

# Istraživanje zvjezdanih tragova u međuzvjezdanim prostorima

Domagoj Božan  
(Datum: 25. siječnja 2020.)

*Ciljevi.* Promatranjem sinkrotronskog zračenja naše galaksije na niskim frekvencijama uočene su linearne strukture usmjerene duž silnica lokalnog magnetskog polja, takozvani depolarizirani kanali, čiji način nastanka nam još nije sasvim jasan. Jedno od mogućih objašnjenja za nastanak depolariziranih kanala jest prolazak zvijezda kroz međuzvjezdanu tvar. Cilj ovog rada je usporediti lokacije depolariziranih kanala u polju 3C196 s putanjama zvijezda koje su prošle kroz to polje kako bi se stekao uvid u vjerodostojnost spomenute pretpostavke.

*Metode.* Za detekciju ravnih linija u mjerenjima sinkrotronskog zračenja polja 3C196 putem radioteleskopa LOFAR koristi se Rolling Hough Transform metoda (RHT). Mjerenja zračenja te rezultati RHT metode vizualizirani su korištenjem programa SAOImage DS9. Podatci o gibanju zvijezda u promatranom polju preuzeti su iz arhive Gaia satelita te su ti podatci korišteni za određivanje približne putanje zvijezda u prošlosti.

*Rezultati.* Primjenom RHT metode određene su lokacije depolariziranih kanala u 3C196 polju te su ta područja uspoređena s putanjama zvijezda koje se nalaze u tom polju. Pomoću podataka s Gaia satelita određene su približne putanje zvijezda tako da se položaj zvijezda propagirao u prošlost, što je grafički prikazano tako da se trenutni položaj zvijezda spajao s položajem u prošlosti. Pri tome je pretpostavljeno da se može uzeti pravocrtna aproksimacija jer je vidno polje maleno. Neke od tako dobivenih linija poklapaju se s položajima linearnih struktura koje nalazi RHT.

*Zaključci.* Iako je uočeno dobro podudaranje lokacija depolariziranih kanala s putanjama zvijezda u 3C196 polju, broj zvijezda u polju je prevelik da bi se isključila mogućnost slučajnog podudaranja. Dobiveni rezultati ne isključuju hipotezu po kojoj depolarizirani kanali nastaju međudjelovanjem zvijezda s međuzvjezdanom tvari, no za cjelovito objašnjenje potrebno je daljnje istraživanje.

## I. UVOD

Pod pojmom međuzvjezdanog medija podrazumijevamo tvar i zračenje koji ispunjavaju međuzvjezdani prostor neke galaksije. Međuzvjezdana tvar sastoji se uglavnom od plina u različitim oblicima, ali nalazimo i kozmičku prašinu te visokoenergetske kozmičke zrake. Ostatak međuzvjezdanog medija, odnosno međuzvjezdano zračenje, odnosi se na energiju u obliku elektromagnetskog zračenja.

Međuzvjezdana se tvar, zajedno s magnetskim poljima koja prožimaju prostor, može proučavati na radiovalnim frekvencijama promatranjem sinkrotronskog zračenja. Sinkrotronskim zračenjem nazivamo elektromagnetsko zračenje koje otpušta nabijena čestica kada dobije radijalno ubrzanje oko silnice magnetskog polja. Pri promatranju međuzvjezdanog prostora, većina sinkrotronskog zračenja dolazi od elektrona, dobivenih iz kozmičkih zraka, ubrzanih oko silnica lokalnog magnetskog polja zato što elektroni najlakše gube energiju zbog svoje malene mase. Sinkrotronsko zračenje je linearno polarizirano i međudjelovanjem s ioniziranom međuzvjezdanom materijom te uz prisustvo magnetskog polja dolazi do zakretanja ravnine polarizacije, što se naziva Faradayeva rotacija [1].

