magneto-hidrodinamičke (MHD) simulacije proučavaju međudjelovanje između magnetskog polja i međuzvjezdanog plina na temelju jednadžbi koje opisuju fluid i Maxwellovih jednadžbi. U ovom radu koristi se magneto-hidrodinamička simulacija sudara super-ljuski, preuzeta iz rada [14].

Udarni valovi formirani grupiranom povratnom spregom mladih OB zvijezda važan su izvor mehaničke energije za međuzvjezdanu tvar i povod za formiranje molekularnih oblaka. Superljuske su udari velikih razmjera s radijusima većim od stotinu parseka, važni su pokretači međuzvjezdanih turbulencija, a obično se formiraju oko mladih zvijezda budući da one otpuštaju silovita zračenja. Izrađen je trodimenzionalni model dvije superljuske koje se sudaraju, koristeći magneto-hidrodinamički kod RAMSES. Superljuske su napravljene termalnom i kinetičkom povratnom spregom slabo vezanih grupa 30 OB zvijezda, na način da su sferna područja povratne sprege postavljena duž z-osi na suprotne strane promatranog prostora širine 200 pc. Prostor je početno ispunjen turbulentnom difuznom tvari, srednje gustoće $n_H = 1 \text{ cm}^{-3}$ i srednje temperature 8000 K. Inverznim Fourierovim transformatom četiri valna broja k dobivene su tri komponente brzine, koje su nametnute na prostor s početnom homogenom gustoćom i uniformnim magnetskim poljem, jakosti $5 \mu\text{G}$, u smjeru ili okomitom ili paralelnom osi sudara te se nakon nekog vremena razvila turbulencija. Simulirane su kocke dimenzije $200 \text{ pc} \times 200 \text{ pc} \times 200 \text{ pc}$ i uniformne

rezolucije na 512^3 točaka rešetke. U oba slučaja prosječno vrijeme evolucije simulacije je 6,5 Myr, a u tom vremenu smatra se da utjecaj gravitacije na dinamiku nije značajan zbog čega nije uključena samo-gravitacija.

2.2 Sintetska promatranja

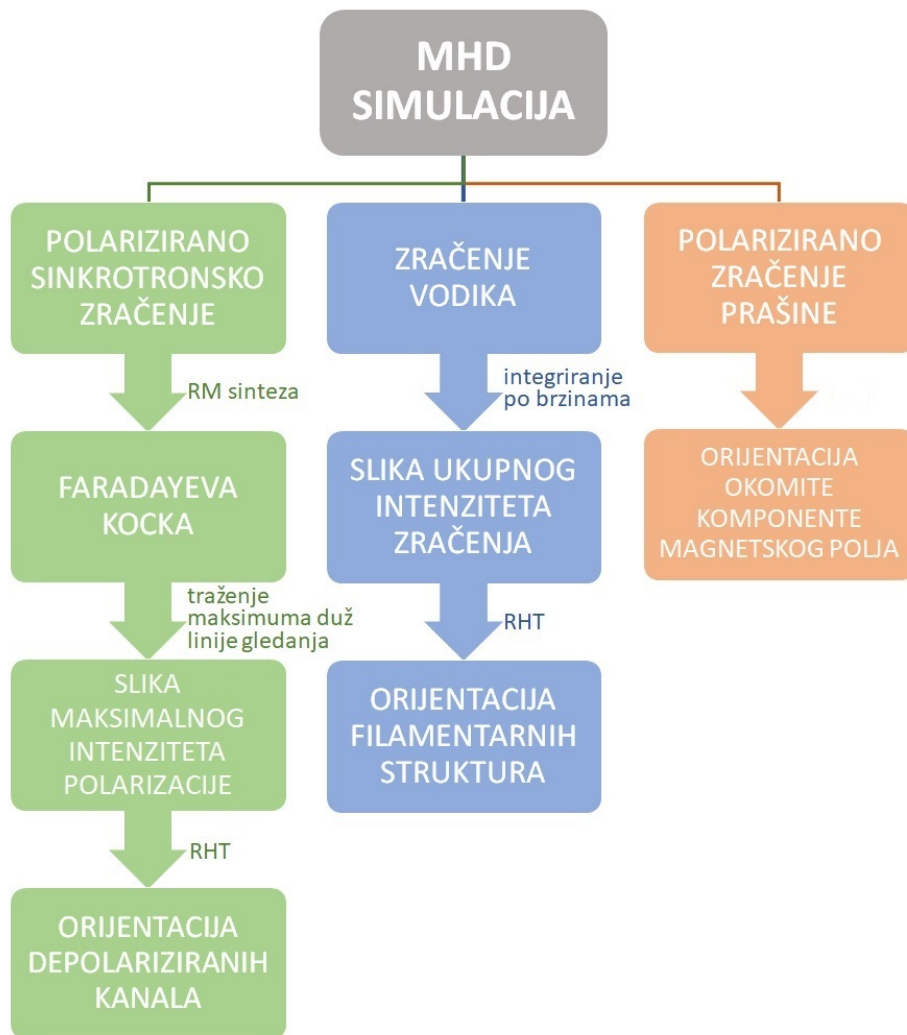
Na temelju opisanih simulacija, Bracco et. al 2022. [7] napravio je različite vrste sintetskih promatranja koje su također korištene i u ovom radu. One sadrže podatke o polariziranom sinkrotronskom zračenju na frekvencijama radioteleskopa LOFAR (115 – 183 MHz), zračenje atoma vodika dano za radijalne brzine od -40 km/s do $+40$ km/s te zračenje prašine na frekvenciji 353 GHz.

Sintetska promatranja polariziranog sinkrotronskog zračenja zapisana su u FITS datotekama kao Q i U kocke u ovisnosti o frekvenciji. Njihova dimenzija je $512 \times 512 \times 308$, gdje je 512 veličina slike čije su osi rektascenzija i deklinacija, a 308 je broj frekvencija od čega je prva 115 MHz, a zadnja 183 MHz. Podaci o zračenju atoma vodika zapisana su kao I kocka dimenzija $512 \times 512 \times 256$, a podaci o polariziranom zračenju prašine kao Stokes Q i U mape s dimenzijama 512×512 .

