

# Poravnanje različitih vrsta međuzvjezdane materije u širem području 3C 196 polja

Ana Erceg

19. siječnja 2019.

## SAŽETAK

Promatranje polja centriranog na jakom radioizvoru 3C 196 na niskim radiofrekvencijama pomoću radioteleskopa LOFAR rezultiralo je pronalaskom dugih, iznimno ravnih kanala potpuno depolariziranog radiozračenja naše galaksije (Jelić et al., 2015.). Kasnija analiza pokazala je da se orijentacija kanala poklapa s orijentacijom silnica magnetskog polja (Jelić et al., 2018). U ovom radu analiza je napravljena za polje AE koje se nalazi desetak stupnjeva ispod 3C 196 polja prema galaktičkoj ravnini. U našoj analizi koristili smo Rolling Hough Transform kako bismo izolirali ravne depolarizirane kanale, odredili njihovu orijentaciju te je usporedili s orijentacijom magnetskog polja. Pokazali smo da magnetsko polje ima ključnu ulogu u poravnavanju različitih faza međuzvjezdane materije te da u polju AE dolazi do poravnanja prašine i ionizirane međuzvjezdane materije.

## 1 Uvod

Faraday rotacija je magneto-optički fenomen pri kojem se zakreće ravnina polarizacije zračenja. (Slika 1). U našoj galaksiji Faradayevoj rotaciji podliježe polarizirano sinkrotronsko zračenje pri prolasku kroz ioniziranu međuzvjezdanu materiju te u interakciji s lokalnim magnetskim poljem. Kut koji mjeri zakretanje ravnine polarizacije je proporcionalan gustoći elektrona i iznosu komponente magnetskog polja duž doglednice te kvadratu valne duljine zračenja.

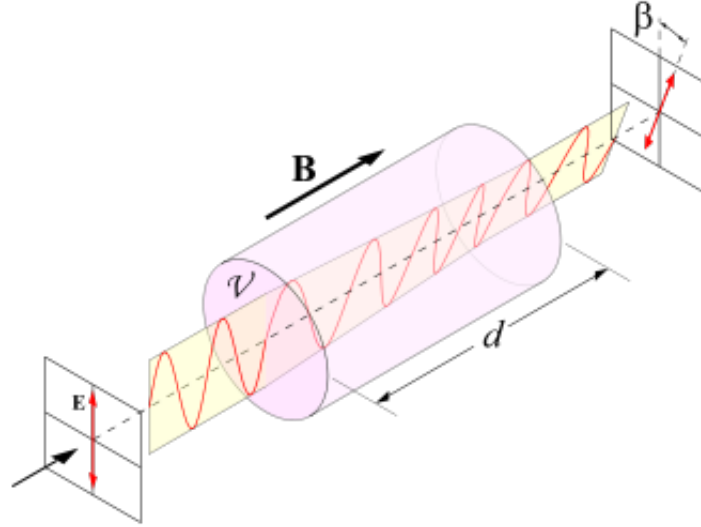
Na niskim radiofrekvencijama (100 - 200 MHz) Faradayevu rotaciju moguće je istražiti koristeći promatranja s radioteleskopom LOFAR (eng. LOw Frequency ARray, van Haarlem et al., 2013.) te upotrebom metode RM sinteze (eng. Rotation Measure Synthesis, Brentjens & de Bruyn, 2005.). Metoda RM sinteze raspetljava promatrano zračenje prema stupnju Faradayeve rotacije koju je ono doživjelo. Mjera Faradayeve

rotacije je definirana Faradayevom dubinom koja je dana formulom:

$$\frac{\Phi}{[\text{radm}^{-2}]} = 0.81 \int \frac{n_e}{[\text{cm}^{-3}]} \frac{B_{\parallel}}{[\mu\text{G}]} \frac{dl}{[\text{pc}]}, \quad (1)$$

gdje je  $n_e$  gustoća elektrona, a  $B_{\parallel}$  komponenta magnetskog polja paralelna sa smjerom doglednice (dl). Smjer magnetskog polja određuje predznak Faradayeve dubine. Ako je magnetsko polje usmjereno prema promatraču, Faradayeva dubina ima pozitivan predznak, a ako je usmjereno od promatrača predznak je negativan. Drugim riječima RM sinteza razlaže promatrano polarizirano radiozračenje po različitim Faradayevim dubinama i time nam omogućuje Faraday tomografiju međuzvjezdane materije duž doglednice promatranja.

