

Mjerenje vlastitog gibanja struktura međuzvezdane materije pomoću promatranja LOFAR radioteleskopa

Luka Turić¹, Vibor Jelić²

¹ Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu, Bijenička cesta 32, 10000 Zagreb, Hrvatska

² Institut Ruđer Bošković, Bijenička cesta 54, 10000 Zagreb, Hrvatska

1 Međuzvezdana materija (ISM)

1.1 Sastav

- molekularni oblaci i difuzni ISM + netermalna plazma (uglavnom relativistički protoni i elektroni) prožeti magnetskim poljem
- 5 faza difuznog ISM-a:
 - hladni (50 K) i topli (5000 K) neutralni medij (CNM i WNM)
 - topli (8000 K) i vrući ($\geq 10^6$ K) ionizirani medij (WIM i HIM)
 - topli (5000 K) djelomično ionizirani medij (WPIM)
- magnetska polja u fazama određujemo Zeemanovim efektom, Faradayevom rotacijom...
- difuzno polarizirano zračenje: sinkrotronsko zračenje

1.2 Sinkrotronsko zračenje

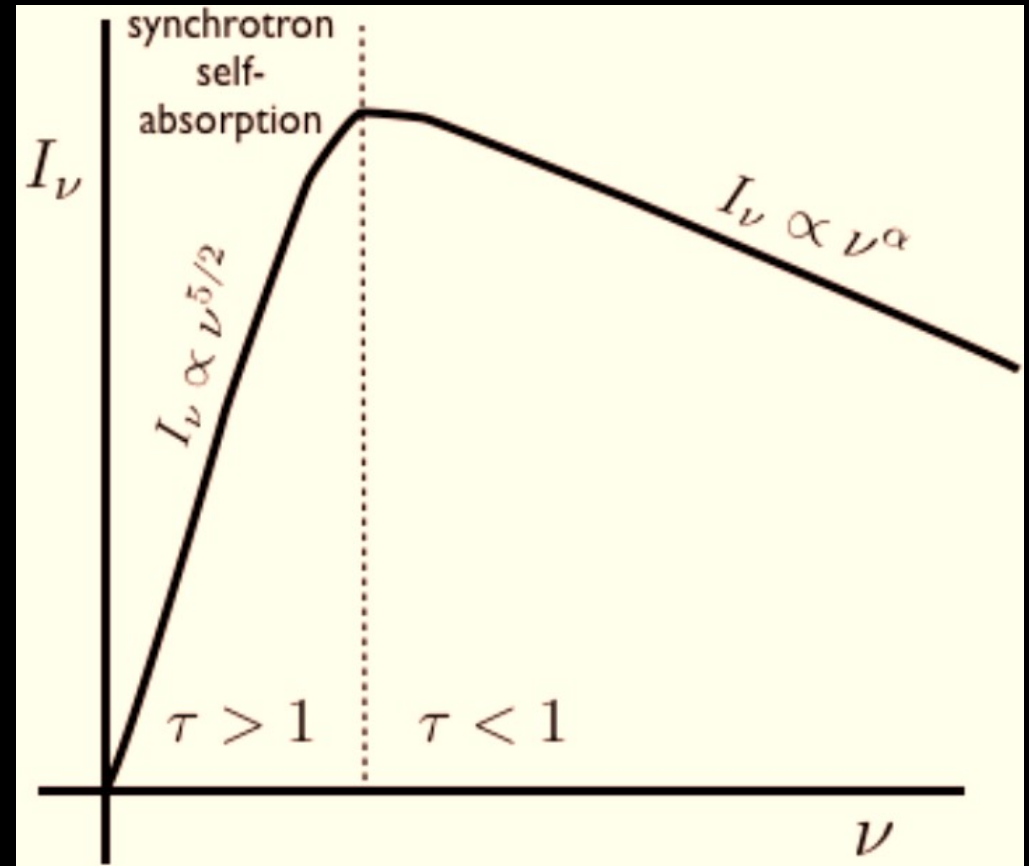
- nabijene čestice (uglavnom elektroni) koje se spiralnom putanjom gibaju relativističkim brzinama oko silnica magnetskog polja
- energetska distribucija elektrona:

$$n(E)dE = kE^{-\gamma}dE$$

$$\alpha = \frac{1-\gamma}{2}$$

- intrinzični stupanj polarizacije:

$$p = \frac{3\gamma + 3}{3\gamma + 7}$$

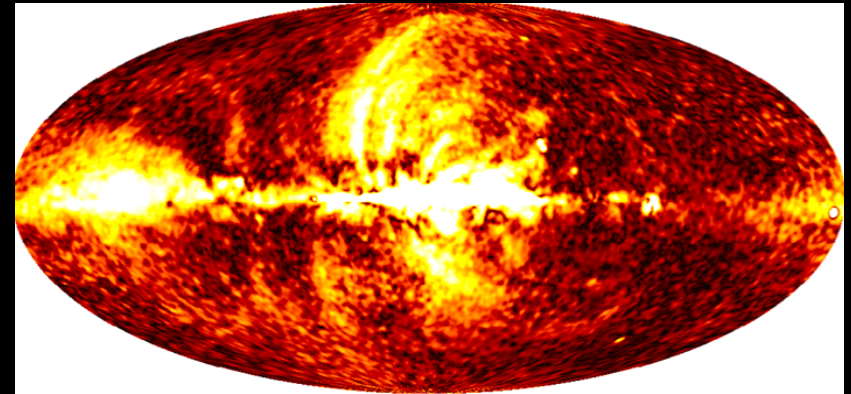
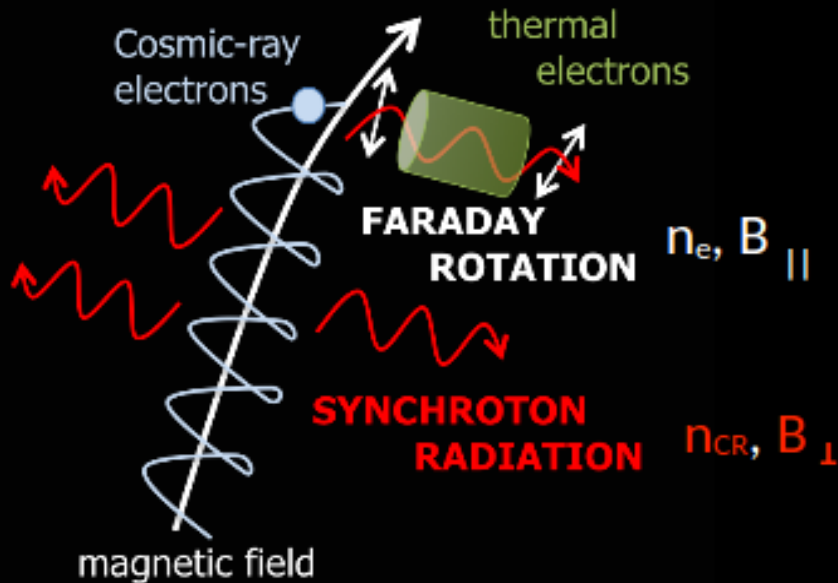