Promatranjem Faradayeve rotacije polariziranog sinkrotronskog zračenja naše galaksije na niskim frekvencijama (100 - 200 MHz) uz pomoć radioteleskopa LOFAR (eng. LOw-Frequency ARray [7]) uočene su duge i ravne vlaknaste strukture unutar kojih je radiozračenje depolarizirano, tzv. depolarizirani kanali [10]. Način nastanka tih depolariziranih kanala još nije sasvim ra-

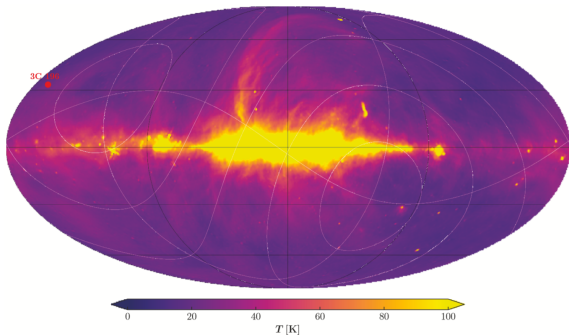
zjašnjen. Kut rotacije ovisi o gustoći elektrona i jakosti magnetskog polja pa su mogući uzroci depolarizacije nagle promjene smjera magnetskog polja ili uski i turbulentni ionizirajući tragovi koji nastaju pri prolasku zvijezda kroz međuzvjezdani medij [10].

Svrha ovog rada jest usporediti smjerove i položaje depolariziranih kanala u polju 3C196 s putanjama zvijezda kroz to polje i provjeriti vjerodostojnost hipoteze o nastanku depolariziranih kanala međudjelovanjem zvijezda i međuzvjezdane tvari. U tu se svrhu koriste metode Rotation Measure (RM) sinteze i Rolling Hough Transformata (RHT) koje su detaljno objašnjene u poglavlju III.

## II. PODATCI

Promatra se polarizirano sinkrotronsko zračenje u polju 3C196. Odabrano je to polje jer su u njemu jako izražene linearne strukture koje su nam od interesa. Lokacija 3C196 polja u našoj galaksiji prikazana je na slici 1.

Podatke o polariziranom sinkrotronskom zračenju polja 3C196 promatrane pomoću radioteleskopa LOFAR preuzimamo u obliku takozvanih Faradayevih kocki. Centar kocki u ekvatorijalnim koordinatama nalazi se na položaju  $RA = 123.4^\circ$ ,  $Dec = 48.2^\circ$ . Svaka kocka sadrži snimke polja veličine  $10^\circ \times 10^\circ$  na 176 različitih frekvencija. Preuzeti podatci sadrže i dvije kocke koje prikazuju mjerenja zračenja opisanog preko Stokesovih parametara, točnije jednu za Stokesov Q paramter i jednu za U parametar [2]. Korištenjem formule  $P^2 = Q^2 + U^2$  iz te dvije kocke moguće je dobiti kocku ukupnog polariziranog zračenja P koja se zatim metodom RM sinteze pre-



Slika 1: Sinkrotronsko zračenje naše galaksije na 408 MHz u galaktičkim (crne linije) i ekvatorijalnim (bijele krivulje) koordinatama s označenim položajem 3C196 polja. U sredini slike nalazi se galaktička ravnina. Slika je izrađena uz pomoć [3].

bacuje u prostor Faradayevih dubina u rasponu od  $-25 \text{ rad m}^{-2}$  do  $25 \text{ rad m}^{-2}$  po  $0.25 \text{ rad m}^{-2}$ .

Podatke o položajima i vlastitim gibanjima zvijezda preuzimamo iz javne arhive Gaia satelita [5]. Gaia satelit je ESA-in svemirski opservatorij lansiran 2013. godine čiji cilj je stvoriti preciznu trodimenzionalnu mapu oko milijarde zvijezda u našoj galaksiji i šire [6]. Od podataka iz Gaia arhive koji se poklapaju s položajem polja 3C196 zadržani su samo oni čije relativne pogreške vlastitih gibanja i paralakse iznose manje od 10%. Putanje zvijezda koje su zadovoljile navedene kriterije aproksimiraju se pod pretpostavkom pravocrtnog gibanja kroz polje, što možemo pretpostaviti zbog malenog kuta koje polje pokriva na nebu. Početni položaj određen je umnoškom vlastitog gibanja po koordinati i proteklog vremena te je gibanje zvijezda prikazano ravnim linijama koje spajaju početni i konačni položaj.