Na temelju dobivenih podataka provedena je analiza shematski prikazana na slici 2.1. Prvi korak u analizi dobivenih podataka za sinkrotronsko zračenje je napraviti Faradayevu tomografiju koja će sintetska opažanja polarimetrijskih mjerenja raspeljati po Faradayevim dubinama. Provodi se RM sintezom, a rezultat sinteze su Faradayevi spektri, to jest promijene intenziteta polarizacije kao funkcije Faradayeve dubine te su podaci zapisani kao Faradayeva kocka. Dobivena kocka ima dimenzije $512 \times 512 \times 201$, ali više ne ovisi o frekvenciji, nego o Faradayevoj dubini ϕ s rasponom od -25 rad m^{-2} do $+25$ rad m^{-2} zapisanih u koracima od $0,25$ rad m^{-2} . Zatim se iz Faradayeve kocke traže maksimalni intenziteti polarizacije duž Faradayeve dubine, a na dobivenoj slici maksimalnog intenziteta provodi se RHT analiza koja detektira i odredi smjer orijentacije depolariziranih kanala. Dobiveni podaci o zračenju atoma vodika sumiraju se po svim brzinama u rasponu od -40 km/s do $+40$ km/s, a rezultat je slika ukupnog intenziteta zračenja na kojoj je također provodi RHT analiza. Na taj način odredi se orijentacija filamentarnih struktura vodika i uspoređi se s dobivenom orijentacijom depolariziranih kanala. Zrnca prašine mapiraju samo smjer magnetskog polja pa se iz Q i U slika može odrediti kut pomoću izraza

$$\theta = 0.5 \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (2.1)$$

Na temelju toga može se odrediti orijentacija okomite komponente magnetskog polja i konačno provjeriti slijede li orijentacije dobivenih struktura smjer magnetskog polja.



Slika 2.1: Shematski prikaz postupka i metoda kojima se provode sintetska promatranja polariziranog sinkrotronskog zračenja, zračenja vodika i polariziranog zračenja prašine na temelju podataka dobivenih iz MHD simulacije

3 Metodologija

3.1 RM sinteza

Radio zračenje prolaskom kroz difuznu ioniziranu tvar podliježe Faradayevoj rotaciji za određeni kut. Promatranjem linearno polariziranog zračenja može se opaziti Faradayeva rotacija i pomoću toga proučiti svojstva međuzvezdane tvari. Mjera Faradayeve rotacije je Faradayeva dubina, koja se može odrediti pomoću izraza 1.3 u granicama od izvora do opažača. U slučaju pozitivne Faradayeve dubine prosječno magnetsko polje, koje osjeća to zračenje, usmjereno je prema promatraču, dok je za negativnu Faradayevu dubinu u suprotnom smjeru. Budući da kut polarizacije sinkrotronskog zračenja može biti rotiran duž doglednice za različite iznose, tumačenje opažanja je komplicirano. Ipak, rješenje je Faradayeva tomografija koja uzima polarimetrijska mjerenja i razlaže ih prema količini Faradayeve rotacije. Faradayeva tomografija mapira 3D relativnu distribuciju ionizirane tvari prema Faradayevoj dubini.

Metoda kojom se primljeno zračenje razlaže po Faradayevim dubinama naziva se RM sinteza. To je standardna metoda za obradu podataka radiopolarimetrijskih mjerenja pomoću koje se spektar linearne polarizacije prevodi u funkciju Faradayeve disperzije, to jest u raspodijelu intenziteta polarizacije kao funkcije Faradayeve dubine. Provodi se pomoću Python koda *rm-synthesis*¹ za koji su potrebni Q i U FITS datoteke. U RM sintezi ulazni podaci su dvije 3D kocke (Q i U kocke opisane u poglavlju 2.2) i lista vrijednosti pripadajućih frekvencija koje su u ovom slučaju u rasponu od 115 MHz do 183 MHz. Stokes Q i U parametri kao funkcije frekvencije sadrže niz vrijednosti koje opisuju sinkrotronsku emisiju, a provođenjem RM sinteze na njih dobivaju se podatkovne kocke koje na izlazu sadrže podatke o Faradayevoj dubini i RMSF (eng. *Rotation Measure Spread Function*).

Pomoću Stokesovih parametara također se može izvesti intenzitet polarizacije: $PI = \sqrt{Q^2 + U^2}$. RM sinteza bazira se na činjenici da se kompleksan intenzitet polarizacije može izračunati kao Fourierov transformat Faradayeve disperzijske funkcije $F(\phi)$ u Faradayevom prostoru s koordinatom ϕ koja predstavlja Faradayevu dubinu što se može zapisati kao [11]:

¹<https://github.com/brentjens/rm-synthesis>

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\phi) e^{2i\phi\lambda^2} d\phi \quad (3.1)$$

Mjerna jedinica kompleksnog intenziteta polarizacije je J_y , a Faradayeve disperzijske funkcije $J_y/(\text{rad m}^{-2})$. Invertiranjem Fourierovog transformata mogao bi se dobiti ukupan intenzitet svih struktura na dubini ϕ , $F(\phi)$, međutim, P ima fizikalnog smisla samo za $\lambda^2 \geq 0$ pa je kod tog postupka potrebno napraviti određene pretpostavke vrijednosti P na valnim duljinama $\lambda^2 < 0$. Kako se u praksi koristi samo određeni interval valnih duljina, izraz 3.1 može se generalizirati uvođenjem težinske funkcije $W(\lambda^2)$, koja je različita od nule za sve mjerene valne duljine, dok je za ostale vrijednosti jednaka nuli te u tom slučaju će mjerena polarizacija biti:

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

Uz takva ograničenja može se rekonstruirati funkcija Faradayeve disperzije (tj. Faradayev spektar) ovisna o mjenom intenzitetu polarizacije:

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

Dobiva se RM sintezom kao konvolucija (označeno sa \star) "prave" Faradayeve disperzijske funkcije i $R(\lambda)$. Funkcija $R(\lambda)$ je Fourierov transformat težinske funkcije W , normiran na jedinicu za $\phi = 0$, a obično se naziva RMSF funkcija i definira se kao:

$$R(\phi) = K \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) e^{-2i\phi(\lambda^2 - \lambda_0^2)} d\lambda^2 \quad (3.4)$$

gdje je K normalizacijska konstanta definirana kao:

$$K = \left(\int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) d\lambda \right)^{-1} \quad (3.5)$$

RMSF je obično funkcija kompleksnih vrijednosti što znači da se dobivena Faradayeva disperzijska funkcija razlikuje od prave ne samo po amplitudi, već i po fazi, a budući da RMSF nije δ funkcija, ima konačnu širinu središnjeg maksimuma, to jest FWHM (eng. *Full Width at Half Maximum*), i sporedne maksimume.

Efikasnost RM sinteze ovisi o rasponu valnih duljina koje se opažaju te postoje tri glavna parametra koji ograničavaju metodu RM sinteze: spektralna rezolucija $\delta\lambda$, širina spektralnog pojasa $\Delta\lambda$ i minimum λ_{min} . Navedeni parametri direktno su povezani s fizikalnim veličinama u prostoru Faradayeve dubine, a one se mogu odrediti iz

same RMSF funkcije: $\delta\phi$ ili FWHM koji kvantificira rezoluciju u Faradayevom prostoru, $\Delta\phi$ - maksimalna širina strukture koja se može razlučiti i ϕ_{max} - maksimalna Faradayeva dubina koja se može detektirati, a redom su definirane:

$$\delta\phi = \frac{2\sqrt{3}}{\Delta\lambda^2}, \quad \Delta\phi_{max} \approx \frac{\pi}{\lambda_{min}^2}, \quad |\phi_{max}| \approx \frac{\sqrt{3}}{\delta\lambda^2} \quad (3.6)$$

Duž doglednice može postojati mnogo različitih izvora zračenja, a ti izvori mogu biti optički debeli ($\lambda^2\Delta\phi \gg 1$) ili tanki ($\lambda^2\Delta\phi \ll 1$) u Faradayevoj dubini. To znači da valna duljina određuje hoće li izvor biti dovoljno tanak te prema tome koja je najveća struktura koja se može razlučiti.