Faradayeva tomografija polja centriranog na jakom radio izvoru 3C 196 (Jelić et al., 2015) otkrila je brojne strukture ionizirane međuzvjezdane materije u našoj galaksiji, među



Slika 1: Ilustracija zakretanja smjera polarizacije zračenja Faradayevom rotacijom. Preuzeto sa [https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_effect).

kojima se nalaze i dugi, ravni kanali koji u potpunosti depolariziraju zračenje. Daljnja analiza pokazala je da se orijentacija kanala poklapa s orijentacijom silnica magnetskog polja dobivenih iz Planckovih promatranja polariziranog zračenja međuzvjezdane prašine te s filamentima neutralne (HI) međuzvjezdane materije (Jelić et al., 2018.). Prirodno je pitati se prožimaju li se slične strukture većim dijelom neba te slijede li orijentaciju magnetskog polja. U ovom seminaru proučit ćemo orijentaciju depolariziranih kanala za dio neba koji se nalazi desetak stupnjeva ispod 3C 196 polja prema galaktičkoj ravnini (polje AE) slijedeći metodologiju opisanu u Jelić et al. (2018).

U poglavlju 2 opisana su LOFAR-ova promatranja polja AE te podaci koje smo koristili za analizu ravnih depolariziranih kanala pomoću Rolling Hough Transformata (RHT). U poglavlju 3 opisan je princip rada RHT-a, dok se u zadnja dva poglavlja osvrćemo na dobivene rezultate mjerenja, diskusiju i zaključak.

## 2 Podaci

Za analizu koristimo tzv. Faradayevu kocku koja sadrži slike polariziranog sinkrotronskog zračenja u polju AE, centriranog na koordinatama RA:  $111.7^\circ$ , DEC =  $48.2^\circ$ , te raspetljanog po različitim Faraday dubinama. Svaka slika obuhvaća oko  $5^\circ \times 5^\circ$  te je dana za raspon Faraday dubina od  $-25$  do  $+25$  rad  $m^{-2}$ . Rezolucija slika je 3.75 lučnih minuta, dok rezolucija u Faradayevoj dubini iznosi 1 rad  $m^{-2}$ . Kocka je dobivena RM sintezom promatranja zračenja naše galaksije pomoću radioteleskopa LOFAR. Promatranje je napravljeno 11. prosinca 2016. godine, obuhvatilo je 6 noćnih sati te ima oznaku L428654. Za vrijeme promatranja korištene su visokofrekventne (HBA, eng. High Band Antennas) antene u tzv. HBA DUAL INNER konfiguraciji (van Haarlem et al. 2013). Mjereno je na frekvencijama od 115 MHz do 175 MHz s rezolucijom od 195.3 kHz.

U Faradayevoj kocki pronađene su strukture na dubinama od  $-7$  do  $7$  rad  $m^{-2}$ . Kako bismo ih mogli proučiti, podijelili smo kocku u tri dijela prema Faradayevoj dubini. Prvi dio obuhvaća raspon od  $-7$  do  $-1$  rad  $m^{-2}$ , drugi od  $+0.75$  do  $+3$  rad  $m^{-2}$ , a treći od  $+3.25$  do  $+7$

rad  $m^{-2}$ . Zatim smo napravili slike koje za svaki piksel prikazuju maksimalni intenzitet u danom rasponu Faradayevih dubina. Na taj način istaknuli smo područja u kojima je sinkrotronsko zračenje depolarizirano i pripremili ih za analizu pomoću Rolling Hough transformata. Detektirane strukture su prikazane na Slikama 3, 4 i 5.

### 3 Rolling Hough Transform

Rolling Hough Transform primjenili smo na Slike 3, 4 i 5 kako bismo izolirali ravne depolarizirane kanale i odredili njihovu orijentaciju. Rolling Hough transform (Clark et al., 2014.) je modifikacija Hough transformata, algoritma koji se koristi za prepoznavanje ravnih linija na slici određivanjem vjerojatnost s kojom je određeni piksel dio koherentne linearne strukture.

