

Polarizirano zračenje radio galaksija na niskim radio frekvencijama

Dario Barišić

Mentor: dr. sc. Vibor Jelić, IRB

29. siječnja 2018.

Uvod

Radio izvori

- Termalni : zračenje crnog tijela (planeti, Mjesec)
- Netermalni : sinkrotronsko zračenje
 - Radio galaksije : jezgra – akrecija materije na supermasivne crne rupe
reповi - relativistički mlazovi materije duž osi rotacije

Sinkrotronsko zračenje

- Zračenje nabijene čestice u magnetskom polju
- Superpozicija kružnog i pravocrtnog gibanja
- Nabijena čestica koja se giba akcelerirano zrači
- Liènard-Wiechertov potencijal

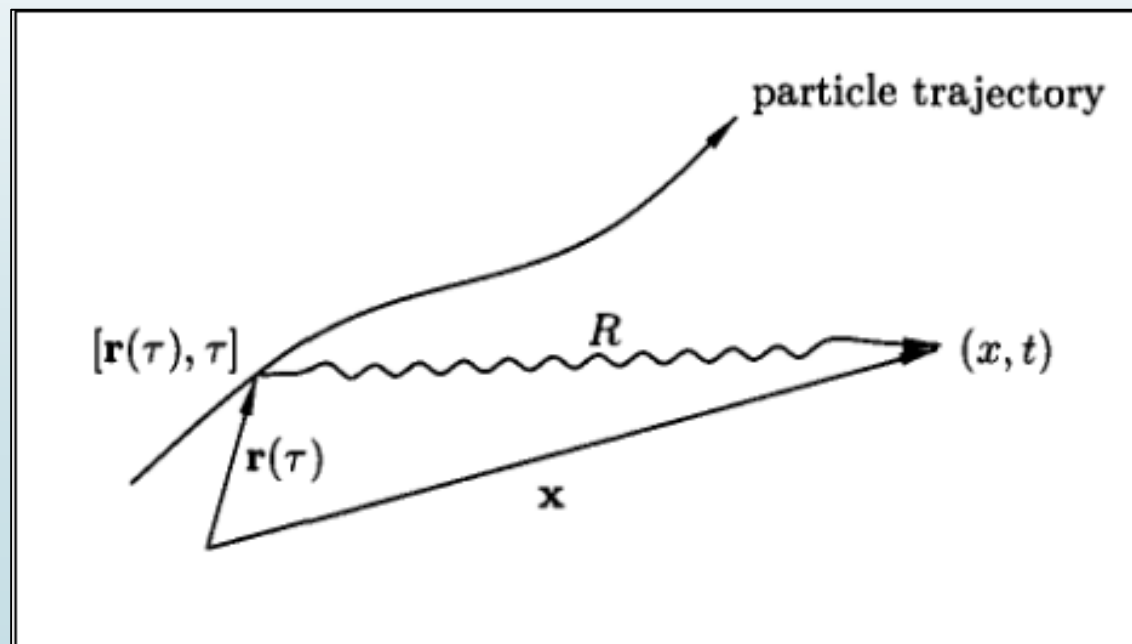
$$\frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = \frac{e}{c}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\omega_B = \frac{eB}{\gamma mc}$$

$$a_{\perp} = \omega_B v_{\perp}$$

$$\begin{pmatrix} \phi \\ \mathbf{A} \end{pmatrix} = \frac{q}{R - \mathbf{R} \cdot \mathbf{v}/c} \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{v}/c \end{pmatrix}$$

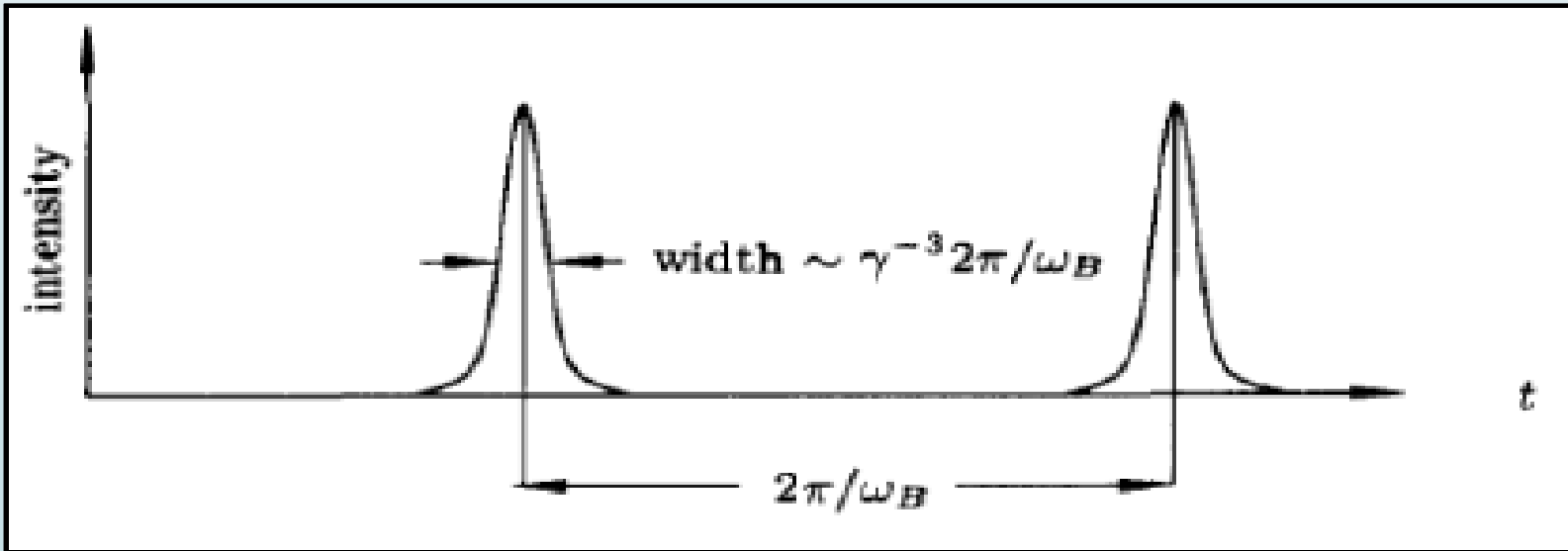
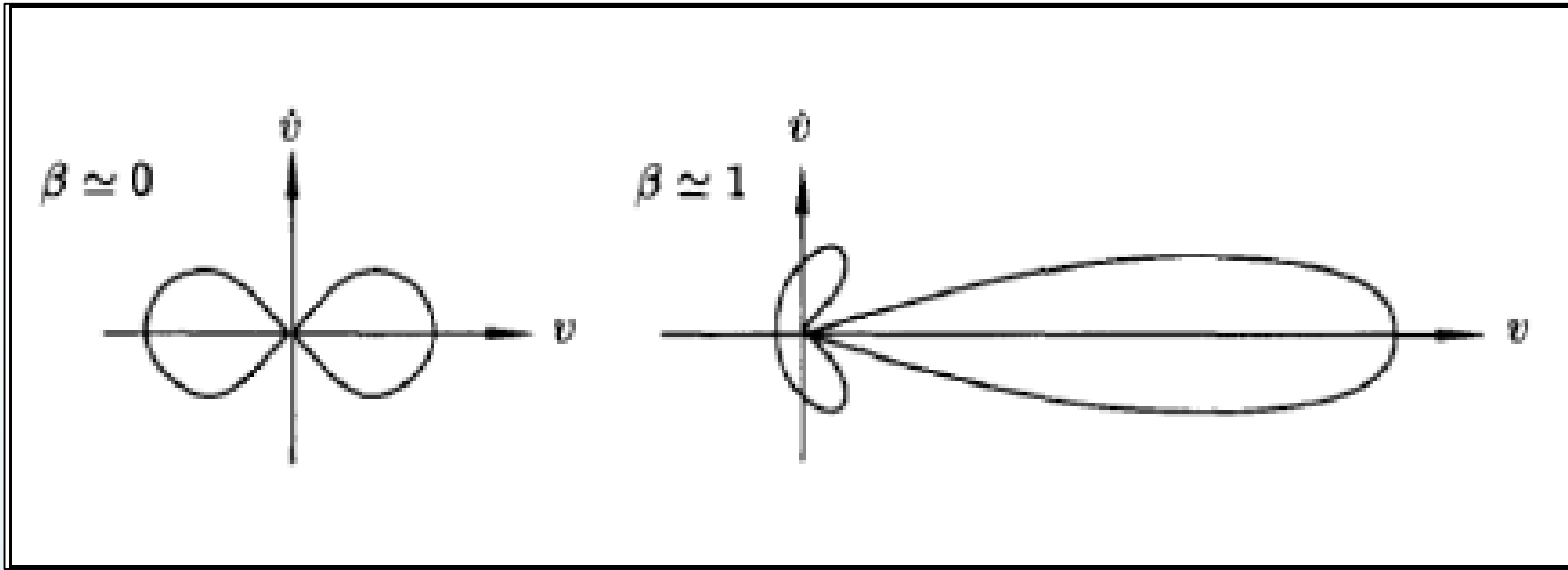
$$\tau + R(\tau)/c = t \quad \mathbf{R} = \mathbf{x} - \mathbf{r}(\tau)$$