3.2 *Rolling Hough Transform*

Atom vodika koji se nalazi relativno visoko, izvan galaktičke ravnine, ima vlaknastu strukturu, to jest veliki omjer duljine i širine čini ga vrlo tankim i izduženim. Obično se može pronaći u grupama gdje su međusobno paralelno orijentirani, a za takvu izduženu, linearnu strukturu zaslužno je magnetsko polje koje određuje strukturu difuzne međuzvezdane tvari. Kvantitativna analiza linearnih struktura provodi se Rolling Hough Transform (RHT) algoritmom, a prva primjena algoritma u astronomiji poslužila je upravo za detekciju HI vlakana i njihovu korelaciju sa smjerom magnetskog polja [16]. RHT identificira vlakna na način da kvantificira svaki piksel u odnosu na okolinu i zatim kodira vjerojatnost da je bilo koji piksel slike dio koherentne linearne strukture, a uz to ne ovisi o sjaju promatranog područja. U ovom radu RHT algoritam koristit će se za opisivanje orijentacije depolariziranih kanala sinkrotronskog zračenja i za određivanje orijentacije HI vlakana, kao što je napravljeno u [16] i [17], te će se dobivene orijentacije međusobno usporediti.

RHT algoritam zapravo je modifikacija Hough Transform (HT) algoritma koji se koristi za detekciju linija i ravnih struktura u 2D slikama. Funkcionira na način da se na slici promatra pravac. Svaka točka pravca ima odgovarajuću liniju u parametarskom prostoru, a uzimanjem beskonačno točaka s istog pravca daje beskonačno pravaca u parametarskom prostoru te se oni svi sijeku u jednoj točki čiji parametri opisuju nagib i odsječak pravca u prostoru slike. Za kompleksnije oblike jednostavnije je koristiti parametrizaciju:

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \quad (3.7)$$

gdje je ρ najmanja udaljenost od ishodišta, a θ nagib. Cilj HT algoritma je za svaki piksel (x,y) odrediti parametre (ρ, θ) provlačenjem svih linija kroz taj piksel iz čega se dobije akumulacijski niz parametara (ρ, θ) , a kada se dobije veliki broj istih parametara izvuku se njihove najvjerojatnije linije.

RHT radi na sličan način, osim što se slika mapira na svakom pikselu (x, y) preko kružne domene dijametra D_W . Kao i kod HT, prvo se slika zagladi „top-hat“ funkcijom dijametra D_K čime se dobivaju oštre strukture, a budući da slika treba biti binarna, kreira se „bit-mask“ gdje samo oštra struktura ima vrijednost 1. Zatim se uzme dijametar D_W oko svake točke slike i izvodi se HT limitiran na $\rho = 0$. Na izlazu se dobiva funkcija intenziteta $R(\theta, x, y)$ koja za svaki piksel (x, y) daje distribuciju ravnih struktura u ovisnosti o kutu θ , a postavljanjem parametra Z selektiraju se koherentne linije i ostaju samo strukture većeg značaja.

Orijentacija linearne strukture određena RHT metodom može se kvantificirati pomoću izraza definiranog u [16]:

$$\tilde{R}(\theta) = \frac{1}{\mathcal{N}} \int \int R(\theta, x, y) dx dy \quad (3.8)$$

gdje su granice integrala definirane po cijelom prostoru slike, a \mathcal{N} je faktor normalizacije s kutom θ u domeni $\theta \in \langle -\pi/2, \pi/2 \rangle$. Za vizualizaciju detektiranih linearnih struktura potrebno je izlazni intenzitet integrirati preko kuta θ :

$$R(x, y) = \int R(\theta, x, y) d\theta \quad (3.9)$$

Rezultat se može također vizualizirati i pomoću polukružnog histograma kutne raspodjele u domeni $\theta \in \langle -\pi, \pi \rangle$, gdje je ravnina Galaksije poravnata s 0, a okomito poravnanje je na $\pm\pi/2$. Zbrajanjem vektora duljine $\tilde{R}^2 d\theta$ na cijelom intervalu dobiva se ukupan vektor S :

$$S = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}^2(\theta) e^{2i\theta} d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}^2(\theta) d\theta} \quad (3.10)$$

Smjer i iznos vektora S daju srednju vrijednost kuta:

$$\langle \theta \rangle = \frac{1}{2} \text{Arg}(S) = \frac{1}{2} \arctan2(\text{Im}(S), \text{Re}(S)) \quad (3.11)$$

i širinu distribucije:

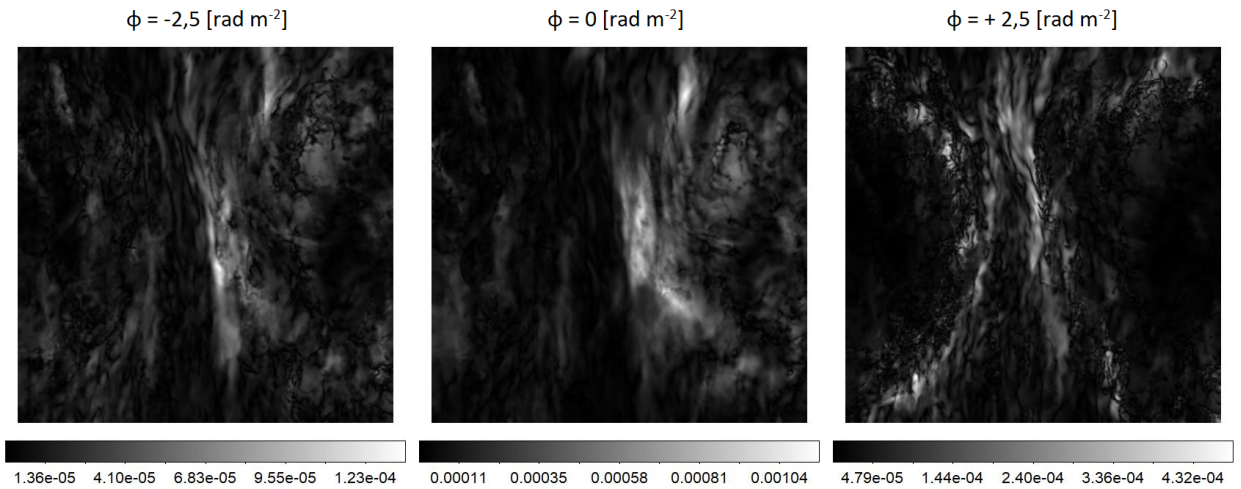
$$\delta\theta = \frac{1}{2} \sqrt{\ln \left(\frac{1}{|S|^2} \right)}. \quad (3.12)$$

Koriste se tri bitna parametra, dijametar zaglađivanja D_K , dijametar D_W koji zadaje domenu u kojoj se provodi RHT i prag vjerojatnosti Z koji određuje najmanji broj piksela u određenom θ smjeru potreban da bi se razmatrali kao dio linearne strukture. U radu [17] pokazano je da, budući da najdulji depolarizacijski kanali dominiraju ukupnom distribucijom, različite kombinacije ulaznih parametara daju vrlo slične rezultate za orijentaciju glavnih linearnih depolarizacijskih kanala.