RHT algoritam može se opisati kroz šest koraka (Slika 6). Za početak potrebno je izoštriti sliku primjenom 'unsharp' maske kao što prikazuju prva tri koraka na Slici 6. Parametar  $D_K$ , 'smoothing kernel diameter' kontrolira 'unsharp' masku potisnućem struktura na velikim skalama. Zatim za svaki piksel na slici algoritam traži susjedne piksele unutar kruga promjera  $D_W$ , 'window diameter', koji su većeg intenziteta od granice dane parametrom  $Z$  te sprema informaciju o njihovom položaju. Time parametar  $D_W$  određuje najkraću duljinu linije koju algoritam može prepoznati, a parametar  $Z$  određuje donju granicu intenziteta piksela koji algoritam prihvaća kao dio koherentne linearne strukture. U konačnici rezultati RHT analize spremljeni su u funkciju  $R(\theta, x, y)$  gdje je za svaki piksel na slici  $(x, y)$  dan set nagiba svih pravaca,  $\theta$ , koji prolaze kroz dani piksel. Dobiveni se podaci zatim kvantificiraju integracijom  $R(\theta, x, y)$ :

$$\tilde{R}(\theta) = \frac{1}{N} \int \int R(\theta, x, y) dx dy, \quad (2)$$

gdje je  $N$  normalizacija odabrana tako da vrijedi

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}(\theta) d\theta = 1. \quad (3)$$

Integracijom po cijeloj slici dobit ćemo orijentaciju svih ravnih linija. Grafički se rezultati mogu prikazati na polarnom histogramu.

### 4 Rezultati

Rezultati RHT-a prikazani su na Slikama 7, 8, 9 te na polarnim histogramima prikazanim na Slikama 10, 11 i 12. Zračenje detektirano radioteleskopom LOFAR prikazano je crvenom bojom, a linije identificirane RHT-om istaknute su zelenom bojom. Orijehtacija galaktičke ravnine na histogramima odgovara kutu od 0 rad. Vrijednosti parametara korištenih za RHT analizu su  $D_W = 101$ ,  $D_K = 16$  i  $Z = 0.8$ .

Za strukture 1 izračunali smo i srednju vrijednost  $\langle \theta \rangle$  i disperziju  $\delta\theta$  distribucije njihovih orijentacija kako bismo ih mogli usporediti s onima u polju 3C 196. Prilikom izračuna moramo napraviti projekciju polovice polarnog dijagrama na cijeli krug i vizualizirati svaku točku kao vektor duljine  $\tilde{R}(\theta)^2 d\theta$ . Integriranjem po cijelom prostoru dobivamo vektor  $S$ :

$$S = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}(\theta)^2 e^{2i\theta} d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tilde{R}(\theta)^2 d\theta}. \quad (4)$$

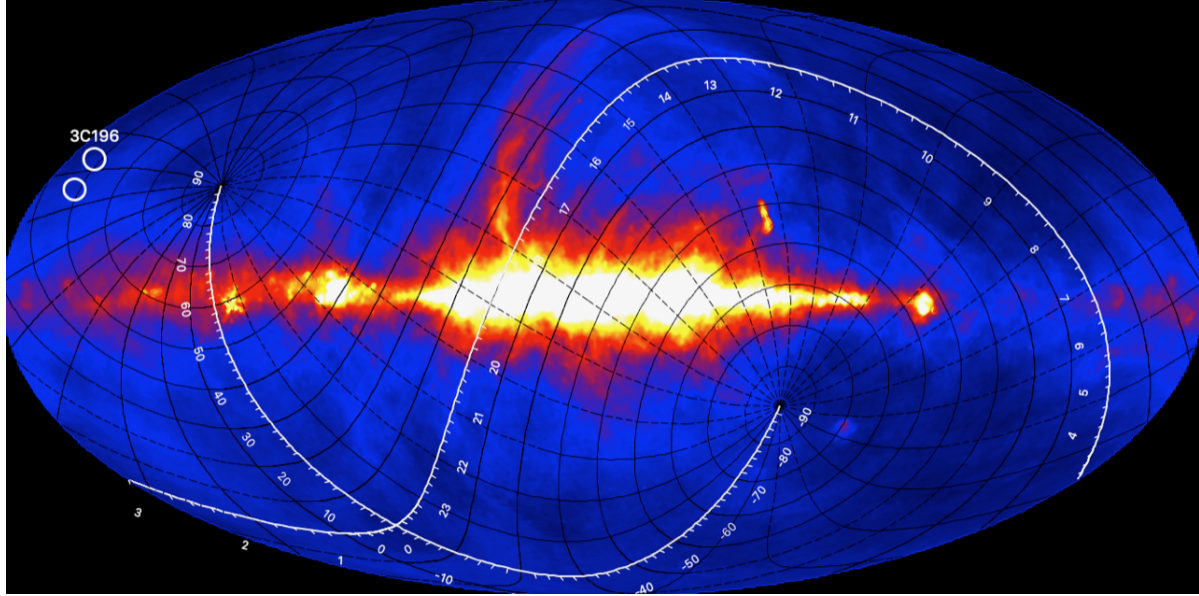
Iz smjera vektora  $S$  i njegovog iznosa slijede srednja vrijednost kuta  $\langle \theta \rangle$  i njegova disperzija  $\delta\theta$ :