- LW potencijal → El. i mag. polje → Snaga po prostornom kutu
- Ako je brzina čestice na z-osi i akceleracija okomita na brzinu

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2 |\dot{\mathbf{v}}|^2}{4\pi c^3} \left[\frac{1}{(1 - \beta \cos \theta)^4} - \frac{(1 - \beta^2) \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)^6} \right]$$

- angularna distribucija snage za relativističke elektrone se koncentrira u mali kut oko smjera gibanja nabijene čestice
- Promatrač vidi zračenje samo kada se nalazi unutar kuta $\Delta\theta \sim \gamma^{-1}$
- Razmaci između pulseva odgovaraju periodu kruženja čestice



- Fourierova analiza pulsa daje frekventnu ovisnost snage zračenja

$$P(\nu) = \sqrt{3} \frac{e^3 B \sin \alpha}{mc^2} \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\nu/\nu_c}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta$$

$$\nu_c = 3/2 \gamma^2 \nu_B \sin \alpha$$

- Polarizacija emitiranog zračenja u nekom trenutku je eliptična
- Vremenski usrednjena polarizacija je linearna

$$p = \frac{G(x)}{F(x)}$$

$$F(x) = x \int_x^{\infty} K_{5/3}(t) dt, \quad G(x) = x K_{2/3} \quad \text{i} \quad x = \nu/\nu_c$$

- Sinkrotronsko zračenje ansambla elektrona

$$\epsilon(\nu) = \int P(\nu, E)N(E)dE$$

$$N(E)dE = KE^{-\delta}dE, \quad E_1 < E < E_2 \quad \rightarrow \text{„Power law” distribucija}$$

- Za homogeno magnetsko polje vrijedi

$$I(\nu) = 0.933a(n)KLB^{n+1} \left(\frac{6.26 \cdot 10^9}{\nu/\text{GHz}} \right)^n \text{ Jyrad}^{-2}$$

$$a(n) = 2^{n-1} \frac{n+5/3}{n+1} \Gamma\left(\frac{3n+1}{6}\right) \Gamma\left(\frac{3n+5}{6}\right)$$

$$n = 1/2(\delta - 1) \quad \rightarrow \text{Spektralni indeks}$$

$$p = (n + 1)/(n + 5/3)$$

Faradayeva rotacija

- Prilikom prolaska polariziranog elektromagnetskog vala kroz međuzvezdanu materiju u prisustvu magnetskog polja dolazi do zakretanja smjera njegove polarizacije

$$\Delta\Phi \sim \left(\frac{\lambda}{m}\right)^2 \int_0^{L/pc} \left(\frac{B_{\parallel}}{\text{Gauss}}\right) \left(\frac{N_e}{\text{cm}^{-3}}\right) d\left(\frac{z}{pc}\right)$$

$$RM = 8.1 \cdot 10^5 \int_0^{L/pc} \left(\frac{B_{\parallel}}{\text{Gauss}}\right) \left(\frac{N_e}{\text{cm}^{-3}}\right) d\left(\frac{z}{pc}\right)$$

→ Faradayeva dubina

Analiza i rezultati

Opazanja i kalibracija

- L80508 mjerenje 3C196 polja, 16.12.2012 pomoću LOFAR-ovih HBA antena
- Između 115 MHz i 189 MHz
- 380 pojaseva širine 195.3125 kHz, svaki pojas podijeljen u 64 kanala
- Integracijsko vrijeme 2 s, ukupno vrijeme promatranja 6 h

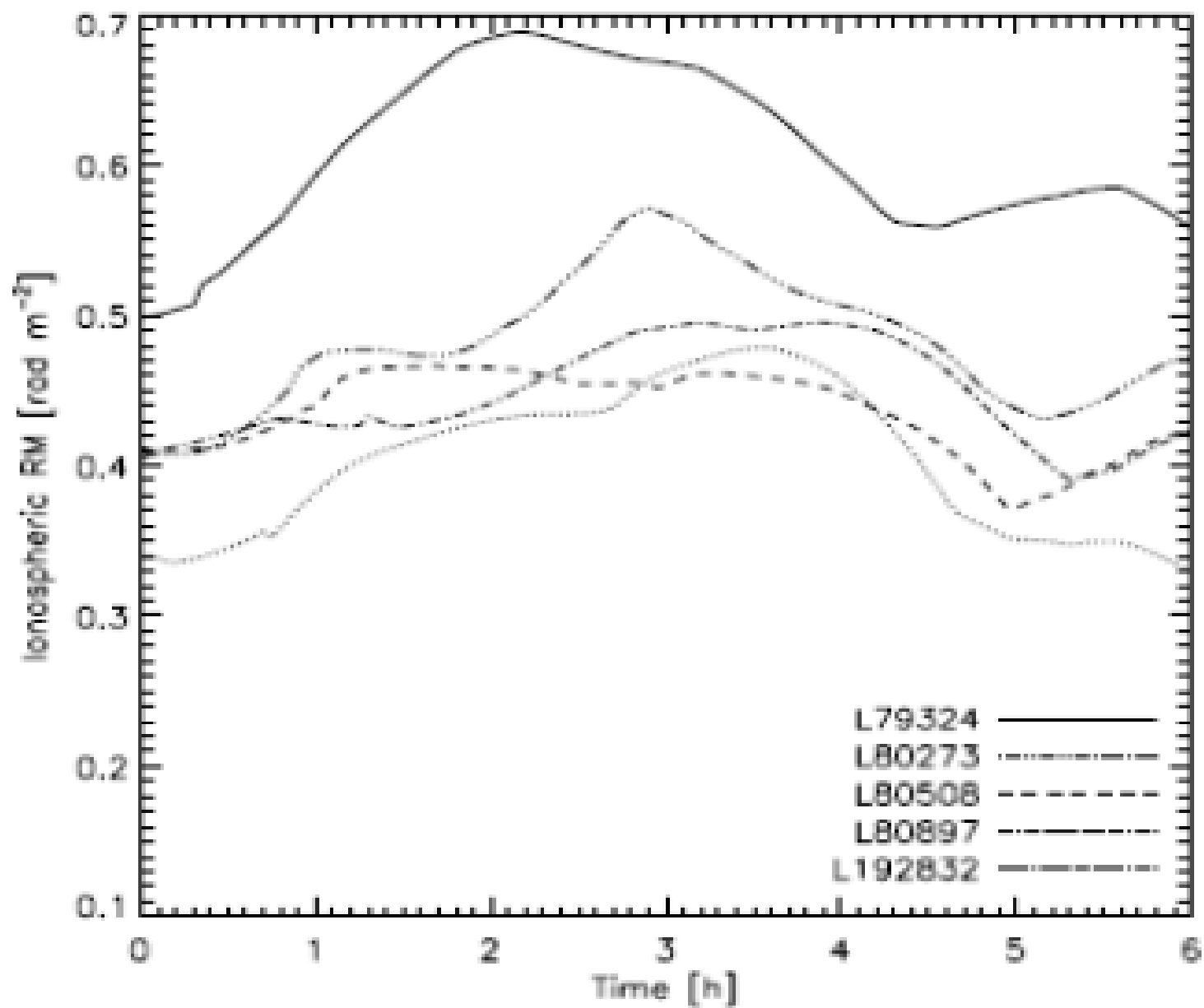


Obrada podataka :