4 Rezultati

4.1 Rezultati RM sinteze

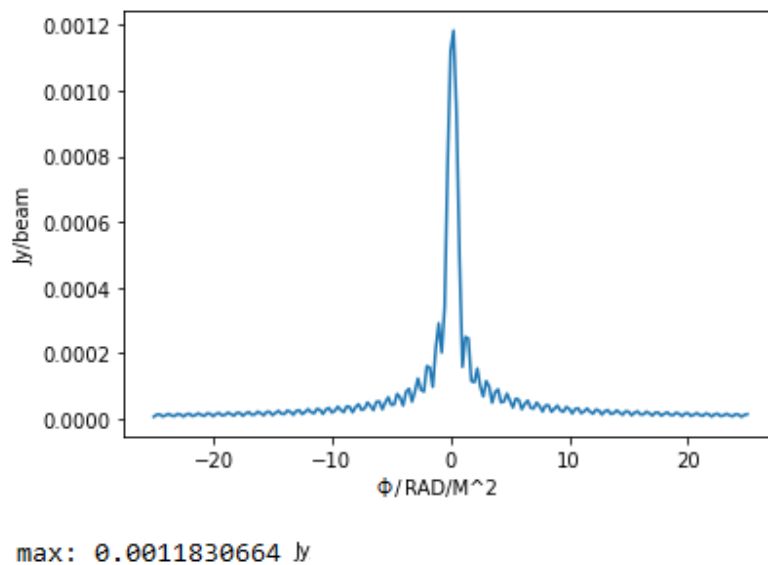
Provođenjem RM sinteze dobivena je kocka ukupne linearne polarizacije opisana u poglavlju 2.2. Ona sadrži 201 sliku na kojima je prikazan intenzitet polarizacije za različite Faradayeve dubine u rasponu od -25 rad m^{-2} do 25 rad m^{-2} . Na slici 4.1 mogu se vidjeti tri takve slike za različito odabrane Faradayeve dubine.



Slika 4.1: Sintetska promatranja Faradayeve tomografije: slike prikazuju mapu polariziranog intenziteta (u jedinicama $\text{Jy PSF}^{-1}\text{RMSF}^{-1}$) na Faradayevim dubinama $\phi = -2,5 \text{ rad m}^{-2}$, $\phi = 0,0 \text{ rad m}^{-2}$ i $\phi = +2,5 \text{ rad m}^{-2}$

Za svaki piksel slike mogu se učitati podaci duž Faradayeve dubine i tako dobiti Faradayev spektar, to jest intenzitet polarizacije prikazan kao funkcija Faradayeve dubine. Primjer jedne takve funkcije može se vidjeti na slici 4.2. Radi naglašavanja najistaknutijih značajki promatrane emisije iz dobivene RM kocke, određen je maksimalan intenzitet za svaki piksel i zabilježene su njihove dobivene vrijednosti maksimuma te je pronađeno na kojoj se Faradayevoj dubini nalazi odgovarajući maksimum. Na taj način konstruirana je slika maksimalnog intenziteta i slika položaja tog intenziteta što se može vidjeti na slici 4.3. Područja visokog intenziteta polariziranog zračenja pokazuju nejednoličnu i filamentarnu strukturu koja nalikuju uskim, linearnim depolariziranim kanalima vidljivima u stvarnim opažanjima [18]. Takva prividna sličnost sa stvarnim podacima vrlo je zanimljiva. Sljedeći korak je provesti RHT analizu na

dobivenu sliku maksimalnog intenziteta kako bi se odredila orijentacija dobivenih depolariziranih kanala.



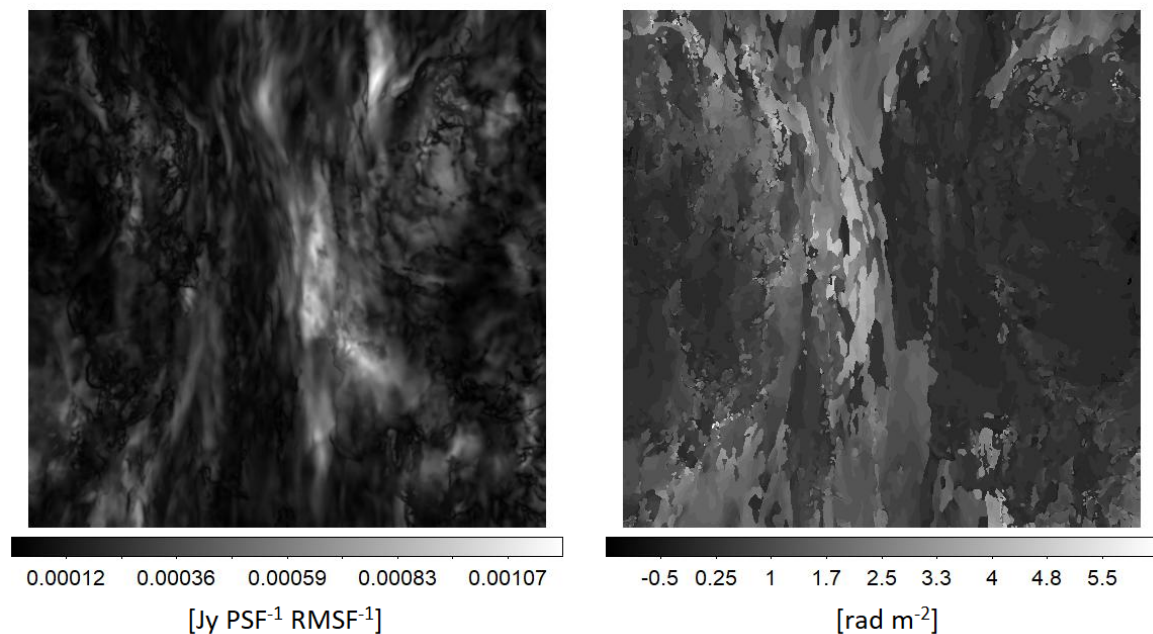
Slika 4.2: Graf intenziteta polarizacije kao funkcija Faradayeve dubine. Primjer je prikazan za najveću vrijednost maksimalnog intenziteta, zapisanu ispod grafa.