$$\langle \theta \rangle = \frac{1}{2} \text{Arg}(S) = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{\text{Im}(S)}{\text{Re}(S)} \right), \quad (5)$$

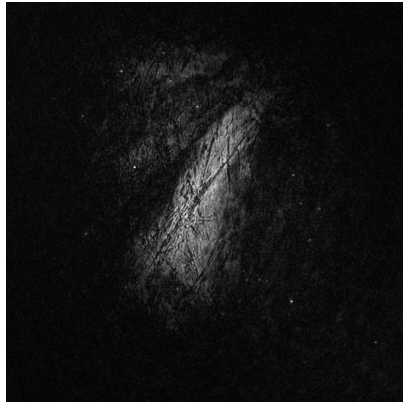
$$\delta\theta = \frac{1}{2} \sqrt{\ln(1/|S|^2)}, \quad (6)$$

Prema navedenim izrazima za strukture 1 dobivamo:  $\langle \theta \rangle_1 = 9^\circ$  i  $\delta\theta_1 = \pm 21^\circ$ . Bez obzira na relativno veliku dobivenu disperziju očito je da postoji preferirani smjer, odnosno da je većina linija orijentirana u istom smjeru (vidi Sliku 10). Orijehtaciju depolariziranih kanala također smo usporedili s orijentacijom lokalnog magnetskog polja naše galaksije. Orijehtacija magnetskog polja (Slika 13) dobivena je pomoću podataka iz

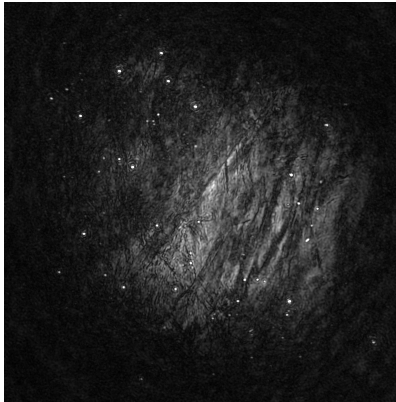
<sup>1</sup><https://www.cosmos.esa.int/web/planck/pla>



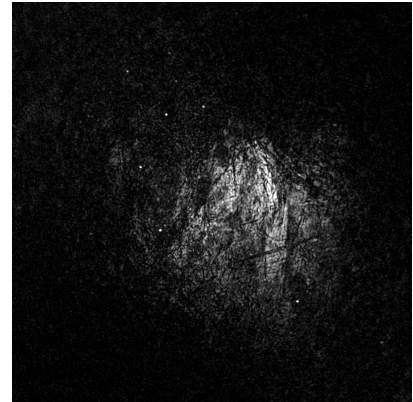
Slika 2: Sinkrotronsko zračenje naše galaksije na 408 MHz (*Haslam 408 MHz All-Sky Map*) s označenim položajima polja 3C 196 i polja AE kojeg proučavamo u ovom radu . Polje AE nalazi se oko  $10^\circ$  južnije od polja 3C 196, prema galaktičkoj ravnini.



Slika 3: Detektirane strukture na intervalu Faradayevih dubina od  $-7$  do  $-1$   $\text{rad m}^{-2}$ , u daljnjem tekstu strukture 1.