### III. METODA I ANALIZA

Kako bi se zračenje opaženo s radioteleskopom LOFAR raspetljalo po Faradayevim dubinama koristi se metoda RM sinteze. Kod te metode Faradayeva dubina definira se kao

$$\frac{\Phi}{[\text{rad/m}^2]} = 0.81 \int_{\text{izvor}}^{\text{promatrač}} \frac{n_e}{[\text{cm}^{-3}]} \frac{B_{\parallel}}{[\mu\text{G}]} \frac{dl}{[\text{pc}]}, \quad (1)$$

gdje je  $n_e$  gustoća elektrona, a  $B_{\parallel}$  komponenta magnet-skog polja paralelna doglednici  $dl$ . Faradayevu se dubinu može povezati s izmjerenim kompleksnim intenzitetom polarizacije  $P(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2)$  preko izraza:

$$F(\Phi) = \frac{1}{W(\lambda^2)} \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda^2) e^{-i2\Phi\lambda^2} d\lambda^2, \quad (2)$$

gdje je  $W(\lambda^2)$  težinska funkcija. Iz jednadžbe se može uočiti da je raspon od  $-\infty$  do  $+\infty$ , dok u  $\lambda^2$  prostoru

imamo samo raspon od 0 do  $+\infty$  što uzrokuje nepotpuni  $F(\Phi)$ . RM sinteza ograničena je s tri parametra: spektralnom pojasnom širinom ( $\Delta\lambda^2$ ), spektralnom rezolucijom ( $\delta\lambda^2$ ) i minimumom distribucije ( $\lambda_{min}^2$ ). Ta tri parametra povezani su s fizikalnim veličinama u Faradayevom prostoru: maksimalnom Faradayevom dubinom koja se može detektirati  $\Phi_{max} \approx \frac{\sqrt{3}}{\delta\lambda^2}$ , najširim razlučivom strukturom u Faradayevoj dubini  $\Delta\Phi \approx \frac{\phi}{\lambda_{min}^2}$  i rezolucijom u Faradayevom prostoru  $\delta\Phi \approx \frac{2\sqrt{3}}{\Delta\lambda^2}$  koja definira minimalnu udaljenost između dvije različite strukture koje se mogu detektirati [11].

Podatci dobiveni RM sintezom su zatim vizualizirani pomoću programa SAOImage DS9 [4] te obrađivani pomoću *astropy* modula u programskom jeziku *Python*.

Nakon što se dobije Faradayeva kocka ukupnog polariziranog zračenja, za svaki se piksel nalazi maksimum na svim Faradayevim dubinama te se radi slika koja sadržava samo maksimume intenziteta zračenja. Dobi-vena slika više nije trodimenzionalna kocka, već je u dvije dimenzije i na njoj se promatraju linearne strukture.

Metoda koja se koristi za označavanje linearnih struktura jest RHT (*Rolling Hough Transform*), bazirana na algoritmu Houghovog transformata. Houghov je transform format tehnika izvlačenja struktura korištena uglavnom pri analizi slika. Svrha tehnike je izdvojiti objekte iz određene klase oblika (primarno linije, što je slučaj i za RHT) procesom glasanja u parametarskom prostoru, gdje su kandidati za objekte dobiveni kao lokalni maksimumi u prostoru stvorenom algoritmom Houghovog transformata.

Metoda RHT-a funkcionira tako da za svaki piksel na slici određuje vjerojatnost da je taj piksel sastavni dio koherentne ravne linije parametrizirane kutem  $\theta$ . Karakteristike linija koje algoritam pronalazi mogu se kontrolirati pomoću tri ulazna parametra:  $D_K$  (*smoothing radius*) kontrolira potiskivanje velikih skala na slici, što dovodi manje strukture do izražaja;  $D_W$  (*window diameter*) definira prozor unutar kojega se traži međusobna povezanost piksela u koherentne ravne linije, odnosno određuje najmanju dužinu ravne linije koju će RHT pronaći;  $Z$  (*theta power threshold*) definira donji prag vjerojatnosti za koju se prihvaća da je određeni piksel sastavni dio koherentne linije u smjeru karakteriziranom kutem  $\theta$ . U konačnici rezultati RHT metode spremljeni su u funkciju  $R(\theta, x, y)$ , gdje koeficijenti  $x$  i  $y$  predstavljaju koordinate piksela na slici, a  $\theta$  predstavlja skup nagiba svih pravaca koji prolaze kroz točku  $(x, y)$ . Dobiveni se podatci mogu kvantificirati integriranjem funkcije:

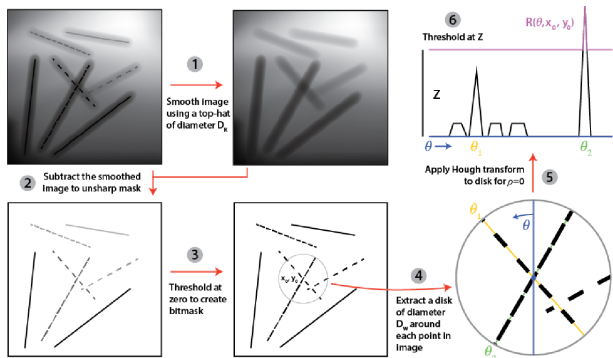
$$\tilde{R}(\theta) = \frac{1}{N} \int \int R(\theta, x, y) dx dy, \quad (3)$$

gdje je  $N$  normalizacija koja je odabrana tako da vrijedi:

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \tilde{R}(\theta) d\theta = 1. \quad (4)$$

Integriranjem po cijeloj slici dobiva se orijentacija svih

ravnih linija [8, 9]. Shematski prikaz rada RHT metode dan je na slici 2.



Slika 2: Shematski prikaz metode RHT-a. Koraci 1-3 prikazuju potiskivanje struktura na velikim skalama, korak 4 odabir kruga promjera  $D_W$ , koji se "kotrlja" preko svih piksela na slici, korak 5 Houghov transformat, a korak 6 pokazuje kako se samo pikseli većeg intenziteta od praga  $Z$  prihvaćaju kao dio koherentne linearne strukture. Slika je preuzeta iz [8].

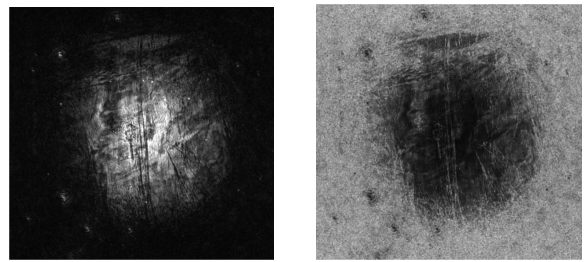
Pomoću funkcije  $R(\theta, x, y)$  moguće je kvantificirati svaku zvijezdu s obzirom na to koliko dobro prolazi ravnim strukturama unutar slike. To se radi softverski tako da se nakon transformacije položaja zvijezde u koordinate piksela  $r_{xy}(t)$  za svaki piksel u njezinoj putanji izračuna promjena  $\frac{dr}{dt}$  te iz nje pripadni kut  $\theta_r(t)$ . Mjera

$$M_* = \int_{t_{in}}^{t_{out}} R(\theta_r(t), r_{xy}(t)) dt, \quad (5)$$

gdje su granice integrala vremena ulaska i izlaska zvijezde iz polja (ili sadašnji trenutak umjesto izlaznog ako se zvijezda trenutno nalazi u promatranom području), bit će najveća za zvijezde koje velikim dijelom prolaze kroz izražene linearne strukture na slici. U praksi je često dovoljno samo izbrojati one piksele za koje je  $R(\theta_r(t), r_{xy}(t))$  različita od nule, odnosno  $M_* = \sum_t \Theta(R)$ , gdje je  $\Theta(x)$  step funkcija. Zadržavaju se samo one zvijezde koje zadovoljavaju navedeni uvjet. Zatim se putanje zadržanih zvijezda projiciraju duž polja 3C196 kako bi se dobila i vizualna reprezentacija podudaranja.

#### IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Primjenom RM sinteze na mjerenja polariziranog sinkrotronskog zračenja 3C196 polja s radioteleskopa LO-FAR te uzimanjem maksimuma intenziteta na svakom pikselu dobivena je slika koja prikazuje samo maksimume zračenja. Također je napravljen i inverz te slike kako bi se istaknule linearne strukture koje se pojavljuju u polju. Slika maksimuma i inverza maksimuma prikazane su na slici 3.



(a) Slika maksimuma intenziteta

(b) Invertirana slika maksimuma intenziteta

Slika 3: Vizualizacije polariziranog sinkrotronskog zračenja u 3C196 polju. Slike su dobivene korištenjem programa SAO DS9.

Na slikama se jasno vide ranije spomenute linearne strukture, odnosno depolarizirani kanali. Na rezultate RM sinteze primjenjena je RHT metoda kako bi se te strukture izdvojile. Uzeti ulazni parametri su  $D_W = 101$ ,  $D_K = 10$ ,  $Z = 0.7$ . Ti su parametri odabrani iterativnim procesom, odnosno RHT se izvršio za par različitih ulaznih parametara dok nije dobiven zadovoljavajući rezultat, tj. slika na kojoj se jasno mogu razaznati linearne strukture. Vizualizacija tog rezultata dana je na slici 4.



Slika 4: Rezultat primjene RHT metode na sliku maksimuma polariziranog sinkrotronskog zračenja polja 3C196.