1. Odbacivanje podataka kontaminiranih interferencijama sa zemaljskim izvorima
2. Usrednjavanje podataka po kanalima za svaki pojas posebno
3. Pozicijski neovisna kalibracija
4. Pozicijski ovisna kalibracija

Korekcija za ionosferu

- Postoji pomak u Faradayevoj dubini zbog slobodnih elektrona u ionosferi
- Mjerenjima obavljenim uz pomoć GPS satelita moguća su predviđanja pomaka
- Za L80508 mjerenje pomaci do 1 rad/m^2 u Faraday spektru



Izrada slika

- Izrada slika u svim Stokes parametrima I, Q, U, V
- Rezolucija slika ovisi o korištenim razmacima

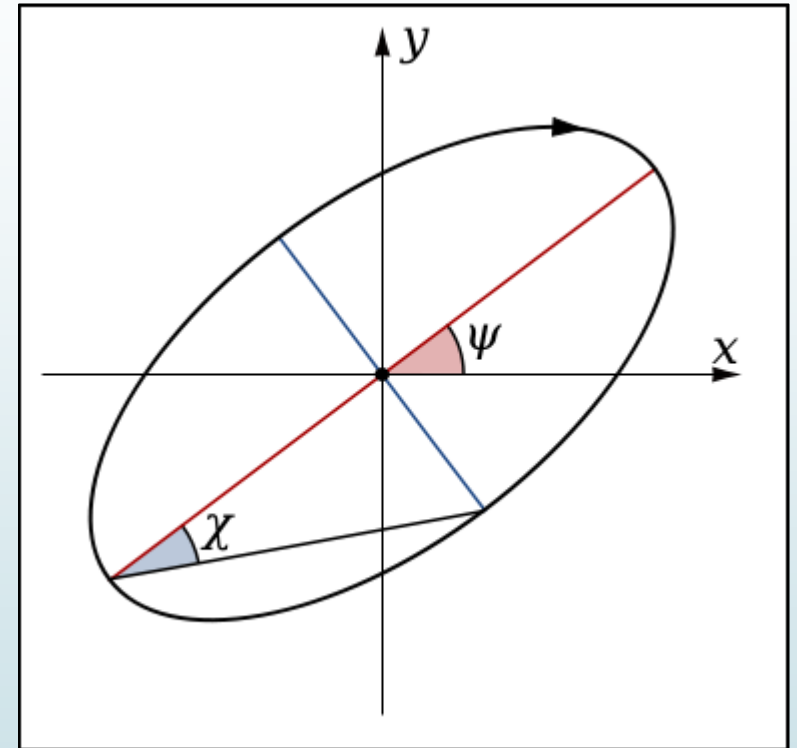
Između antena

$$S_0 = I$$

$$S_1 = Ip \cos 2\psi \cos 2\chi$$

$$S_2 = Ip \sin 2\psi \cos 2\chi$$

$$S_3 = Ip \sin 2\chi$$



RM sinteza

- Uzimamo slike Q i U parametara 310 pojaseva s približnom razinom šuma

$$P = Q + iU \rightarrow \text{Kompleksni ukupni polarizirani intenzitet}$$

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

$F(\Phi) \rightarrow$ Kompleksni polarizirani intenzitet po jedinici F. d.

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

$W(\lambda^2) \rightarrow$ težinska funkcija, različita od 0 samo za valne duljine na kojima postoje mjerenja

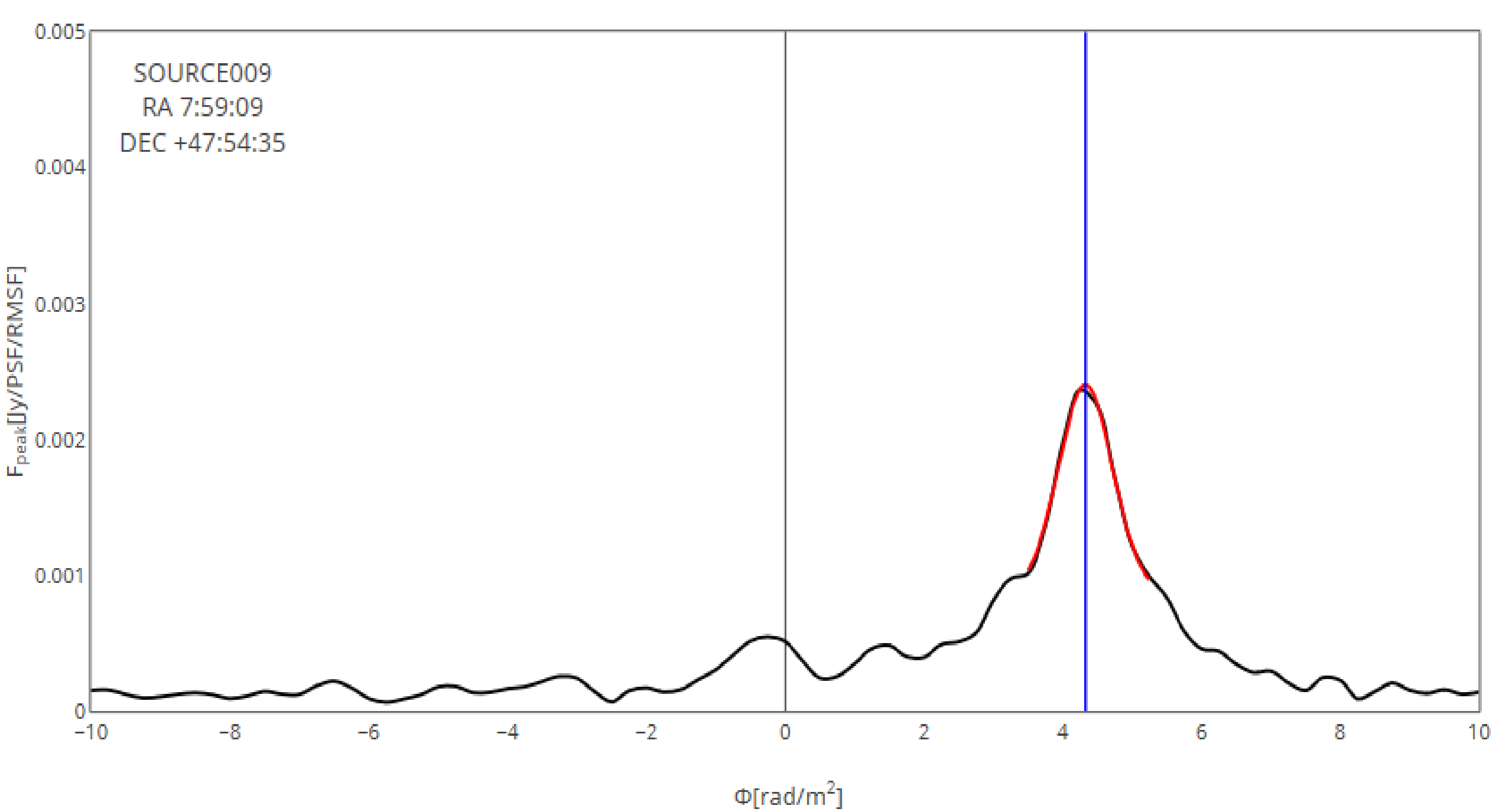
$$K = \left(\int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) d\lambda^2 \right)^{-1}$$