1.3 Faradayeva rotacija

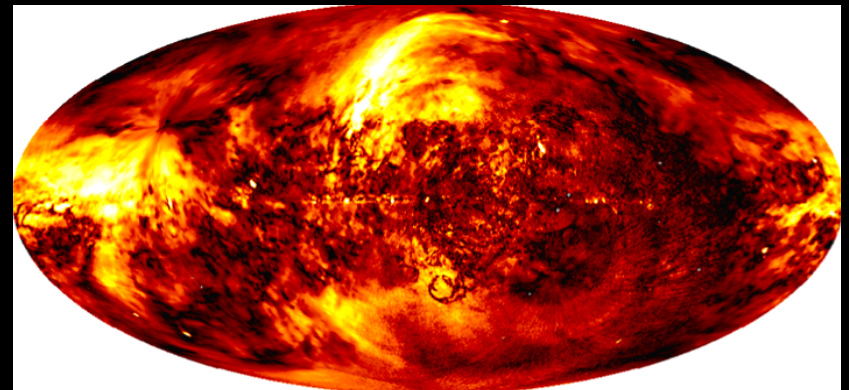
- zakretanje kuta polarizacije sinkrotronskog zračenja zbog interakcije s elektronima u magnetskom polju:

$$\chi(\lambda^2) = \chi_0 + \text{RM} \cdot \lambda^2$$

$$\text{RM} = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int_0^d n_e(s) B_{\parallel}(s) ds$$