Sada se mogu koristiti podatci iz rezultata RHT-a kako bi se usporedili položaji depolarizacijskih kanala s tragovima zvijezda određenim pomoću podataka iz Gaia satelita. Na slici 5 prikazane su projicirane putanje zvijezda duž polja 3C196 za tri različita kriterija minimalne

dužine zvjezdanih putanja: 50, 100 i 150 piksela na slici (jedan piksel na slici iznosi približno  $0.008^\circ$ ). Testiranje drugih kriterija pokazalo je da za manje duljine od 50 piksela slika postaje nepregledna, a veće duljine od 150 piksela ne daju dovoljno putanja na slici da bi se iz nje mogli izvući korisni podatci pa su uzeti navedeni kriteriji s inkrementima od 50 piksela. Na slici je označen i položaj galaktičke ravnine kroz strelice koje pokazuju smjer galaktičke ravnine, odnosno smjer galaktičke dužine ( $l$ ) i širine ( $b$ ).

Na slikama uočavamo da se većina zvijezda giba paralelno s galaktičkom ravninom. To nije iznenađujuće te je uzrok tomu globalno rotacijsko gibanje galaksije. Također vidimo da se neke od putanja poklapaju s položajima depolariziranih kanala pronađenih RHT metodom, što se posebno dobro vidi na slici 5c. Međutim, ako promotrimo sliku 5a, vidimo da kroz polje prolazi velik broj zvijezda. Stoga ne možemo biti sigurni da podudaranje tragova zvijezda s depolariziranim kanalima nije samo slučajnost jer je velika vjerojatnost da će neka zvijezda eventualno proći kroz depolarizirani kanal. Dakle, iako uočavamo dobro podudaranje, ne možemo sa sigurnošću potvrditi ili osporiti početnu hipotezu.

Moguće pogreške u mjerenju mogu proizaći iz grešaka u mjerenjima Gaia satelita, koja imaju konačnu preciznost. Kako se položaji zvijezda u prošlosti određuju iz položaja zvijezda u sadašnjosti i njihovih vlastitih gibanja, greške u tim vrijednostima prenose se i na položaj zvijezde u prošlosti. U ovom radu takva greška je umanjena filtriranjem podataka iz Gaia satelita po greškama u vlastitim gibanjima zvijezda.

U daljnjim istraživanjima bi se uz navedene metode

moglo i filtrirati zvijezde u polju 3C196 po njihovom položaju u Hertzsprung-Russell dijagramu. Razlog tomu bio bi taj što samo zvijezde visoke temperature mogu pokrenuti dovoljno snažan proces ionizacije okolne materije da ostave značajne tragove. Također bi se u budućem istraživanju trebala pronaći i metoda za nalaženje jednoznačnog preklapanja depolariziranih kanala s putanjama zvijezda.

## V. ZAKLJUČAK

Nakon obrade podataka s radioteleskopa LOFAR metodama RM sinteze i RHT-a te uspoređivanjem dobivenih linearnih struktura s putanjama zvijezda određenim pomoću podataka iz Gaia satelita dobiveno je dobro podudaranje u položajima depolariziranih kanala i putanja zvijezda. Međutim, uočeno je i da se u polju nalazi dovoljno velik broj zvijezda da je rezultat moguće pripisati slučajnosti. Stoga nije moguće potvrditi niti osporiti teoriju da tragovi zvijezda uzrokuju nastanak depolariziranih kanala. Iako dobiveni rezultati ne isključuju hipotezu po kojoj depolarizirani kanali nastaju međudjelovanjem zvijezda s međuzvjezdanom tvari, za cjelovito objašnjenje potrebno je daljnje istraživanje. Prijedlog za daljnja istraživanja jest da se provede selekcija nad temperaturama zvijezda u polju kako bi se zadržale samo one koje mogu stvoriti značajne tragove te da se pronađe metoda koja može naći jednoznačno preklapanje depolariziranih kanala s putanjama zvijezda.

<sup>1</sup> Michael Faraday, "Faraday's Diary", Volume IV, Nov. 12, 1839 - June 26, 1847

<sup>2</sup> G.G. Stokes, "On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources", 1852.