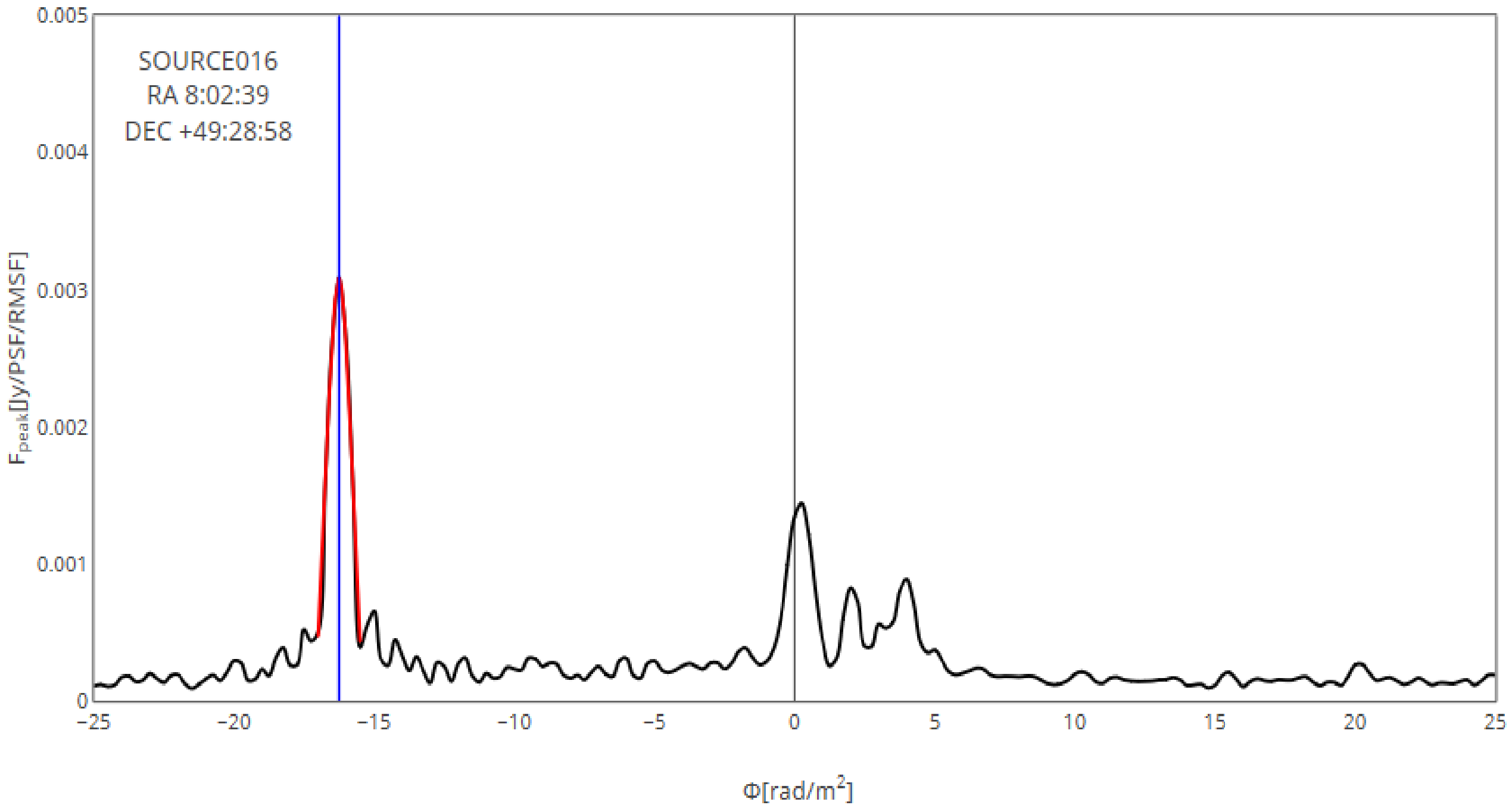
Podaci

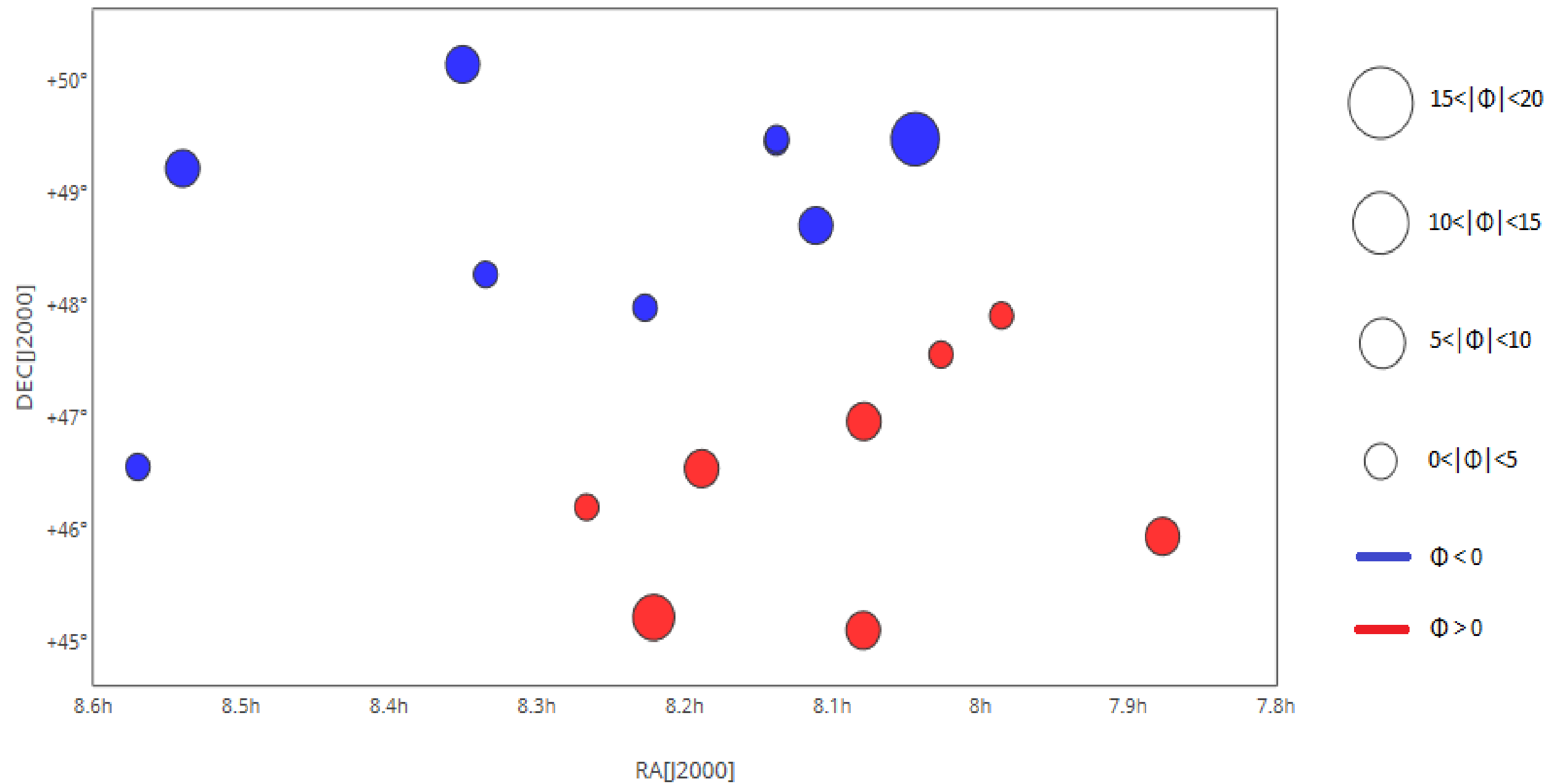
- RM kocke, slike ukupnog polariziranog zračenja za različite F. d.
 1. Od -25 do 25 rad/m², razlučivost 180''
 2. Od -10 do 10 rad/m², razlučivost 60''
- Slika ukupnog intenziteta zračenja, razlučivost 45''
- Katalozi radio izvora na drugim frekvencijama : koordinate, ukupni i polarizirani intenzitet zračenja, veličina izvora (mala i velika os elipse kojom je izvor opisan), Faradayeva dubina
 - NVSS (1.4 GHz), VLSS (74 MHz), WENSS (325 MHz), FIRST (1.4 GHz)