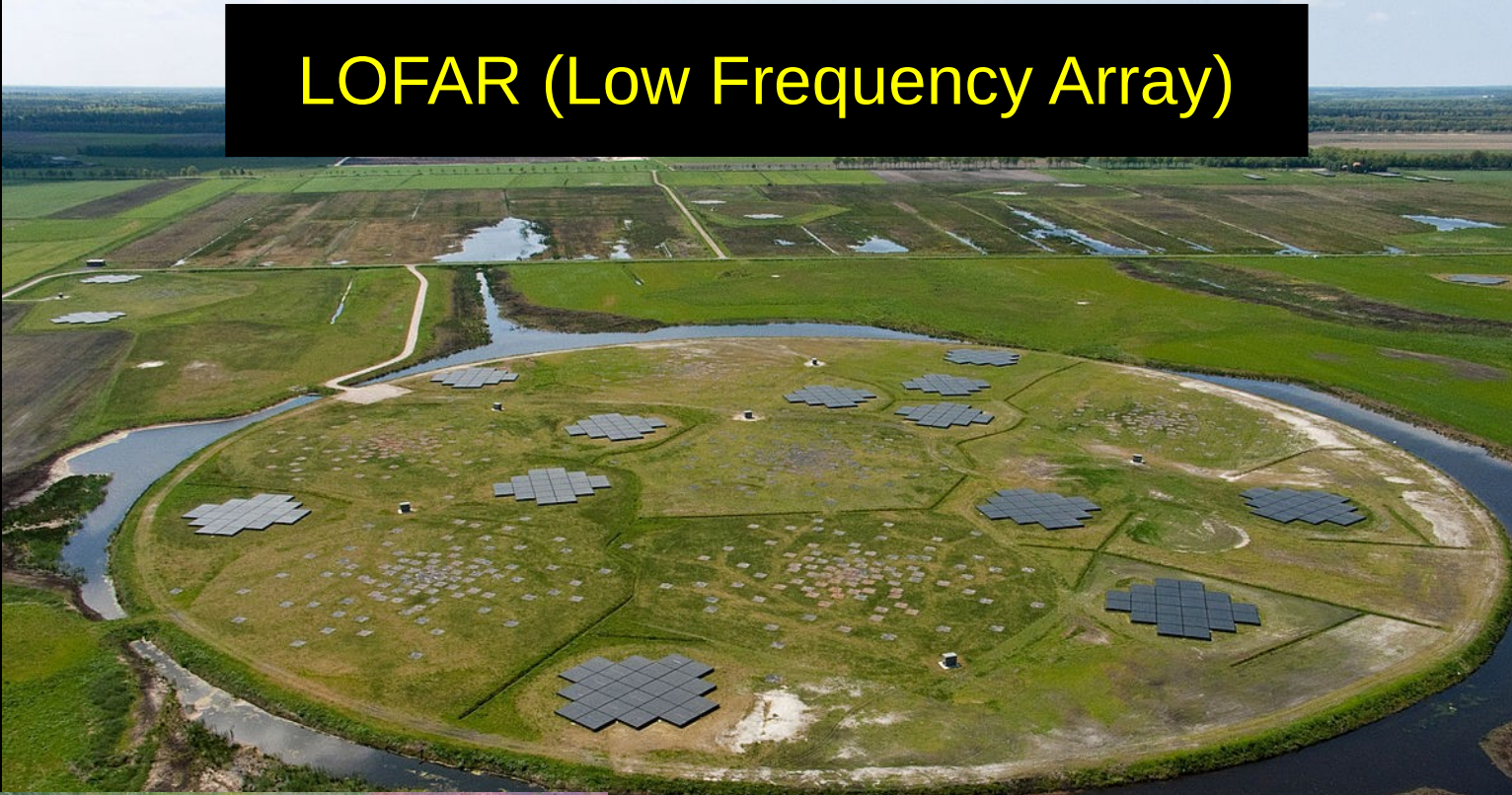


Intenzitet polarizacije na 22.8 GHz

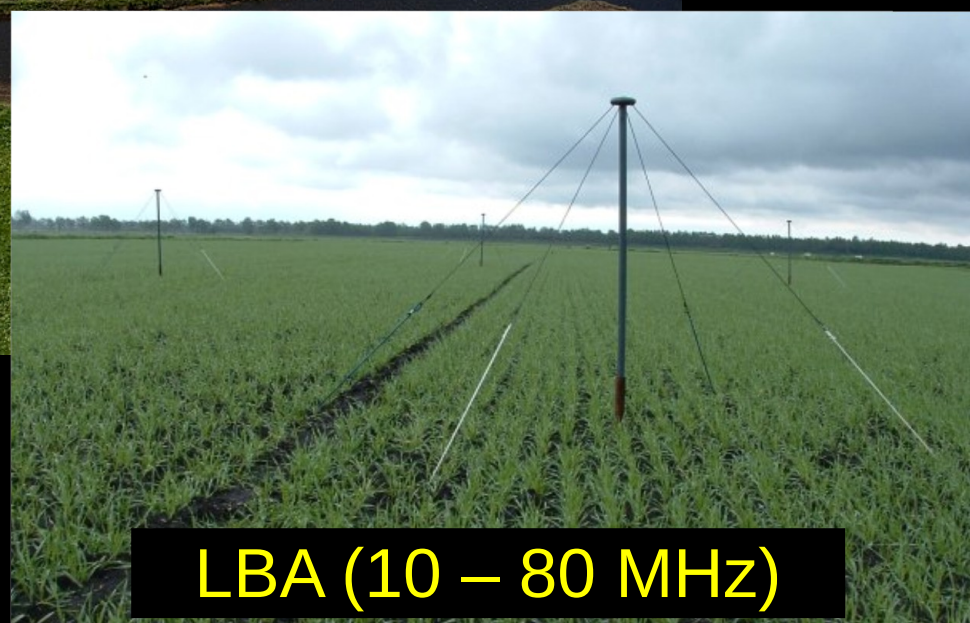


Intenzitet polarizacije na 1.4 GHz

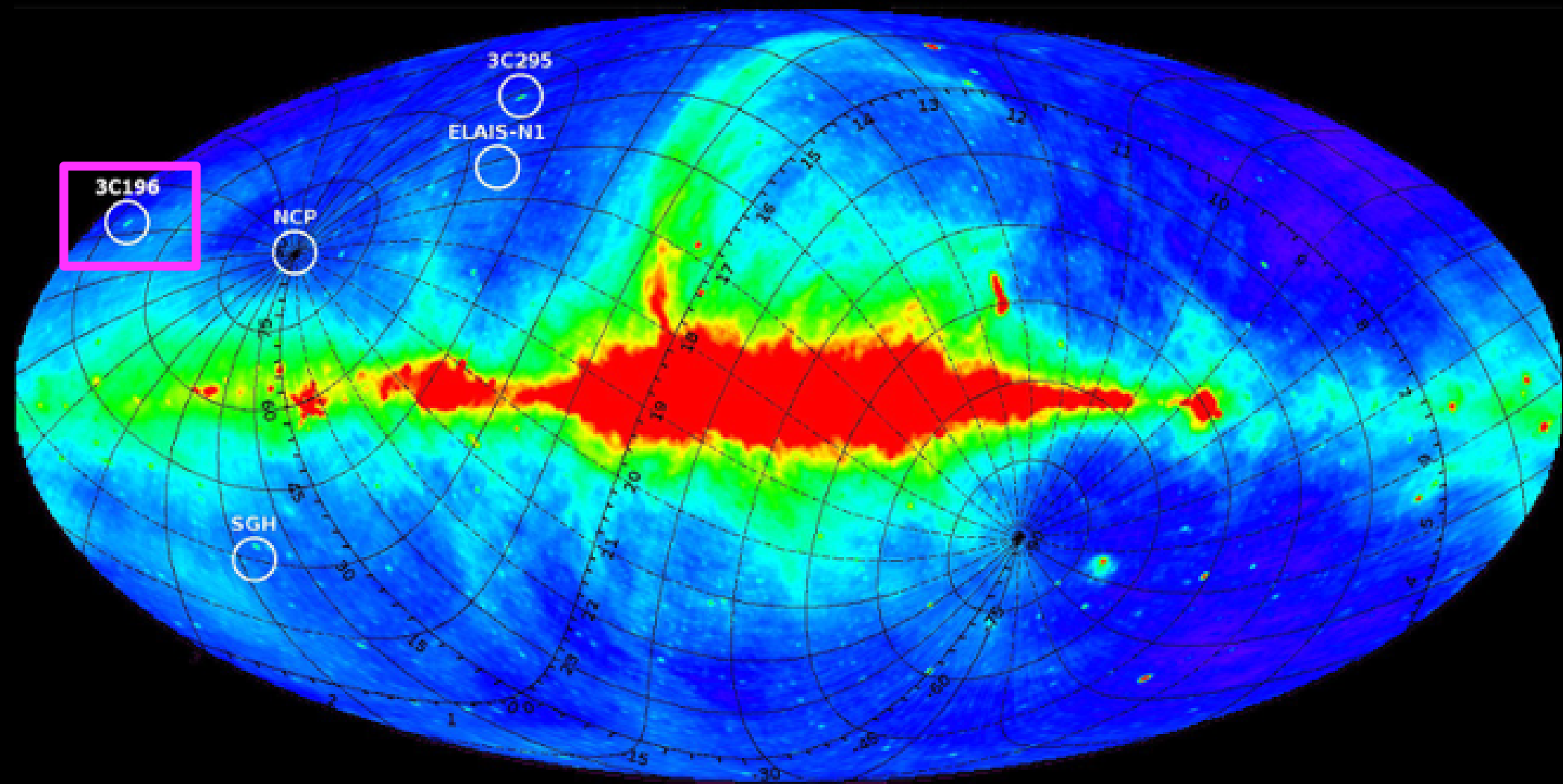
LOFAR (Low Frequency Array)



HBA (120 – 240 MHz)