4.2 RHT analiza sinkrotronskog zračenja

Za RHT analizu koristio se dostupan kod², a provodio se na slici maksimalnog intenziteta polarizacije. RHT analiza također je istražena izmjenom ulaznih parametara D_K , D_W i Z , a dobivene RHT projekcije prikazane su na slici 4.4. Rezultati RHT analize su zatim vizualizirani polukružnim histogramima pomoću kojih su prikazane distribucije i kvantificirane relativne orijentacije ravnih depolariziranih kanala u odnosu na smjer sjevera slike. Usporedba dobivenih rezultata može se vidjeti na slici 4.4 gdje se ispod svake RHT projekcije nalazi pripadajući histogram i zapis izračunate srednje vrijednosti kuta. Sjever slike odgovara $\theta = 0^\circ$ na histogramu, a crvene linije označavaju srednju vrijednost izraženih orijentacija unutar distribucije.

Sada se može i primijetiti da se za različite parove ulaznih parametara dobivaju vrlo slični rezultati srednjih vrijednosti orijentacija. Ono što se promijeni je širina raspodjele budući da, ako se uzme veći parametar D_K , tada se analiza provodi na većem području s više piksela koji nisu nužno dio depolarizacijskih kanala i ako se

²<https://github.com/seclark/RHT>



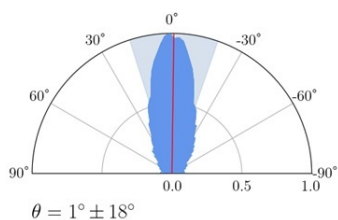
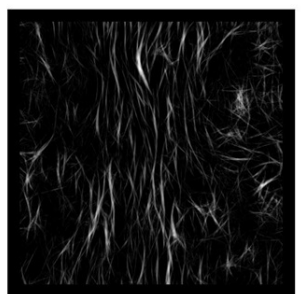
Slika 4.3: Slika lijevo: u svakom pikselu prikazan je maksimum polariziranog intenziteta tog piksela u prostoru Faradayevih dubina. Slika desno: prikaz položaja piksela s maksimalnim intenzitetom.

uzme manji prozor D_W , definiraju se manje duljine linernih struktura pa se time pronalaze i one strukture koje su samo dio šuma ili su manje dominantne. Također se primijećuje da je za veći prag Z dobivena diskretnija raspodjela, a razlog tome je što se postavi viša granica broja piksela koji za svaki smjer θ trebaju sadržavati signal kako bi se taj smjer uzeo u obzir što znači da će prag proći samo smjer s dovoljno visokim RHT intenzitetom. Iako dolazi do širenja ukupne raspodjele, srednja vrijednost $\langle\theta\rangle$ orijentacija ne promijeni se značajno za različit odabir ulaznih parametara.

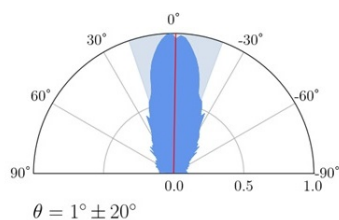
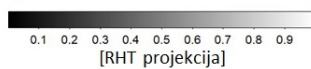
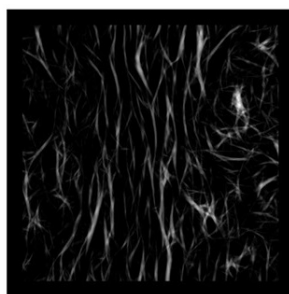
U slučaju kada je odabran radijus prozora $D_W = 41'$, dobivene su jednake srednje vrijednosti kuta $\langle\theta\rangle = 1^\circ$ i širine distribucije $\delta\theta = \pm 18^\circ, \pm 20^\circ$ i $\pm 14^\circ$, dok je za parametar $D_W = 81'$ srednja vrijednost kuta za parametar $D_K = 8'$ jednaka $\langle\theta\rangle = 0^\circ$ i širine distribucija su $\delta\theta = \pm 9^\circ$ i 12° , a za $D_K = 2'$, $\langle\theta\rangle = 1^\circ$ i $\delta\theta = 11^\circ$. Te su vrijednosti vrlo slične i može se reći da su orijentacije depolariziranih kanala sinkrotronskog zračenja usmjerene prema sjeveru slike.

$$D_w = 41'$$

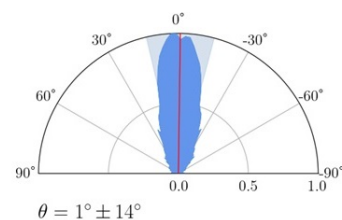
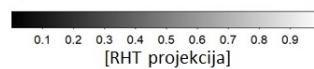
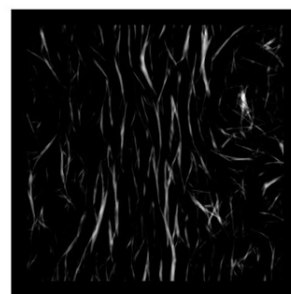
$$D_K = 2', Z = 0.7$$



$$D_K = 8', Z = 0.7$$

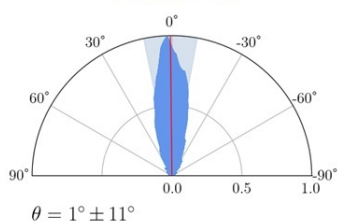
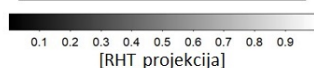
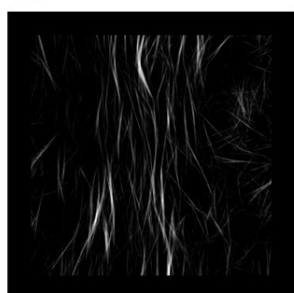


$$D_K = 8, Z = 0.8$$

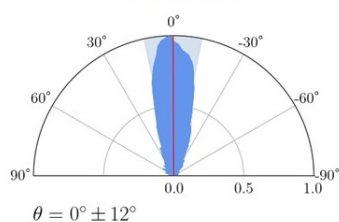
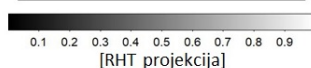
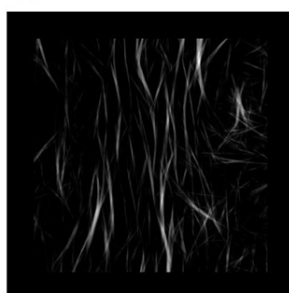


$$D_w = 81'$$

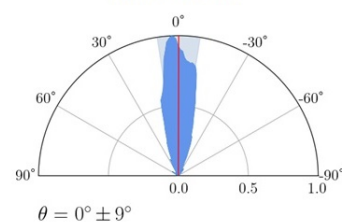
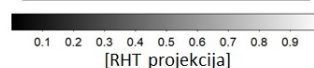
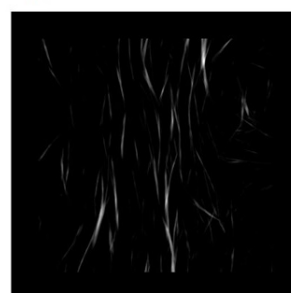
$$D_K = 2', Z = 0.7$$