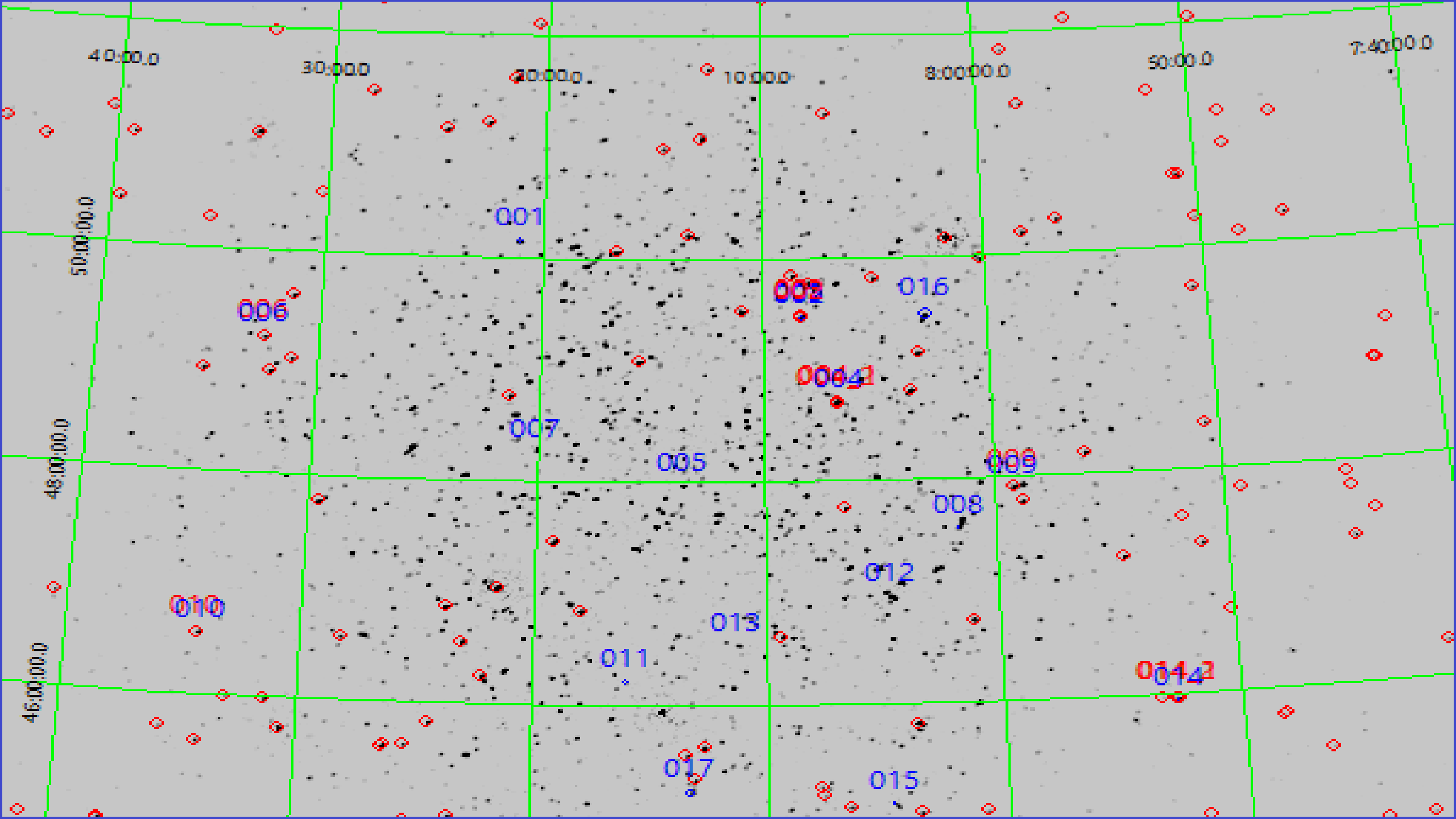
Detekcija radio galaksija

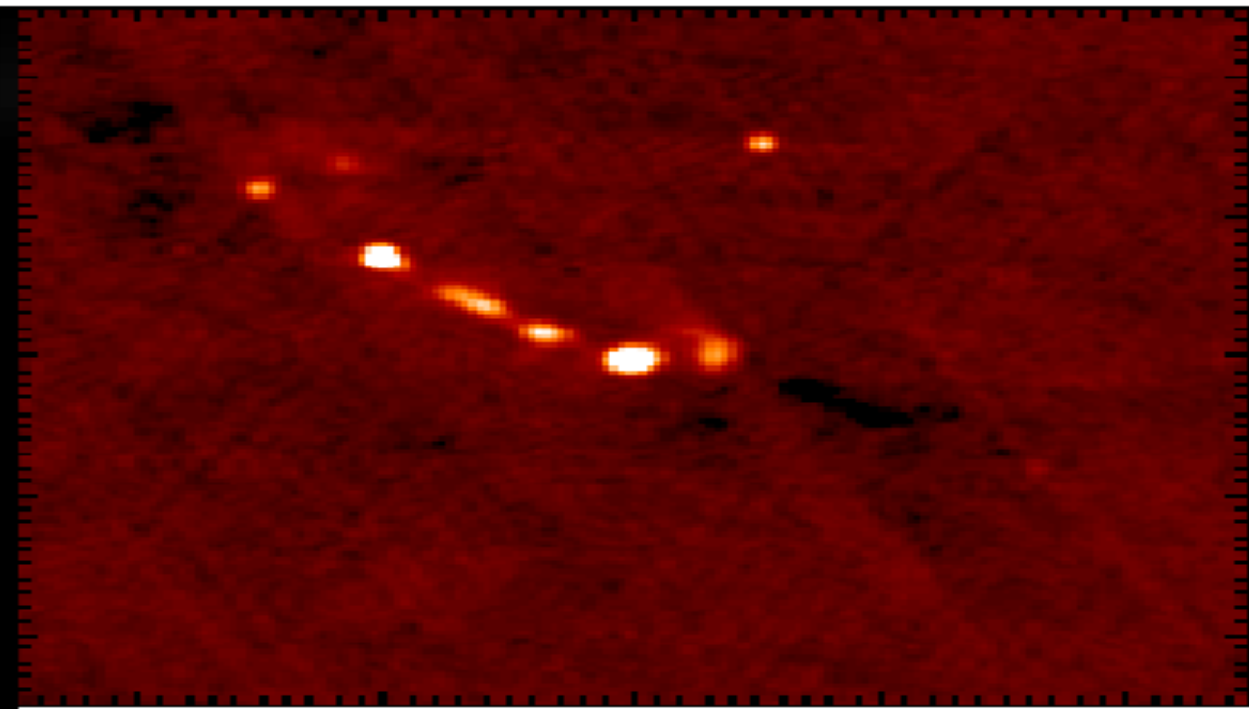
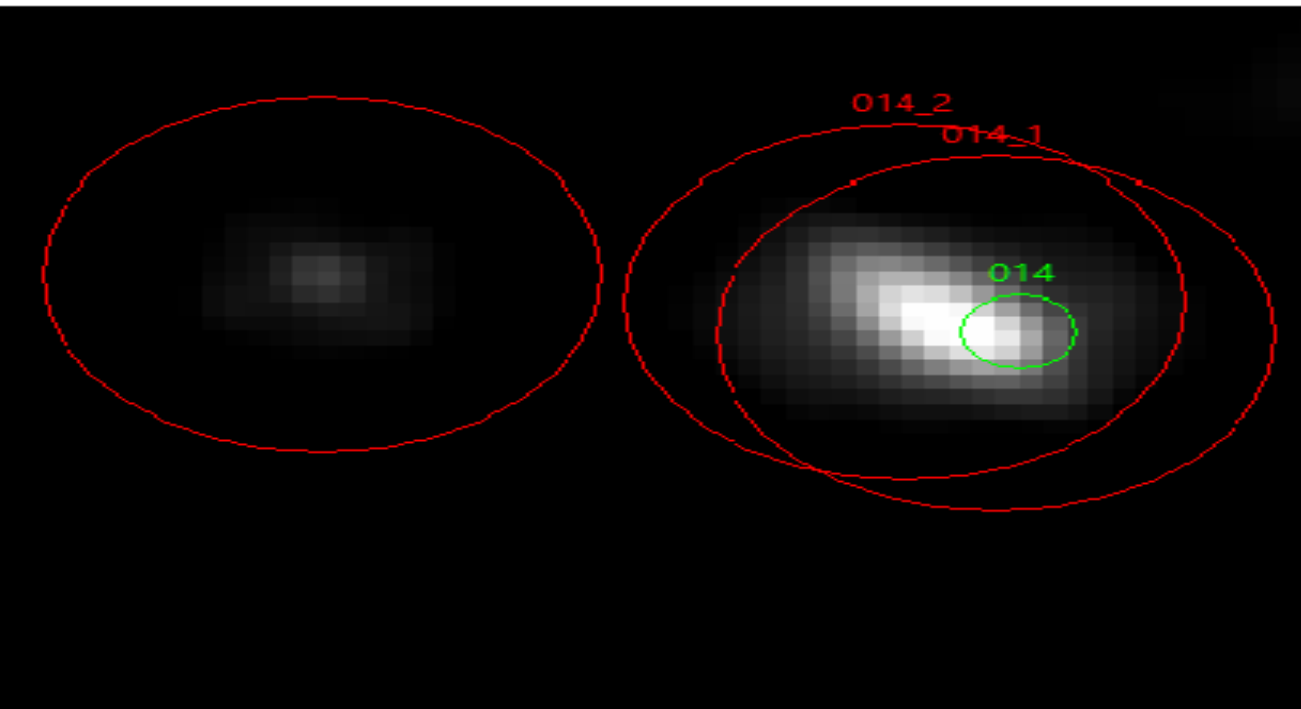
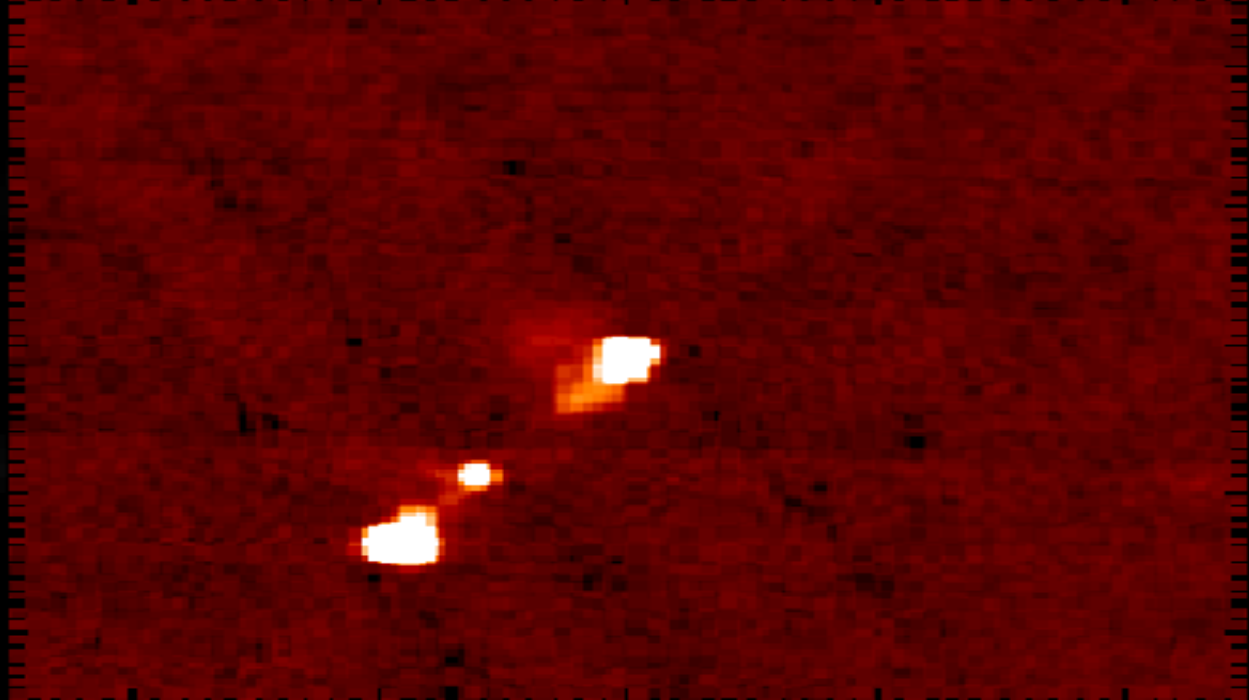
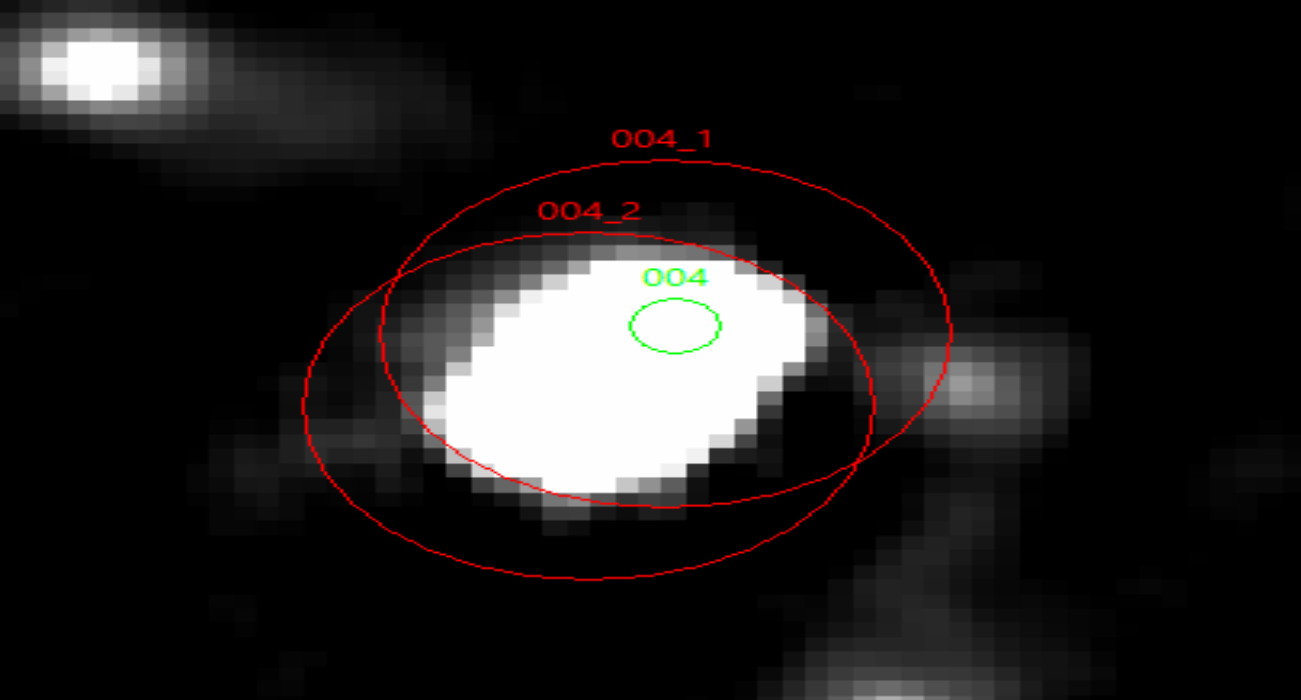
- RM kocke ukupnog polariziranog zračenja i ukupnog zračenja u 3C196 polju vizualizirane pomoću SAOImage DS9
- Dobivanje ovisnosti intenziteta o Faradayevoj dubini za proizvoljnu regiju
- Vrhovi (eng. peaks) u intenzitetu su potencijalni radio izvori
- Pronađeno ukupno 17 izvora