Slika 4: Detektirane strukture na intervalu Faradayevih dubina od  $-0.75$  do  $+3$   $\text{rad m}^{-2}$ , u daljnjem tekstu strukture 2.

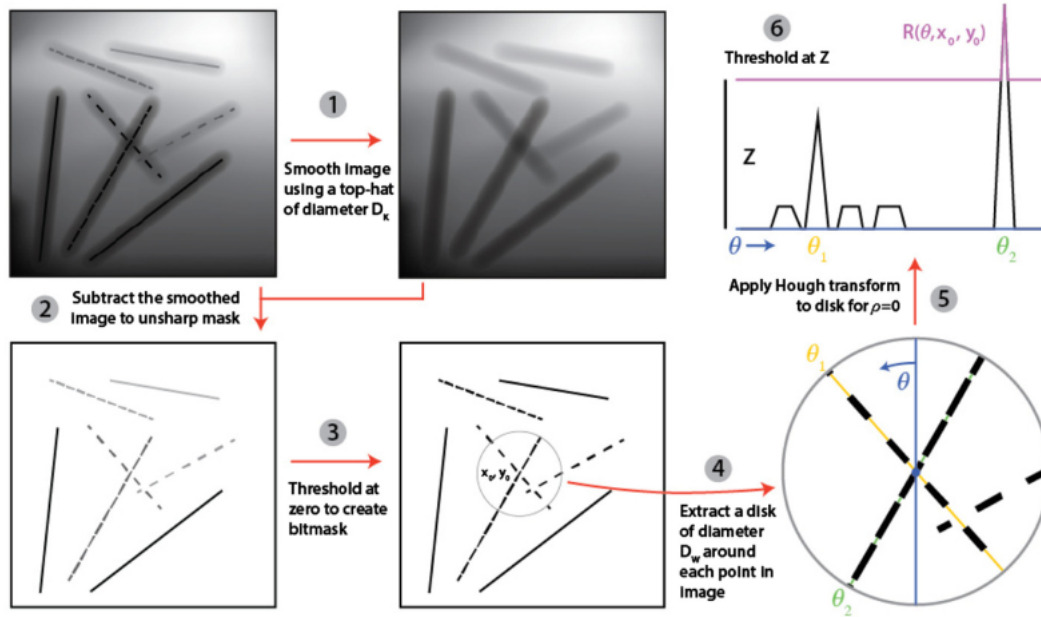


Slika 5: Detektirane strukture na intervalu Faradayevih dubina od  $+3.25$  do  $+7$   $\text{rad m}^{-2}$ , u daljnjem tekstu strukture 3.

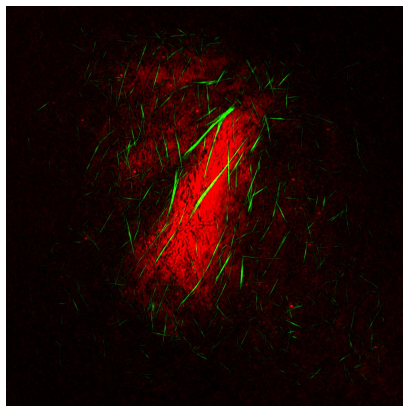
Planckove arhive, Planck Legacy Archive<sup>1</sup>. Konkretno, iz polariziranog zračenja prašine na frekvenciji od 353 GHz. Magnetsko polje je u odnosu na orijentaciju ravnine polarizacije zračenja prašine zarotirano za  $90^\circ$ . Dobivena srednja vrijednost i disperzija smjera magnetskog polja su  $\langle \theta \rangle_M = 3^\circ$  i  $\delta \theta_M = \pm 14^\circ$ . Usporedba struktura detektiranih radioteleskopom LOFAR sa silnicama magnetskog polja prikazana je na Slici 14.