<sup>3</sup> <https://lambda.gsfc.nasa.gov/>

<sup>4</sup> <http://ds9.si.edu/site/Home.html>

<sup>5</sup> <https://gea.esac.esa.int/archive/>

<sup>6</sup> <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/the-mission>

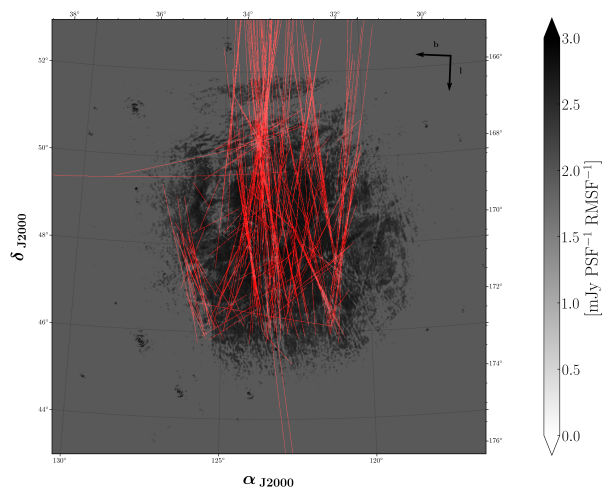
<sup>7</sup> M.P. van Haarlem, et al. 2013, A&A, 556A, V2

<sup>8</sup> S.E. Clark, J.E.G. Peek and M.E. Putman, 2014, ApJ, 789, 82

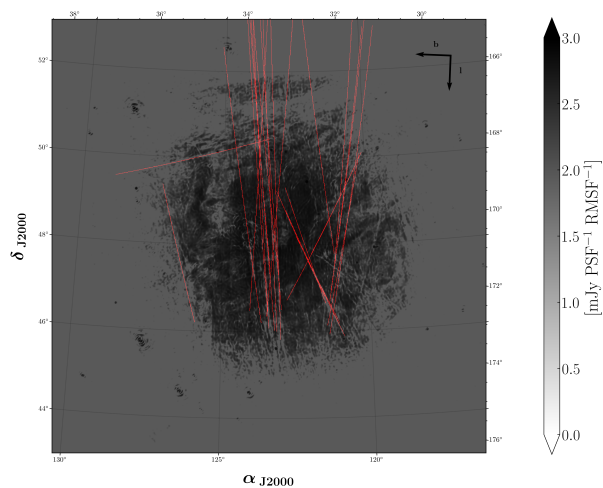
<sup>9</sup> V. Jelić, D. Prelogović, M. Haverkorn, et al. 2018, A&A, 615, L3

<sup>10</sup> V. Jelić, A.G. de Bruyn, V.N. Pandey, et al. 2015, A&A, 583, A137

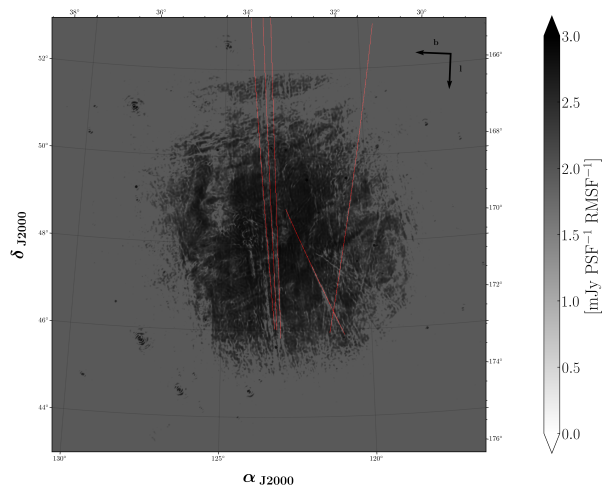
<sup>11</sup> M. Brentjens & A.G. de Bruyn, 2005, A&A, 441, 1217



(a) Sve zvjezdane putanje dulje od 50 piksela na slici.



(b) Sve zvjezdane putanje dulje od 100 piksela na slici.



(c) Sve zvjezdane putanje dulje od 150 piksela na slici.

Slika 5: Usporedba zvjezdanih putanja dobivenih podacima iz Gaia satelita s depolarizacijskim kanalima u 3C196 polju promatranom radioteleskopom LOFAR. Donja apscisa i lijeva ordinata pokazuju koordinate u rektascenziji i deklinaciji, a gornja apscisa i desna ordinata koordinate u galaktičkoj širini i duljini. S desne strane slike nalazi se traka s bojama koja opisuje iznos intenziteta zračenja u jedinicama megajanskya po PSF-u (eng. Point Spread Function) i po RMSF-u (eng. Rotation Measure Spread Function).