$$D_K = 8', Z = 0.7$$



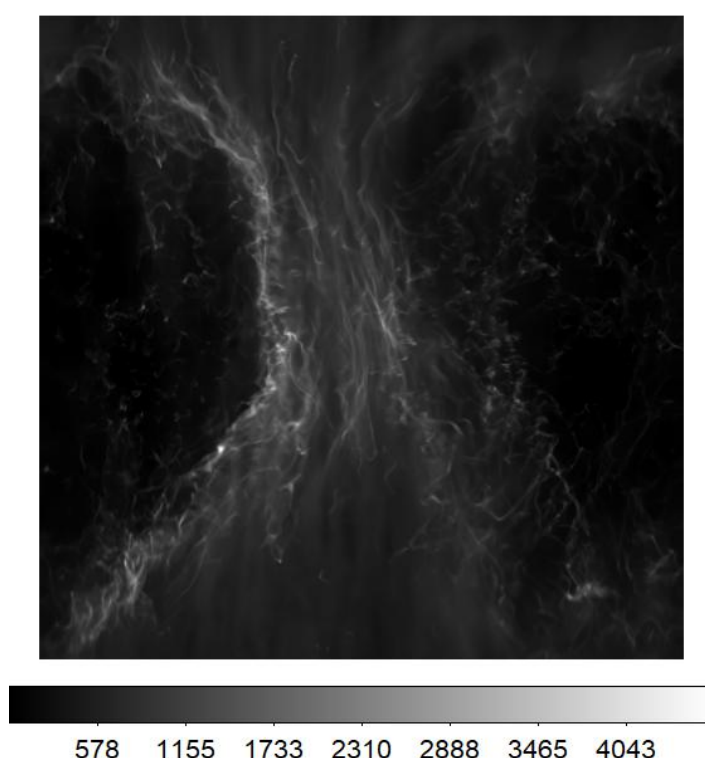
$$D_K = 8, Z = 0.8$$



Slika 4.4: Prikaz slika dobivenih RHT analizom na kojima se jasno mogu vidjeti linearne strukture depolariziranih kanala simuliranog sinkrotronskog zračenja. Ispod svake RHT projekcije prikazan je odgovarajući histogram raspodjele i srednje vrijednosti orijentacije depolariziranih kanala za različite ulazne parametre.

4.3 Rezultati HI kocke

Iz MHD simulacije izračunato je zračenje neutralnog vodika te je dobivena kocka HI iz koje se sumiranjem po svim brzinama u rasponu od -40 km/s do 40 km/s dobila slika ukupnog intenziteta zračenja, to jest slika temperature sjaja, prikazana na slici 4.5. Na visokim galaktičkim širinama neutralan vodik organiziran je u veće grupe međusobno paralelnih tankih, izduženih struktura. Takvi uzorci uskih filamentarnih struktura (ili vlakna) mogu se primijetiti na slici 4.5. Sljedeći korak je detektirati i izračunati linearnost i prostornu koherentnost HI struktura.

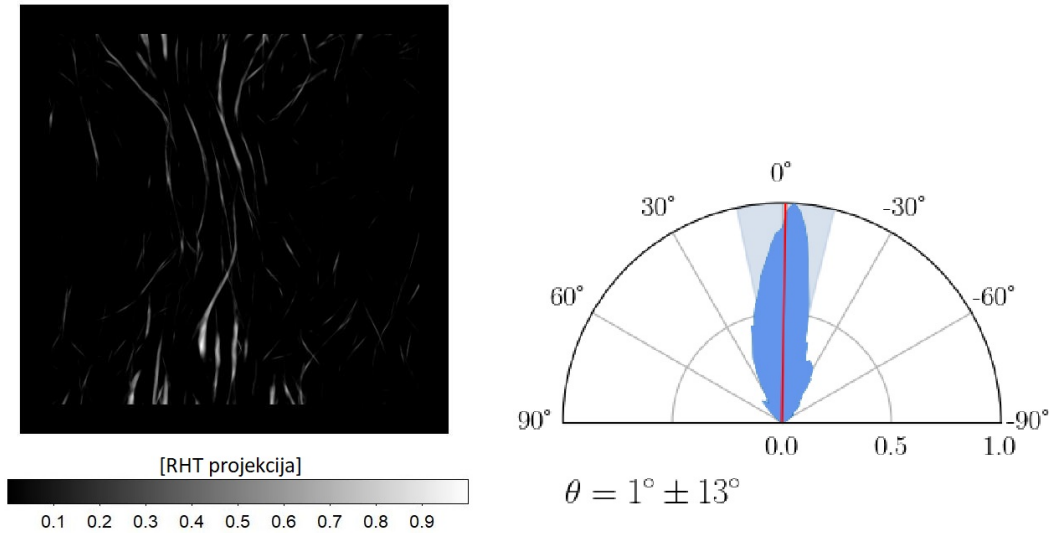


Slika 4.5: Slika ukupnog intenziteta zračenja neutralnog vodika dobivena sumiranjem HI kocke po svim brzinama.

4.4 RHT analiza HI filamentarne strukture

Kao i prethodno, za određivanje orijentacije korištena je metoda RHT analize, provedena na slici ukupnog intenziteta zračenja. Budući da je već ranije pokazano kako odabir parametara daje vrlo slične rezultate, ovdje su odabrane samo jedne vrijednosti ulaznih parametara: $D_W = 51'$, $D_K = 10'$ i $Z = 0,8$. Rezultat RHT analize prikazan je na slici 4.6 gdje se može vidjeti RHT projekcija (slika lijevo) i relativna

orijentacija (slika desno) filamentarnih struktura HI. Smjer sjevera i ovdje se poklapa s $\theta = 0^\circ$, a crvena linija pokazuje srednju vrijednost orijentacije koja u ovom slučaju iznosi $\langle \theta \rangle = 1^\circ$. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se također i smjer HI vlakana ugrubo poklapa sa smjerom sjevera slike.