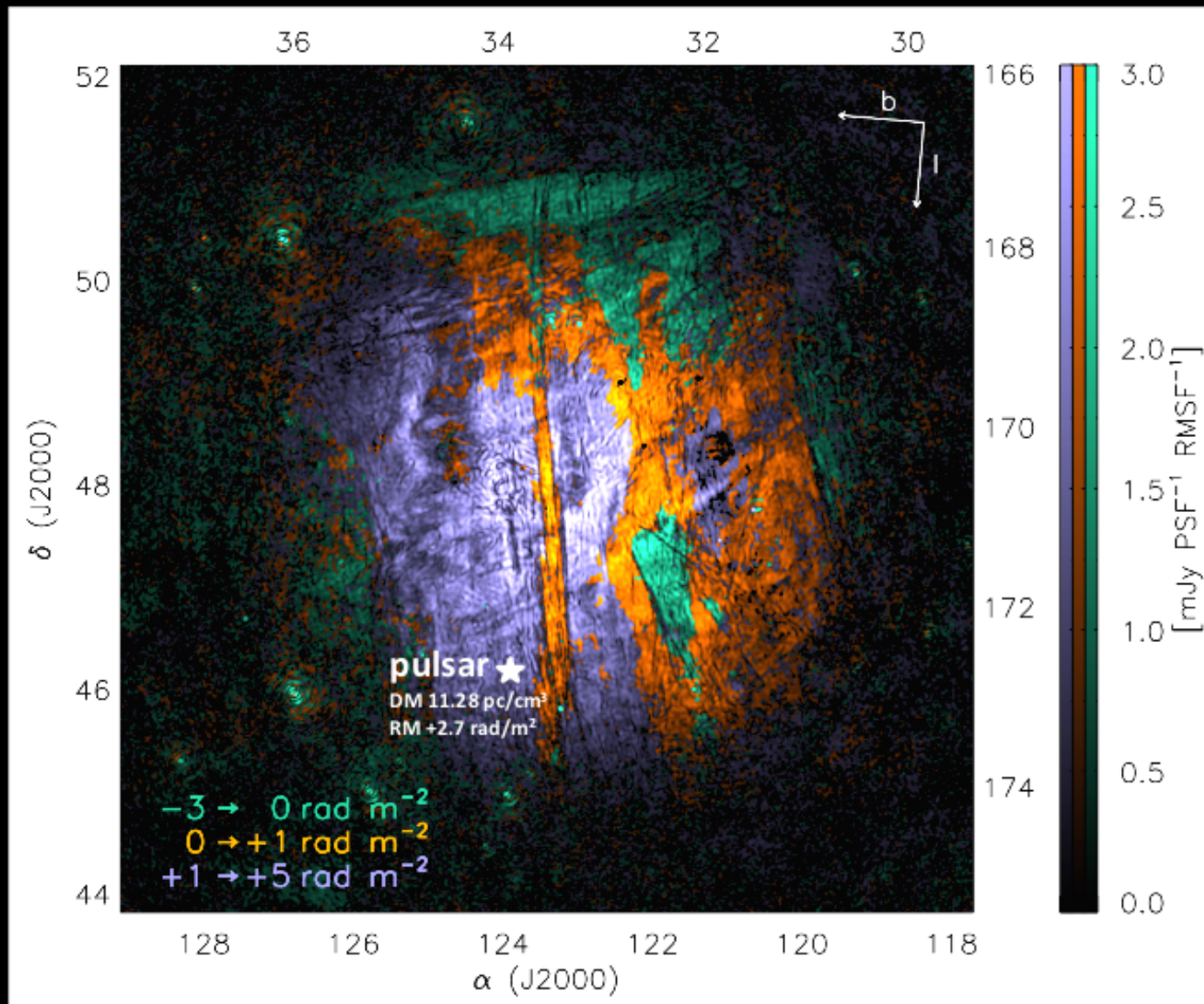


LBA (10 – 80 MHz)



Haslam 408MHz map

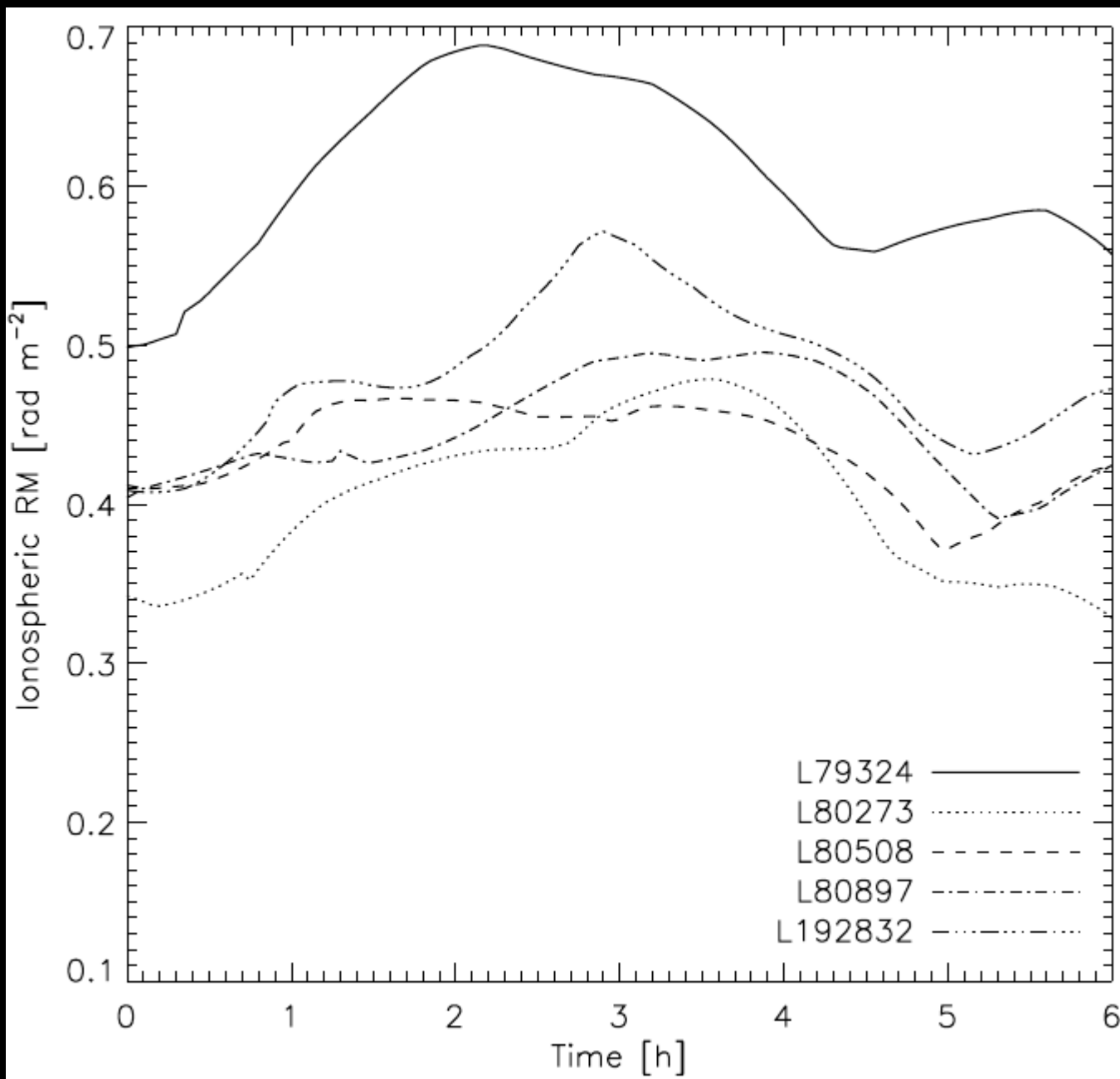
- cilj rada: odrediti vlastito gibanje međuzvjezdane strukture u promatranom polju



Jelic et al., 2015, A&A

2 Podaci

- 2 promatranja vremenski razmaknuta 1 godinu:
 - L80508 (16.12.2012.; trajanje promatranja 8h)
 - L192832 (15.12.2013.; trajanje promatranja 6h)
- HBA DUAL INNER konfiguracija: 48 "baznih stanica" (CS) i 14 "udaljenih stanica" (RS)
- 115 - 175 MHz; 0,2 MHz \longrightarrow 1 rad/m²
- osnovne linije (eng. baselines): 10 – 800 λ \longrightarrow rezolucija 3 lučne minute
- Faradayeva rotacija u ionosferi (efekt koji sada ovisi o vremenu i smjeru) proporcionalna TEC-u (eng. total electron content)
 - \longrightarrow predviđanje RM varijacija u ionosferi koristeći GIM (eng. Global Ionospheric Maps) i WMM (eng. World Magnetic Model)



3 Analiza i rezultati

3.1 RM sinteza

- transformacija linearnog polariziranog zračenja u zračenje kao funkcija Faradayeve dubine koja je definirana kao:

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

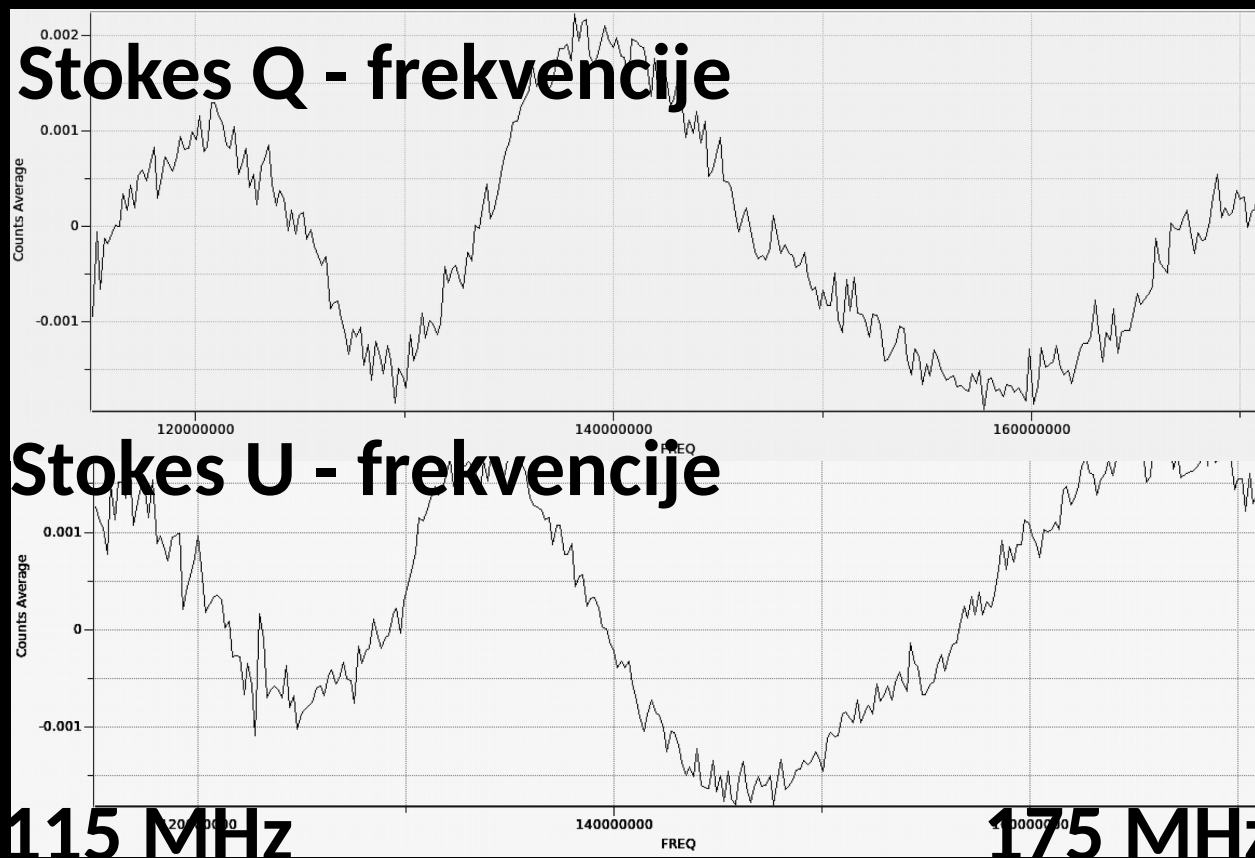
- izmjereni kompleksni intenzitet polarizacije: $P(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2)$

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

- spektralna pojasna širina: $\Delta\lambda^2 \longrightarrow \delta\Phi \approx 2\sqrt{3}/\Delta\lambda^2$

- spektralna rezolucija: $\delta\lambda^2 \longrightarrow \Phi_{\text{max}} \approx \sqrt{3}/\delta\lambda^2$

- minimum spektralne distribucije: $\lambda_{\text{min}}^2 \longrightarrow \Delta\Phi_{\text{scale}} \approx \pi/\lambda_{\text{min}}^2$



- 310 različitih frekvencija u području 115 – 175 MHz
- finalni rezultat su RM kocke dimenzije 1200x1200x201
- raspon Faradayeve dubine od -25 rad/m² do +25 rad/m² uz korake od 0,25 rad/m²
- rezolucija u Faradayevom prostoru definirana širinom RMSF (eng. Rotation Measure Spread Function):

$$\delta\Phi = 0,9 \text{ rad m}^{-2}$$

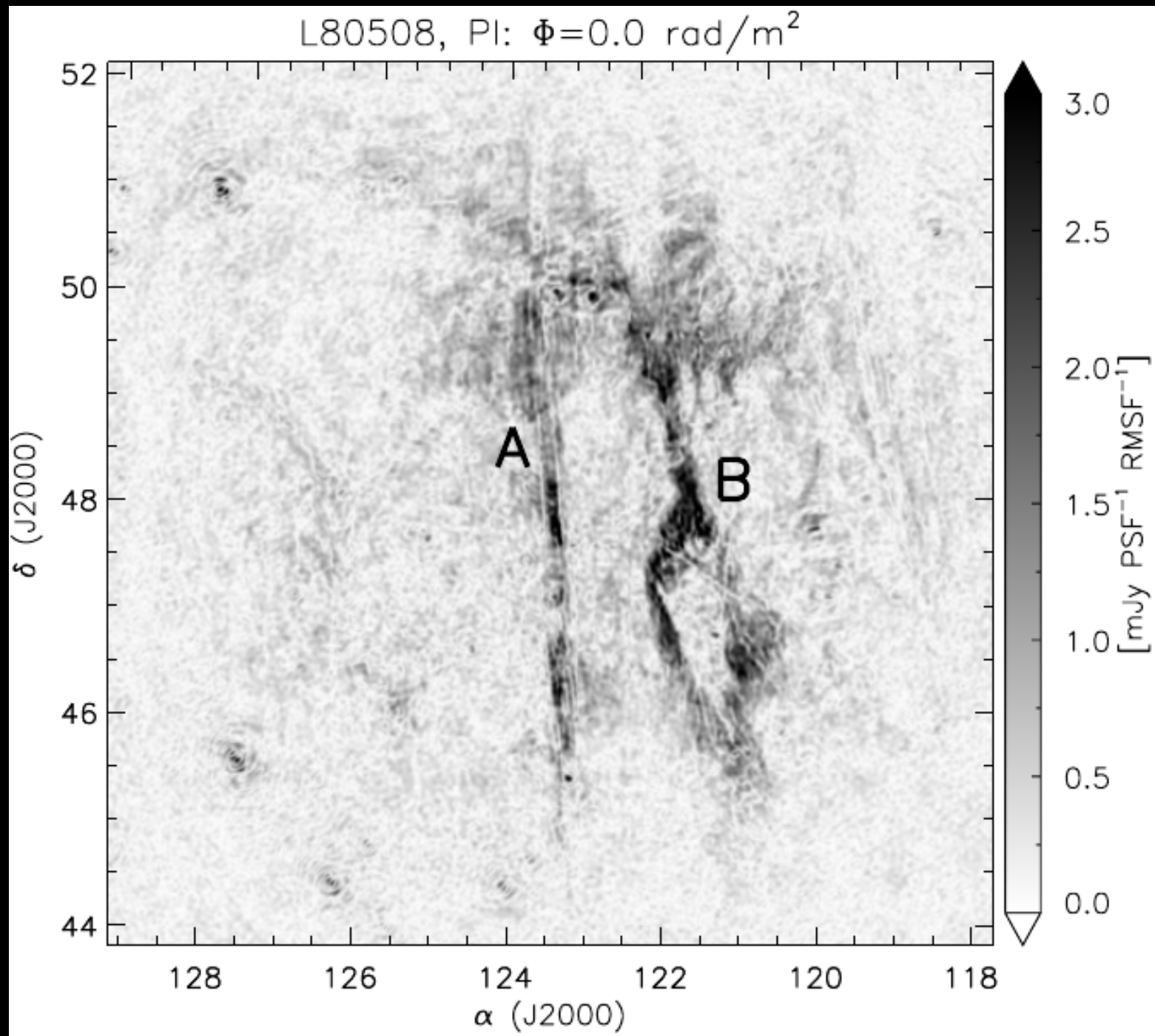
- najveća struktura koja se može detektirati:

$$\Delta\Phi_{\text{scale}} = 1,1 \text{ rad m}^{-2}$$

- možemo detektirati samo tanke Faradayeve strukture:

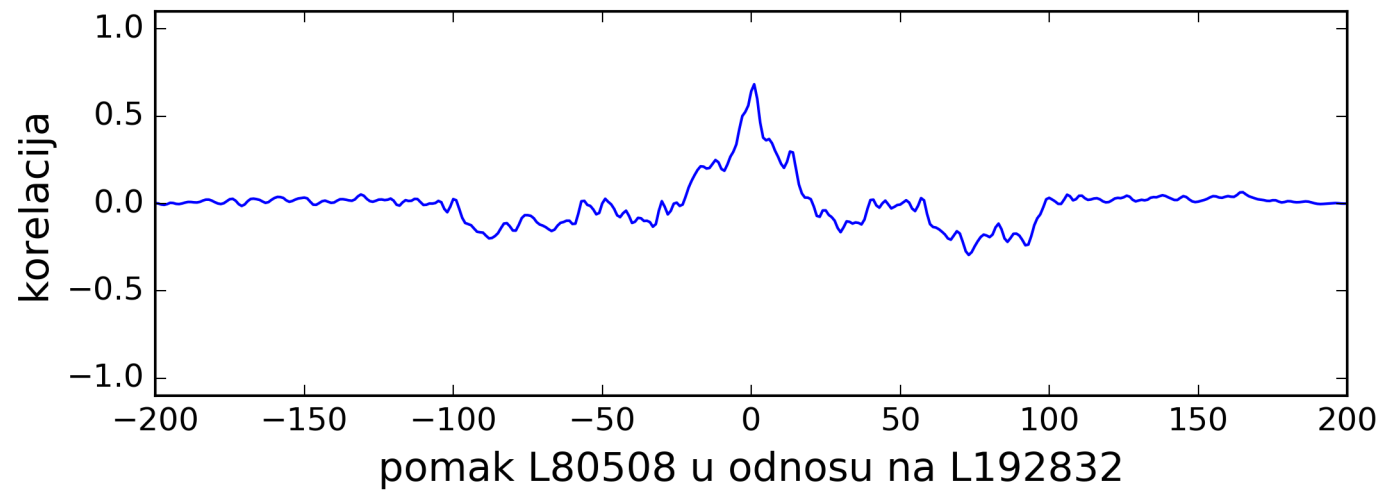
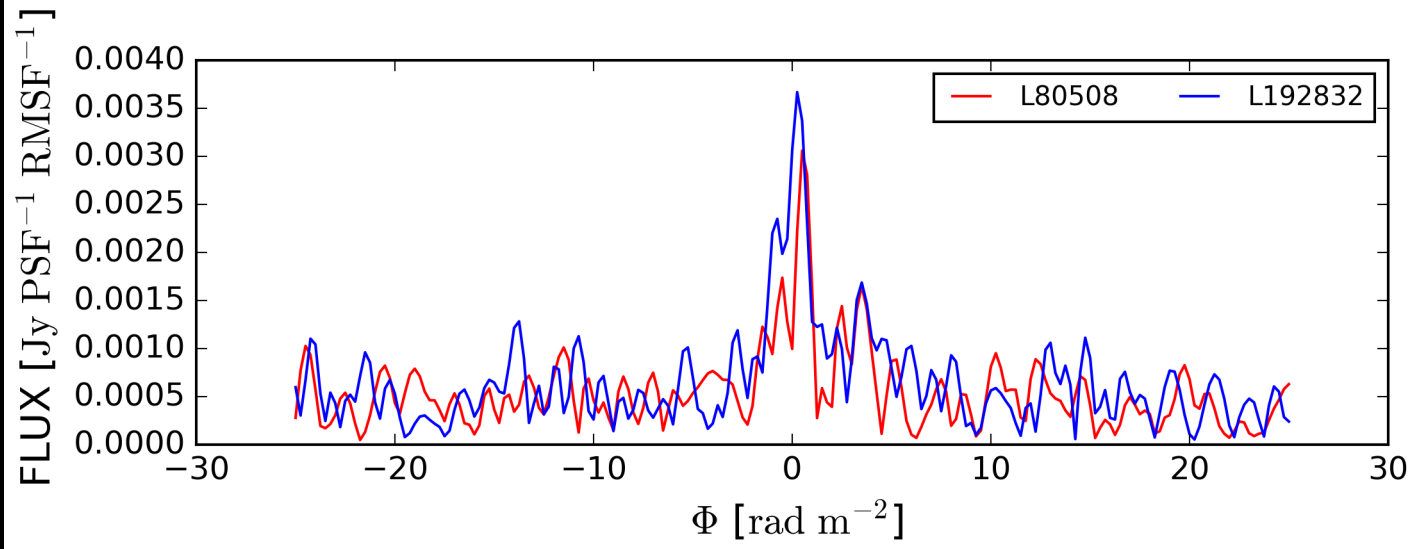
$$\lambda^2 \Delta\Phi_{\text{scale}} \ll 1$$