## 5 Diskusija i zaključak

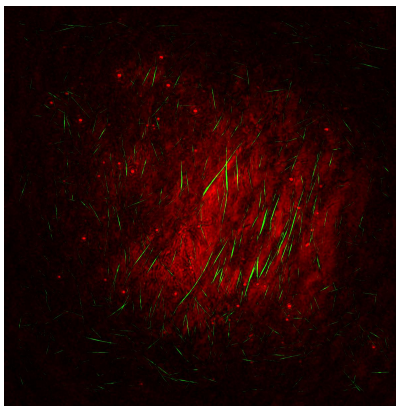
Promatrajući raspodjele orijentacija ravnih depolariziranih kanala za sva tri dijela Faradayeve kocke (Slike 10, 11, 12) uočavamo preklapanje s orijentacijom silnica magnetskog polja (Slika 13). Većina kanala ima orijentaciju od oko  $5^\circ$ , što je ujedno i dominantna orijentacija struktura na Faradayevim dubinama od  $-7$  do  $+3$   $\text{rad m}^{-2}$ .



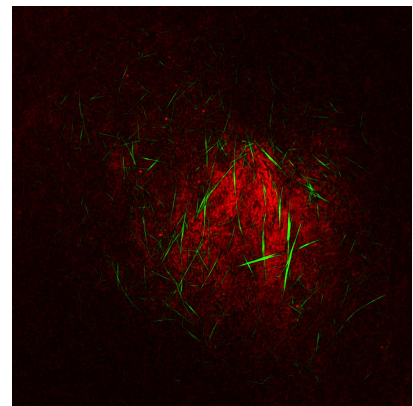
Slika 6: Dijagram RHT analize. Koraci 1-3 prikazuju početnu obradu Slike, pri kojoj se potisnu strukture na velikim skalama. Korak 4 prikazuje odabir kruga promjera  $D_w$ , koji se 'kotrlja' (engl. 'rolls') preko svih piksela na slici. Korak 5 predstavlja Houghov transformat dok korak 6 ilustrira da se samo pikseli većeg intenziteta od granice dane parametrom  $Z$  prihvaćaju kao dio koherentne linearne strukture. Na prikazanom primjeru, samo zelena linija (orijentacije  $\theta_2$ ) zadovoljava ovaj uvjet. Preuzeto iz Clark et al. (2014).



Slika 7: Rezultati RHT analize za strukturu 1.



Slika 8: Rezultati RHT analize za strukturu 2.



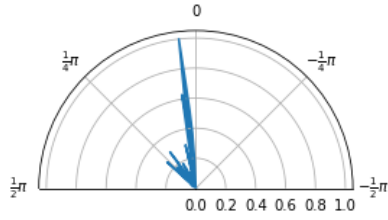
Slika 9: Rezultati RHT analize za strukturu 3.

Depolarizirani kanali kod struktura 3 pokazuju i dodatne dvije orijentacije.

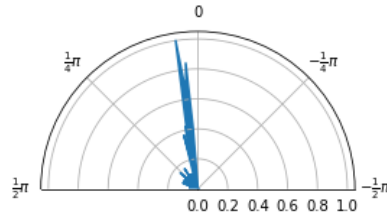
Za strukturu 1 preklapanje postoji i u direktnoj usporedbi silnica magnetskog polja sa samim strukturama detektiranim radioteleskopom

LOFAR (Slika 14). Silnice magnetskog polja obavijaju i prate promatrane strukture, što je indicacija da magnetsko polje dominira ioniziranom međuzvezdanom materijom.

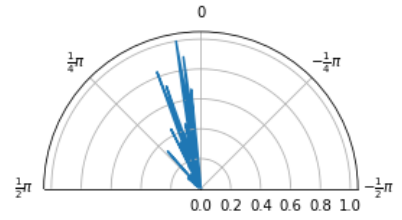
Rezultate dobivene za strukturu 1 možemo us-



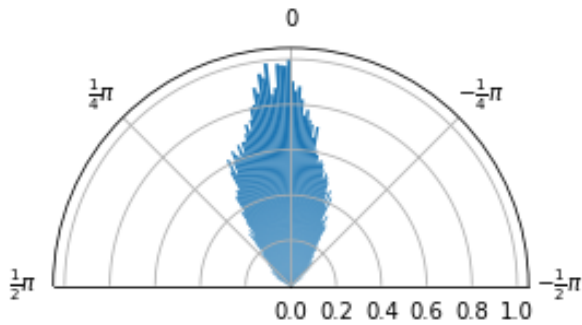
Slika 10: Raspodjela orijentacije depolariziranih kanala za strukture 1.