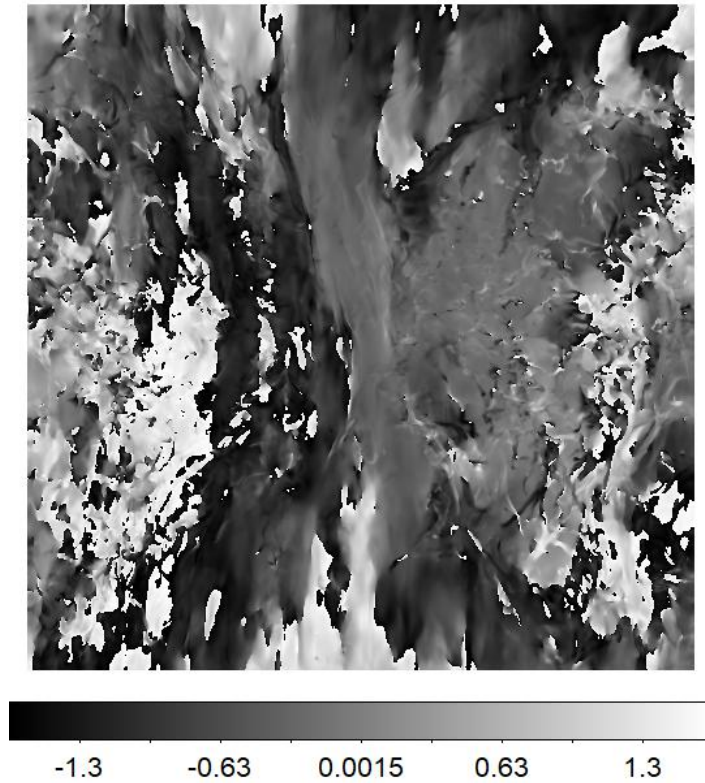
Slika 4.6: Prikaz rezultata dobivenih RHT analizom za ulazne parametre $D_W = 51'$, $D_K = 10'$ i $Z = 0,8$. Na lijevoj slici može se vidjeti RHT projekcija koja iscrtava linearnu strukturu, a na desnoj slici polukružni histogram raspodjele i srednje vrijednosti orijentacije HI filamenata.

4.5 RHT analiza polariziranog zračenja prašine

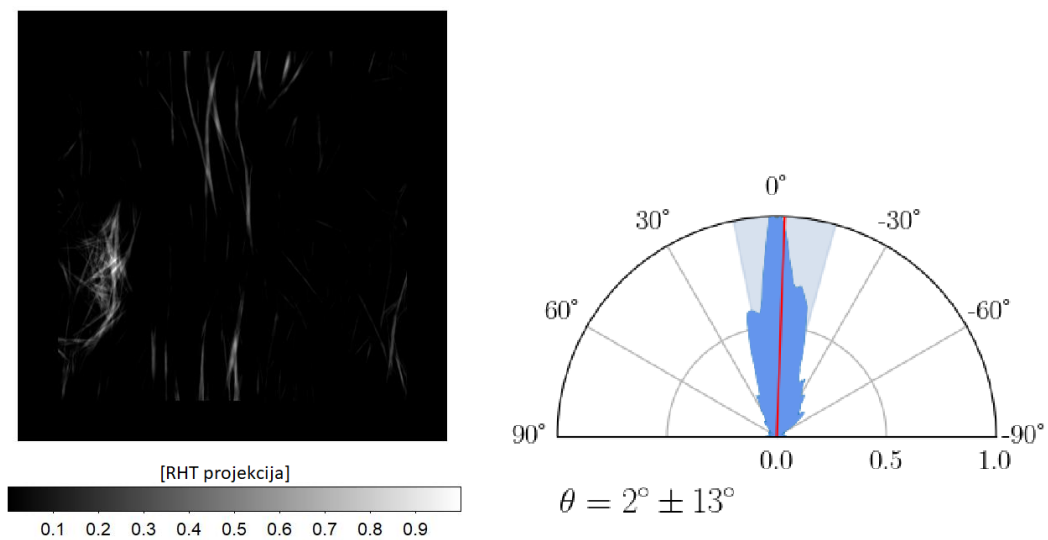
Iz MHD simulacija dobivene su Stokes Q i U koeficijenti iz kojih se odredio kut pomoću izraza 2.1 i na temelju toga napravljena je slika intenziteta polariziranog zračenja prašine, prikazana na slici 4.7. Ponovio se isti postupak gdje se RHT analizom odredila orijentacija polariziranog zračenja prašine koja mjeri smjer magnetskog polja. Na slici 4.8 može se vidjeti dobivena RHT projekcija i polukružni histogram relativne orijentacije magnetskog polja, a izmjeren je kut $\langle \theta \rangle = 2^\circ$ i širina raspodjele $\delta\theta = 13^\circ$ što se ponovo relativno dobro poklapa sa smjerom sjevera slike.

4.6 Usporedba rezultata

Konačno, iz mjerenja može se opaziti da se dobiveni rezultati orijentacije HI vlakana, orijentacije ravnih depolariziranih kanala simuliranog sinkrotronskog zračenja i ori-

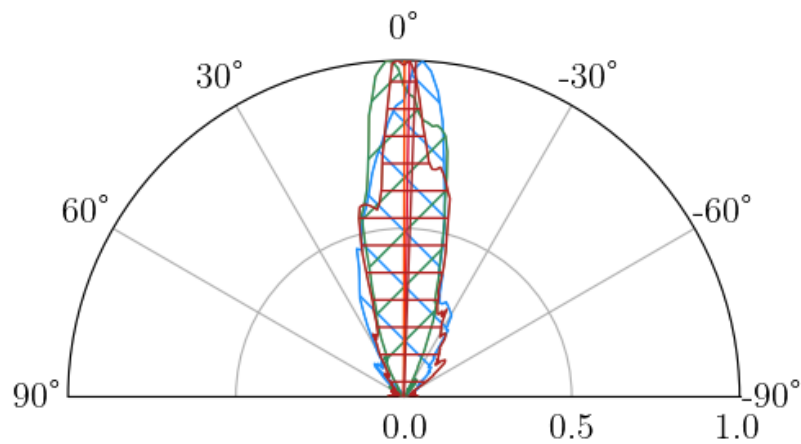


Slika 4.7: Slika intenziteta polariziranog zračenja prašine koja mapira samo smjer magnetskog polja.



Slika 4.8: Prikaz rezultata dobivenih RHT analizom za ulazne parametre $D_W = 81'$, $D_K = 8'$ i $Z = 0,8$. Na lijevoj slici može se vidjeti RHT projekcija, a na desnoj slici raspodjela i srednja vrijednost orijentacije magnetskog polja u odnosu na smjer sjevera slike (0°).

jentacije magnetskog polja međusobno vrlo dobro slažu te da su usmjereni prema sjeveru slike. Na slici 4.9 mogu se i vizualno usporediti dobiveni rezultati pojedinih smjerova. U radovima [18] i [17], gdje su promatranja provedena na stvarnim polariometrijskim podacima teleskopa LOFAR, objašnjeno je da se komponenta magnetskog polja koja prati spiralni krak Mliječnog puta nalazi okomito na liniju gledanja koja je u tom slučaju usmjerena prema polju 3C 196. Tamo su upravo u tom smjeru, to jest paralelno ravnini neba, a time i magnetskog polja, usmjerene orijentacije HI filamenata i ravnih depolariziranih kanala. U ovim sintetskim promatranjima također su dobivene (približno) jednake orijentacije za sve tri strukture.