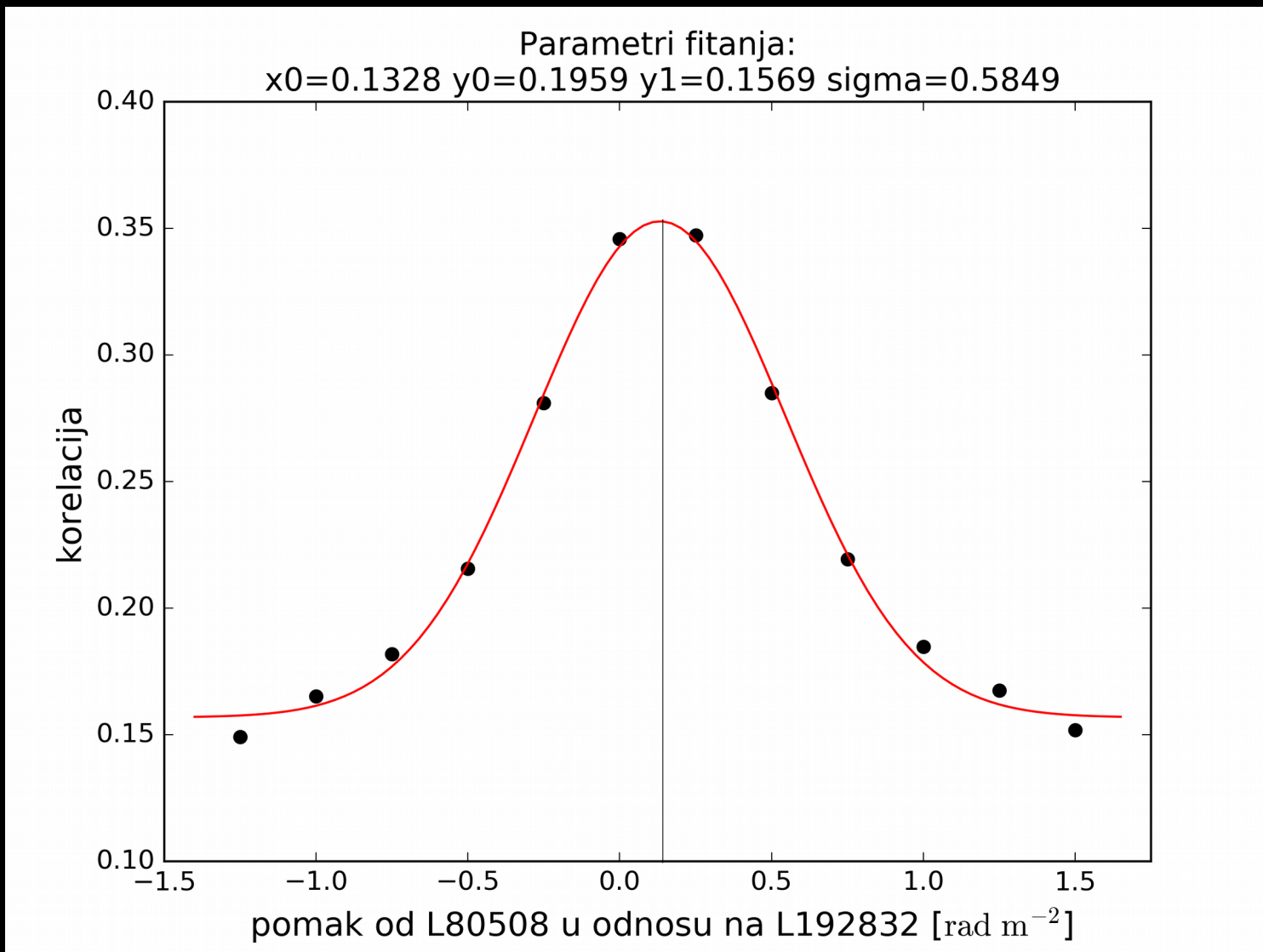
- šum: $71 \mu\text{Jy PSF}^{-1} \text{ RMSF}^{-1}$



3.2 Kalibracija Faradayeve rotacije u ionosferi

- želimo odrediti vlastito gibanje filameta "A" uspoređujući promatranja L80508 i L192832 pa moramo biti sigurni da su strukture koje uspoređujemo na istoj Faradayevoj dubini
- mogući pomak između promatranja zbog različitih uvjeta u ionosferi i instrumentaciji
- računamo korelaciju između dva promatranja kao funkciju pomaka/kašnjenja u Faradayevoj dubini jednog promatranja u odnosu na fiksno drugo pri čemu uzimamo samo one piksele koji duž Faradayeve dubine imaju maksimum fluksa u intenzitetu polarizacije veći od 4 standardne devijacije šuma