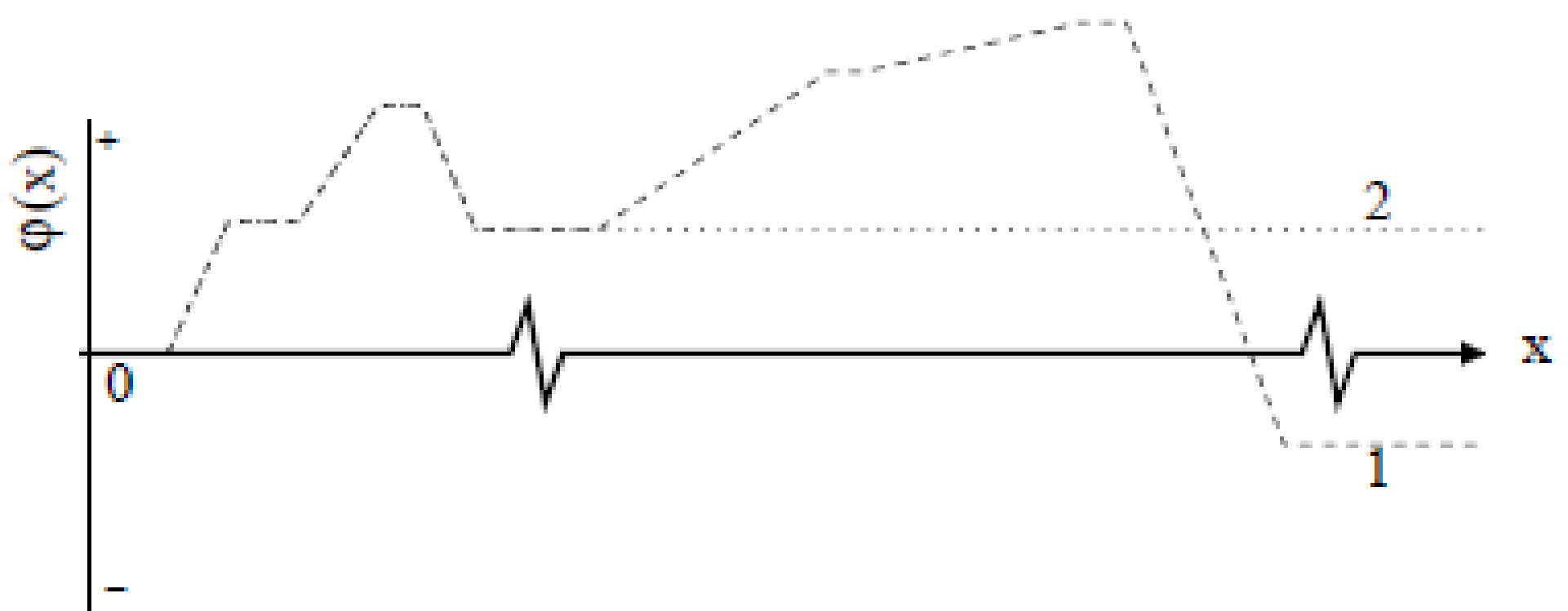
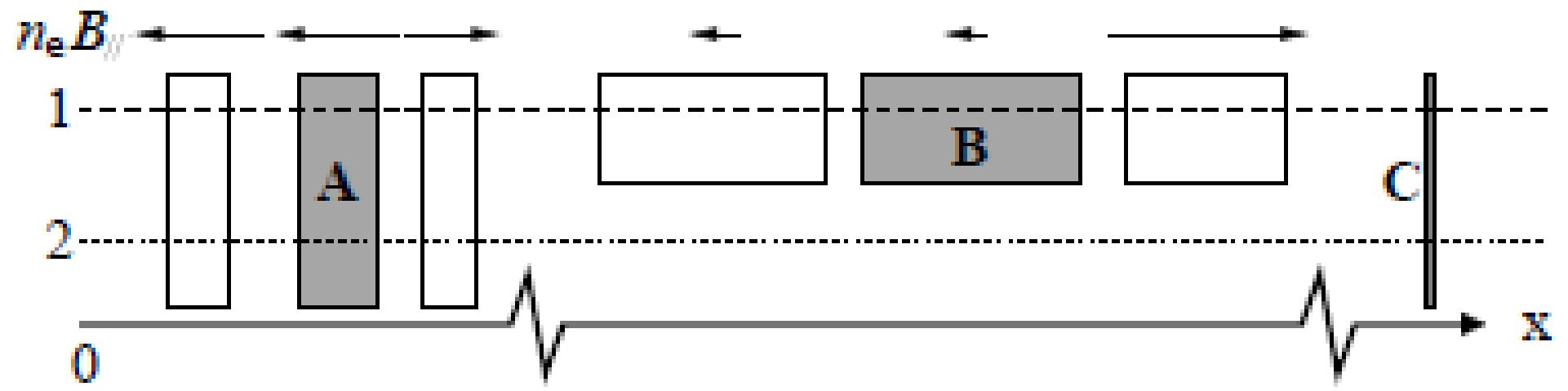