Slika 4.9: Usporedba orijentacija ravnih depolariziranih kanala prikazanih plavom bojom (ulazni parametri: $D_W = 81'$, $D_K = 8'$ i $Z = 0,8$, HI filamenata prikazanih zelenom bojom (ulazni parametri: $D_W = 51'$, $D_K = 10'$ i $Z = 0,8$) i komponente magnetskog polja u smjeru ravnine neba prikazane crvenom bojom (ulazni parametri: $D_W = 81'$, $D_K = 8'$ i $Z = 0,8$).

5 Zaključak

U ovom radu korištena su sintetska promatranja sinkrotronskog zračenja, zračenja vodika i zračenja prašine u Mliječnom putu. Temelj sintetskih promatranja bile su magneto-hidrodinamičke simulacije sudara super-ljusaka proizvedenih povratnom spregom zvijezda [14]. Cilj rada bio je provesti analizu sintetskih promatranja zračenja i provjeriti poklapaju li se međusobno orijentacije različitih promatranih struktura i da li slijede smjer magnetskog polja.

Sinkrotronsko zračenje, koje nastaje međudjelovanjem kozmičkih zraka i magnetskog polja, linearno je polarizirano. Propagiranjem kroz magneto-ioniziranu tvar kut polarizacije zakreće se pod utjecajem Faradayeve rotacije zbog čega se gubi koherentnost struktura polariziranog zračenja i dolazi do depolarizacije. Za proučavanje takvih složenih opažanja na Stokes Q i U kocke, dobivene iz MHD simulacija, provedena je RM sinteza koja raspetljava zračenje prema Faradayevim dubinama. Važnu ulogu u interpretaciji RM opažanja ima odabir MHD simulacije i osi linije gledanja po kojoj se integrira [7]. U ovom slučaju odabrana je specifično MHD simulacija sudara super-ljusaka proizvedenih povratnom spregom zvijezda [14], a os po kojoj je provedeno integriranje je u y smjeru.

Iako robusna, korištena je metoda RHT analize kojom se mogu identificirati i kvantificirati linearne strukture. RHT analiza primijenjena je na sliku koja prikazuje najviše vrhove intenziteta polarizacije u Faradayevom spektru. Za provođenje i proučavanje RHT analize odabrano je nekoliko različitih vrijednosti parametara D_W , D_K i Z , a dobivene RHT projekcije zatim su vizualizirane polukružnim histogramima i određene su njihove relativne orijentacije depolariziranih kanala u odnosu na smjer sjevera slike. Usporedbom raznih parametara moglo se zaključiti da njihova promjena ipak daje vrlo slične rezultate za srednju vrijednost kuta orijentacije s manjim razlikama u širini distribucije, gdje će za manji parametar D_K distribucija biti uža, a za manji parametar D_W šira. To pokazuje da najdulje linearne strukture dominiraju raspodjelom i imaju slične orijentacije.

Iz MHD simulacija također je dobiveno zračenje neutralnog vodika iz čega se integriranjem po svim brzinama dobila slika ukupnog intenziteta zračenja, a osim toga dobiveno je i polarizirano zračenje prašine zabilježeno Stokes Q i U kockama u kojima prašina pohranjuje informaciju o smjeru magnetskog polja. RHT analiza također

je provedena i na ukupnom intenzitetu zračenja HI i polariziranom zračenju prašine iz čega su dobivene vrijednosti orijentacije HI filamenata i orijentacije magnetskog polja u odnosu na smjer sjevera slike. Usporedbom ta tri rezultata evidentno je da se glavna linearna svojstva podudaraju te da se orijentacija depolariziranih kanala i HI filamenata slaže s dominantnom orijentacijom magnetskog polja. Rezultati ovih sintetskih promatranja slažu se s pravim promatranjima polja 3C 196 ([16], [17], [18]), gdje je dobiveno da se orijentacija magnetskog polja slaže s orijentacijom Galaktičke ravnine te da tu orijentaciju prate i HI filamentarne strukture i ravni depolarizirani kanali sinkrotronskog zračenja.

Bibliography

- [1] van Den Bergh, S. : The galaxies of the Local Group. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000
- [2] Milky Way, (15.9.2001.) Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way, 26.7.2022.
- [3] Image Galleries, (7.8.2017.) NASA <https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/index.html>, 20.8.2022.
- [4] Galaxy, (28.4.2001.) Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy>, 26.7.2022.
- [5] Draine, B. T. Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium. Princeton : Princeton University Press, 2011.
- [6] Ferrière, K. M. : The interstellar environment of our galaxy. // Reviews of Modern Physics. vol. 73 : 1031 - 1066, 2001.
- [7] Bracco, A.; Ntormousi, E.; Jelić, V.; Padovani, M.; Šiljeg, B.; Erceg, A.; Turić, L.; Ceraj, L.; Šnidarić, I. : First look at the multiphase interstellar medium with synthetic observations of low-frequency Faraday tomography // A& A. 2022.
- [8] Snow, T. P.; McCall J. B. : Diffuse Atomic and Molecular Clouds. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. vol. 44, 2006.
- [9] Ferrière, K. M.; West, J. L.; Jaffe, T. R. : The correct sense of Faraday rotation. // MNRAS 507, 4968–4982, 2021.
- [10] Synchrotron radiation (1.1.2022.) Wikimedia https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emmaalexander_synchrotron.png, 14.9.2022.
- [11] Brentjens, M. A.; de Bruyn, A. G. : Faraday rotation measure synthesis. // Astronomy & Astrophysics, 441, 2005.
- [12] Thomas L. Wilson, T. L.; Rohlfs, K.; Hüttemeister, S. : Tools of Radio Astronomy. // Astronomy and Astrophysics Library, 2009.

- [13] Pelgrims¹, V.; Macías-Pérez, J. F.; Ruppin¹, F. : Galactic magnetic field reconstruction using the polarized diffuse Galactic emission: formalism and application to Planck data. // *A& A* 652, 2021.
- [14] Ntormousi, E.; Dawson, J. R., Hennebelle¹, P. i Fierlinger, K. : The role of magnetic fields in the structure and interaction of supershells. // *Astronomy & Astrophysics*, 599, 2017.
- [15] Spitzer, L. Jr, *Physical Processes in the Interstellar Medium*. Princeton University Observatory, 1998.
- [16] Clark, S.; Peek, J.; Putman, M.: Magnetically aligned HI fibers and the rolling Hough transform. // *The Astrophysical Journal*, 789, 82, 2014.
- [17] Jelić, V.; Prelogović, D.; Haverkorn, M.; Remeijn, J.; and Klindžić, D. : Magnetically aligned straight depolarization canals and the rolling Hough transform. // *Astronomy & Astrophysics* 615, 2018.
- [18] Jelić, V.; de Bruyn, A.; Pandey, V.; Mevius, M.; Haverkorn, M.; Brentjens, M.; Koopmans, L.; Zaroubi, S.; Abdalla, F.; Asad, K.; et al. : Linear polarization structures in LOFAR observations of the interstellar medium in the 3C 196 field. // *Astronomy & Astrophysics* 583, 2015.