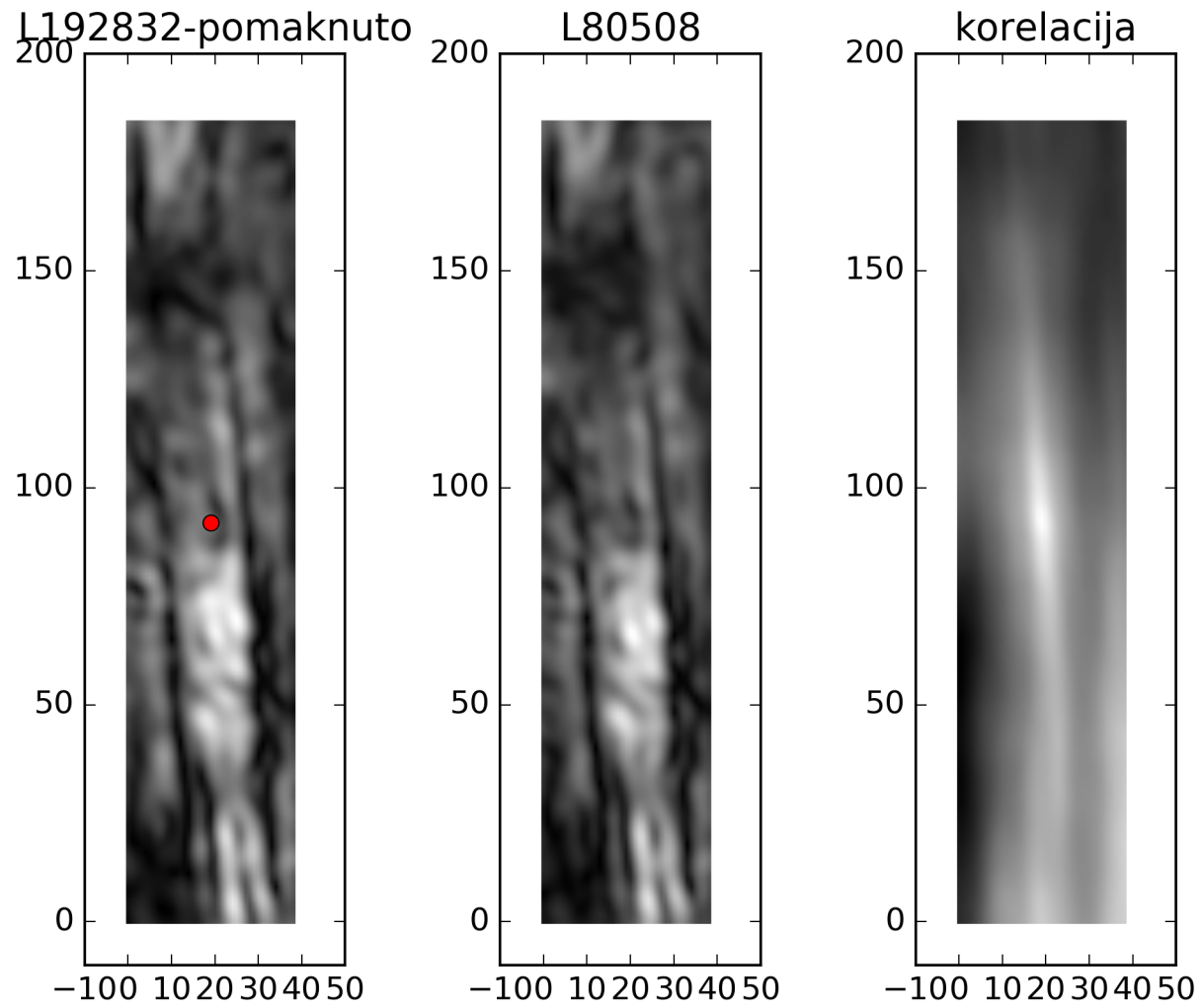


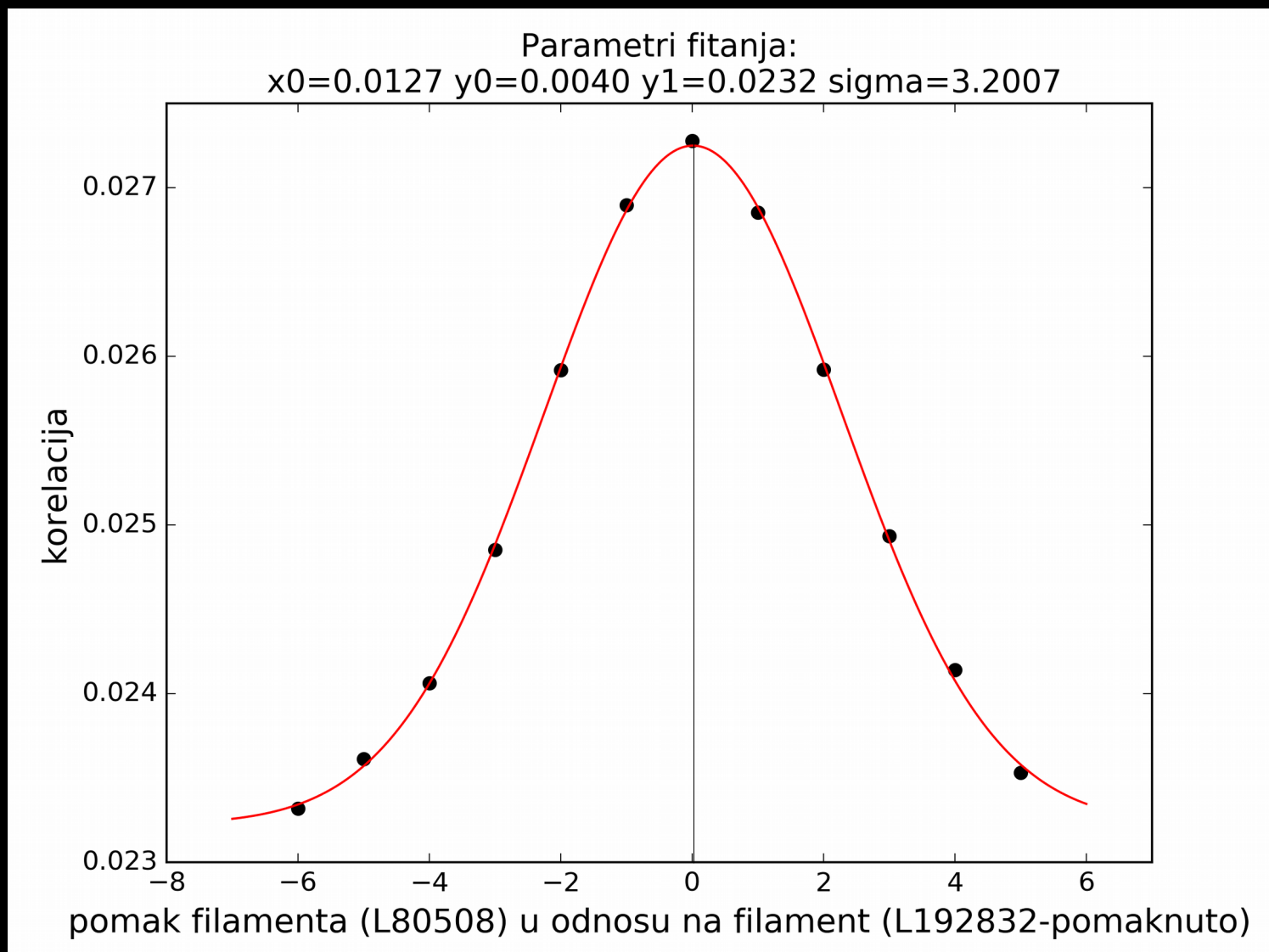


- sljedeći korak je interpolacijom (`scipy.interpolate.UnivariateSpline`) kocku L192832 pomaknuti za $0,1 \text{ rad/m}^2$ u sustav kocke L80508 čime dobivamo "L192832-pomaknuto"

3.3 Postoji li vlastito gibanje filameta?

- 2D pomake na nebu određujemo tako što na određenoj Faradayevoj dubini izdvojimo filament iz L80508 i L192832-pomaknuto i računamo 2D korelaciju (scipy.signal.correlate2d)
- izrezani filament je veličine 185x39 piksela
- zbog oblika filameta (duguljast duž y-osi) očekujemo pomak duž x-osi
- ako je filament na udaljenosti 50 pc s transverzalnom brzinom od 50 km/s, to znači da se pomiče 50×10^{-6} pc/godina što odgovara 0,2" /godina





- ako gledamo pomak po x-osi uzduž cijelog filameta, onda se greška smanjuje kao drugi korijen iz broja piksela na y-osi: $\sqrt{185} \approx 13$
- greška od 3 piksela odgovara grešci od 9 lučnih minuta što nam daje procjenjenu grešku mjerenja u iznosu od 40"

4 Zaključak i planovi za buduća istraživanja

- koristimo LOFAR-ova promatranja polja 3C196
- galaktičko sinkrotronsko zračenje je linearno polarizirano
- Faradayeva rotacija
- za određivanje vlastitog gibanja koristimo 2 promatranja vremenski razmaknuta 1 godinu (L80508 i L192832)
- RM sinteza za transformaciju izmjenjenog zračenja u zračenje kao funkcija Faradayeve dubine
- određivanje pomaka u Faradayevoj dubini između dviju RM kocki korelacijom; interpolacija
- 2D korelacija između filameta veličine 185x39 piksela izrezanog na određenoj Faradayevoj dubini iz L80508 i L192832-pomaknuto
- nema pomaka; procjenjena greška 40"
- potrebno povećati osjetljivost mjerenja koristeći neke druge metode
- sljedeći korak je uzeti 2 promatranja vremenski razmaknuta 5 godina

Hvala na pažnji!