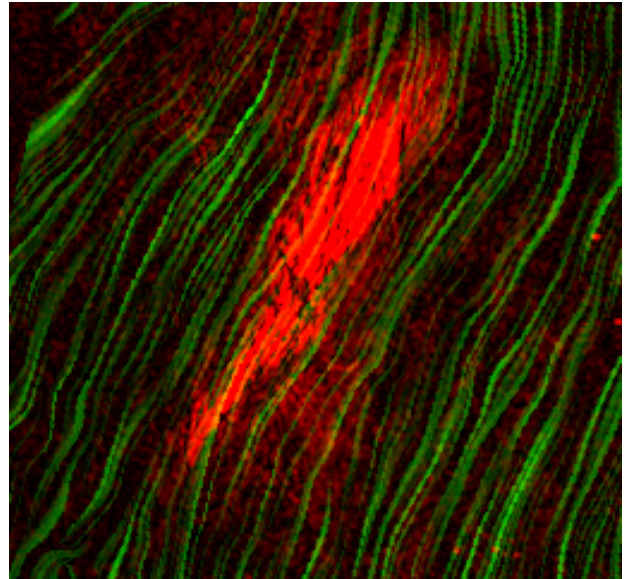
Slika 11: Raspodjela orijentacije depolariziranih kanala za strukture 2.



Slika 12: Raspodjela orijentacije depolariziranih kanala za strukture 3.



Slika 13: Orijentacija magnetskog polja dobivena iz podataka preuzetih iz 'Planck Legacy Archive'



Slika 14: Usporedba strukture 1 detektiranih radioteleskopom LOFAR (crvena boja) sa silnicama magnetskog polja dobivenih iz polariziranog zračenja prašine (zelene linije).

porediti sa rezultatima dobivenim za strukture u polju 3C 196 (Jelić et al., 2018.). Rezultati za strukture u polju 3C 196 prikazani su na Slici 15 i iznose:  $\langle \theta \rangle = 10^\circ$  i  $\delta\theta = \pm 6^\circ$ . Zaključujemo da se orijentacija depolariziranih kanala u polju AE poklapa s orijentacijom dobivenom za polje 3C 196 što upućuje na to da se strukture nastavljaju jedna na drugu i tvore jednu veću strukturu. Porijeklo jedne takve strukture mogla bi biti supernova koja se dogodila blizu galaktičke ravnine i koja je šok valovima potisnula međuzvjezdanu materiju i magnetsko polje u ovakav oblik, gotovo paralelan galaktičkoj ravnini.

Naši rezultati su i u skladu s idejom da magnetsko polje ima ključnu ulogu u poravnavanju različitih faza međuzvjezdane materije, tj. pokazali smo da u polju AE dolazi do poravnanja dvije vrste međuzvjezdane materije: prašine i ionizirane međuzvjezdane materije. Poravnavanje s neutralnom (HI) međuzvjezdanom materijom bit će istraženo u budućem radu.

## Literatura

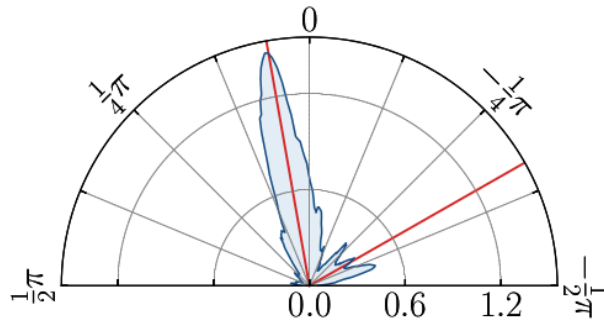
Brentjens, M. A. & de Bruyn, A. G. 2005, *A&A*, 441, 1217

Clark, S. E., Peek, J. E. G., & Putman, M. E. 2014, *ApJ*, 789, 82

Jelić, V., de Bruyn, A. G., Pandey, V. N., et al. 2015, *A&A*, 583, A137

Jelić, V., Prelogović, D., Haverkorn M., et. al. 2018, *A&A*, 615, L3

van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al. 2013, *A&A*, 556, A2



Slika 15: Raspodjela nagiba depolariziranih kanala u strukturi iz 3C 196 polja. Crvena linija prikazuje srednju vrijednost za dva smjera orijentacije struktura. Preuzeto iz Jelić et al., 2018.