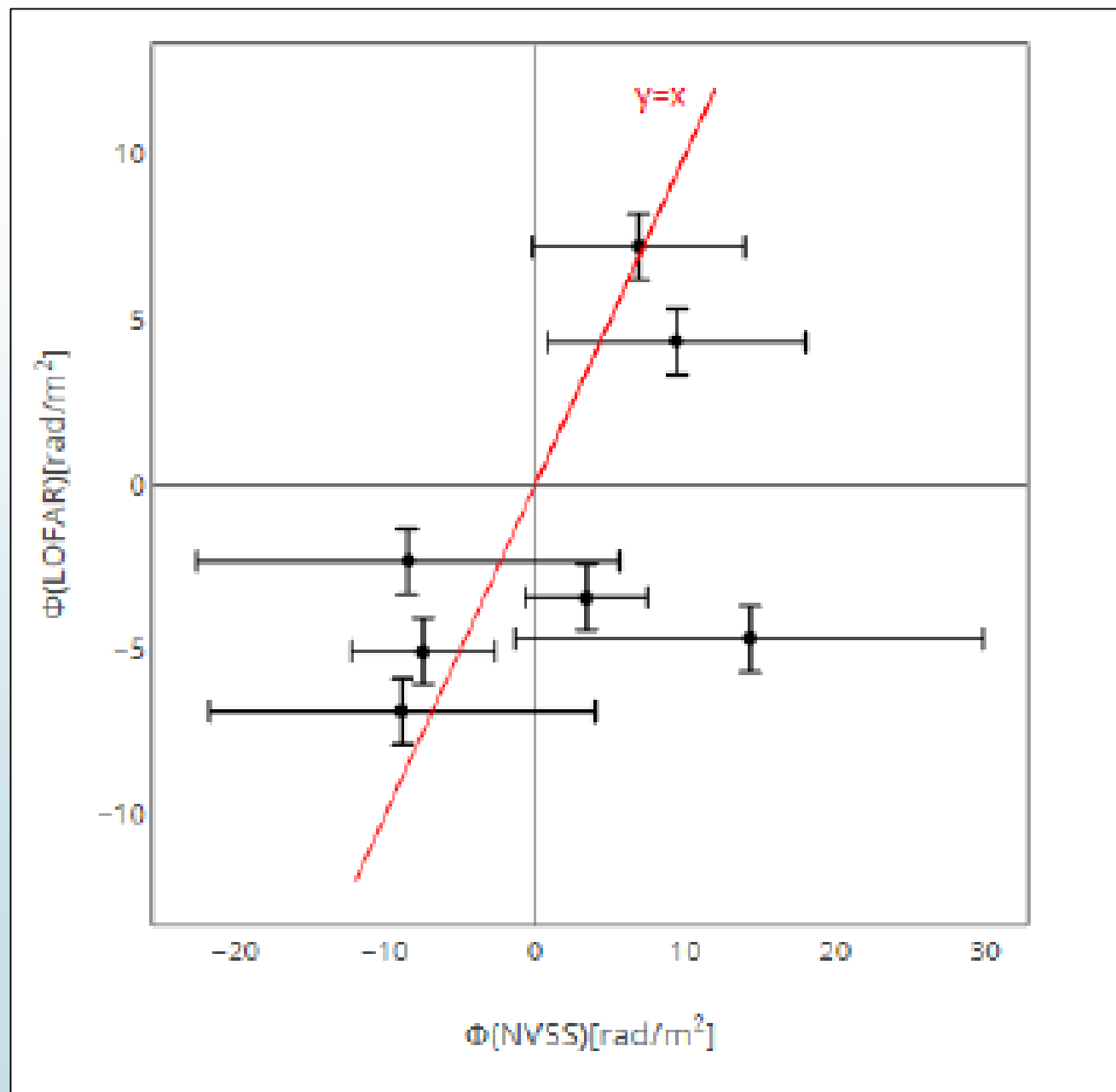


Postotci polarizacije izvora

- Omjer vrijednosti srednjeg polariziranog intenziteta zračenja i srednjeg ukupnog intenziteta zračenja izvora
- Vrijednosti polarizacije naših mjerenja na 150 MHz manja su od NVSS-ovih na 1.4 GHz → **Faradayeva depolarizacija**



IZVOR	RA [J2000]	Dec [J2000]	Φ (LOFAR) [rad/m ²]	F_{peak} (LOFAR) [mJy/PSF/RMSF]	F_{int} (LOFAR) [mJy]	POLARIZACIJA (LOFAR)[%]	Φ (NVSS) [rad/m ²]	F_{peak} (NVSS) [mJy/PSF/RMSF]	F_{int} (NVSS) [mJy]	POLARIZACIJA (NVSS)[%]
001	8:21:01	+50:08:55	-6.13	0.91	126.06	2.66	-----	-----	-----	-----
002	8:08:17	+49:27:37	-4.66	4.84	357.62	5.10	14.3+/-15.6	6.20	109.1	6.16
003	8:08:16	+49:29:11	--3.43	2.83	302.87	1.29	3.4+/-4.1	16.53	122.1	15.16
004	8:06:41	+48:42:44	-6.87	2.61	1318.17	0.34	-8.9+/-12.9	5.70	351.6	1.88
005	8:13:37	+47:58:47	-3.37	1.96	273.22	1.01	-----	-----	-----	-----
006	8:32:23	+49:13:18	-5.07	2.49	72.79	3.42	-7.5+/-4.8	11.45	344.0	3.42
007	8:20:05	+48:16:37	-3.30	1.71	60.82	3.65	-----	-----	-----	-----
008	8:01:36	+47:33:45	4.04	1.65	37.71	7.32	-----	-----	-----	-----
009	7:59:09	+47:54:35	4.33	2.40	280.16	1.31	9.4+/-8.6	7.62	151.2	6.35
010	8:34:12	+46:33:35	-2.32	0.97	29.20	4.79	-8.5+/-14.1	3.81	47.2	8.79
011	8:15:59	+46:12:00	2.73	1.15	6.85	16.79	-----	-----	-----	-----
012	8:04:44	+46:57:53	5.85	0.64	260.31	0.25	-----	-----	-----	-----
013	8:11:19	+46:32:42	5.56	0.61	39.68	1.54	-----	-----	-----	-----
014	7:52:37	+45:56:22	7.22	0.82	31.68	4.55	6.9+/-7.1	11.44	200.6	5.58
015	8:04:46	+45:06:09	6.31	0.54	22.35	4.97	-----	-----	-----	-----
016	8:02:39	+49:28:58	-16.26	3.08	51.21	13.01	-----	-----	-----	-----
017	8:13:16	+45:13:03	14.21	0.99	20.79	6.20	-----	-----	-----	-----



Spektralni indeksi

- Usporedili smo intenzitete radio izvora iz naših mjerenja s intenzitetima u katalogima na drugim frekvencijama
- Za intenzitete dobivene iz LOFAR-ovih mjerenja uračunali smo „primary beam” korekciju
- Primjenili smo linearnu regresiju na $\log I$ - $\log \nu$ ovisnost
- Spektralni indeksi su pozitivni – zračenje nije termalno

IZVOR	RA [J2000]	Dec [J2000]	F_{int} (LOFAR) [mJy]	F_{int} (NVSS) [mJy]	F_{int} (WENSS) [mJy]	F_{int} (VLSS) [mJy]	n
001	8:21:01	+50:08:55	126.06	28.2	116	-----	1.32
002	8:08:17	+49:27:37	357.62	109.1	332	-----	0.83
003	8:08:16	+49:29:11	302.87	122.1	325	-----	0.72
004	8:06:41	+48:42:44	1318.17	351.6	1052	10 890	1.09
005	8:13:37	+47:58:47	273.22	43.9	156	-----	0.83
006	8:32:23	+49:13:18	72.79	344.0	449	-----	0.63
007	8:20:05	+48:16:37	60.82	4.1	43	-----	1.39
008	8:01:36	+47:33:45	37.71	31.5	30	-----	0.57
009	7:59:09	+47:54:35	280.16	151.2	211	1280	0.84
010	8:34:12	+46:33:35	29.20	62.0	222	1350	1.20
011	8:15:59	+46:12:00	6.85	-----	-----	-----	-----
012	8:04:44	+46:57:53	260.31	63.4	252	1240	1.05
013	8:11:19	+46:32:42	39.68	6.9	-----	-----	1.18
014	7:52:37	+45:56:22	31.68	200.6	664	3170	1.11
015	8:04:46	+45:06:09	22.35	56.7	129	830	1.02
016	8:02:39	+49:28:58	51.21	21.9	70	-----	0.99
017	8:13:16	+45:13:03	20.79	20.7	50.9	-----	1.17

Zaključak

- Usporedili smo Faradayeve dubine naših mjerenja sa NVSS-ovim na 1.4 GHz
 - Rezultati se slažu unutar pogrešaka mjerenja
 - Greške u našim mjerenjima su 1 rad/m^2 što je višestruko preciznije od NVSS-a
- Usporedili smo dobivene postotke polarizacije na 150 MHz s NVSS-ovim na 1.4 GHz
 - U prosjeku je polarizacija pri 150 MHz za faktor 1.91 manja od one na 1.4 GHz
 - Takav rezultat je očekivan jer je Faradayeva rotacija proporcionalna kvadratu valne duljine, pa će za niže frekvencije biti veća, čime je i Far. depolarizacija veća
- Izračunali smo spektralne indekse pojedinih izvora
 - Dobiveni spektralni indeksi se kreću između 0.57 i 1.39, s prosjekom od 1.00
 - Spektralni indeksi između -2 i 0 ukazuju na termalno zračenje, dok pozitivne vrijednosti ukazuju na netermalne procese, kao što je sinkrotronsko zračenje