

Radiogalaksije u polju COSMOS

Matković, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:217:223015>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Filip Matković

RADIOGALAKSIJE U POLJU COSMOS

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Filip Matković

Diplomski rad

Radiogalaksije u polju COSMOS

Voditeljica diplomskog rada: prof. dr. sc. Vernesa Smolčić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2021.

Ovaj rad posvećen je mojoj obitelji, bez čije potpore i ljubavi tijekom cijeloga mog studija ovoga ne bi bilo.

Zhvaljujem se mentorici Vernesi Smolčić na pomoći i savjetima u pisanju ovog rada te znanju koje je tokom istraživanja prenijela na mene. Uz to se zahvaljujem Brunu Šlausu na pomoći prilikom instalacija i korištenja programskih alata za obradu podataka.

Sažetak

Sinkrotronsko zračenje dominantno je zračenje u radiovalnom području elektromagnetskog spektra. Proučavanjem sinkrotronskog zračenja radiogalaksija možemo dobiti informaciju o sinkrotronskoj starosti plazme koja čini mlazove i oblake radiogalaksije. Promatramo radiozračenje dvadeset radiogalaksija u polju COSMOS na frekvencijama 610 MHz, 1.4 GHz i 3 GHz opažano radioteleskopima GMRT i VLA. Kao prvi korak u određivanju spektralne starosti izrađujemo mapu spektralnog indeksa i određujemo magnetko polje u oblacima radiogalaksija kako bismo odredili indeks ubrizgavanja, koji opisuje nagib spektra sinkrotronskog zračenja nove plazme. Poznavanjem magnetskog polja i indeksa ubrizgavanja, koristeći različite modele spektralne starosti određujemo spektralnu starost oblaka radiogalaksija. Zaključujemo da područje oblaka radiogalaksije s plazmom manje energije i većeg nagiba spektra zračenja ima veću spektralnu starost. Koristeći metodu Voronoi teselacije i podatke rendgenskog zračenja opaženog svemirskim teleskopom XMM-Newton analizirali smo gustoću galaktičkog susjedstva i istražili rendgensko zračenje međugalaktičkog plina oko radiogalaksija. Dobiveni rezultat na temelju analiziranog uzorka radiogalaksija ukazuje na to da se samo dio radiogalaksija, a ne sve, nalaze u grupama galaksija. Za detaljniju analizu potreban je uzorak većeg broja galaksija i opažanja sinkrotronskog zračenja visoke razlučivosti na većem broju frekvencija kako bismo bolje proučili spektralnu starost radiogalaksija i proučili mogućnost utjecaja kozmičke okoline na spektralnu starost.

Ključne riječi: sinkrotronsko zračenje, radiogalaksija, plazma, spektralni indeks, magnetsko polje, indeks ubrizgavanja, spektralna starost, Voronoi teselacija, rendgensko zračenje, jato galaksija

Radio galaxies in the COSMOS field

Abstract

Synchrotron radiation is the dominant radiation in the radio wavelength range of the electromagnetic spectrum. By studying the synchrotron radiation of radio galaxies, we can obtain information about the synchrotron age of the plasma that makes up the jets and lobes of the radio galaxy. We observe the radio emission of twenty radio galaxies in the COSMOS field at frequencies of 610 MHz, 1.4 GHz and 3 GHz observed by the GMRT and VLA radio telescopes. As a first step in determining the spectral age, we construct a spectral index map and determine the magnetic field in the lobes of radio galaxies to determine the injection index, which describes the slope of the synchrotron radiation spectrum of the new plasma. By knowing the magnetic field and the injection index, using different spectral age models we determine the spectral age of radio galaxy lobes. We conclude that in the sample considered the region of radio galaxy lobe with a lower energy plasma and higher slope of radiation spectrum has a higher spectral age. Using the Voronoi tessellation method and X-ray data observed by the XMM-Newton space telescope, we analyzed the density of the galactic neighborhood and investigated the X-ray radiation of intergalactic gas around radio galaxies. The obtained result based on the analyzed sample of radio galaxies indicates that only a part of radio galaxies, and not all, are found in galaxy groups. For a more detailed analysis it is required to have a larger sample of radio galaxies and observations of synchrotron radiation at high resolution at a larger number of frequencies in order to better study the spectral age of radio galaxies and to study the possibility of the cosmic environment influencing the spectral age.

Keywords: synchrotron radiation, radio galaxy, plasma, spectral index, magnetic field, injection index, spectral age, Voronoi tessellation, X-ray radiation, galaxy cluster

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Radiogalaksije	1
1.1.1	Morfologija radiogalaksija	1
1.1.2	Sinkrotronsko zračenje	2
1.1.3	Fanaroff-Riley klasifikacija	4
1.2	Jata galaksija	5
1.2.1	Rendgensko zračenje jata galaksija	6
1.3	Spektralno starenje	7
1.3.1	Spektralni indeks i indeks ubrizgavanja	7
1.3.2	Spektralna starost	8
2	Ciljevi rada	10
3	Podaci	11
3.1	Pregled neba COSMOS	11
3.1.1	Radiozračenje galaksija u polju COSMOS	11
3.1.2	Rendgensko zračenje u polju COSMOS	12
3.2	Uzorak radiogalaksija u polju COSMOS	13
3.3	Katalozi galaksija i grupa galaksija u polju COSMOS	14
4	Metodologija	15
4.1	Priprema slika radiogalaksija	15
4.2	Učitavanje slika i postavljanje regija radioizvora	15
4.3	Izrada mape spektralnog indeksa	16
4.4	Određivanje magnetskog polja	16
4.5	Određivanje indeksa ubrizgavanja	17
4.6	Izrada mape spektralne starosti	18
4.6.1	Model spektralne starosti uz konstantno magnetsko polje	18
4.6.2	Model spektralne starosti uz neuniformno magnetsko polje	20
4.6.3	Prilagodba modela spektralne starosti	20
4.7	Dijagrami Voronoi teselacije	22
4.7.1	Kriterij povećane gustoće naseljenosti galaksija	22
4.7.2	Rendgensko zračenje i jata galaksija	23

5	Rezultati	24
5.1	Radiogalaksija 44	24
5.2	Radiogalaksija 177	27
5.3	Radiogalaksija 187	31
5.4	Radiogalaksija 10900	34
5.5	Radiogalaksija 10901	37
5.6	Radiogalaksija 10902	41
5.7	Radiogalaksija 10904	44
5.8	Radiogalaksija 10910	47
5.9	Radiogalaksija 10913	51
5.10	Radiogalaksija 10914	55
5.11	Radiogalaksija 10916	58
5.12	Radiogalaksija 10918	61
5.13	Radiogalaksija 10919	65
5.14	Radiogalaksija 10923	68
5.15	Radiogalaksija 10928	72
5.16	Radiogalaksija 10933	76
5.17	Radiogalaksija 10935	79
5.18	Radiogalaksija 10936	82
5.19	Radiogalaksija 10953	86
5.20	Radiogalaksija 10959	90
6	Rasprava	94
6.1	Spektralni indeks	94
6.2	Magnetsko polje u oblacima radiogalaksije	95
6.3	Indeks ubrizgavanja	96
6.4	Spektralna starost radiogalaksije	97
6.5	Kozmička okolina radiogalaksije	100
6.6	Radiogalaksije između $z = 0.34$ i $z = 0.53$	101
6.7	Radiogalaksije između $z = 0.83$ i $z = 0.99$	102
6.8	Radiogalaksije između $z = 1.16$ i $z = 1.49$	102
6.9	Radiogalaksije između $z = 1.6$ i $z = 2.24$	103
7	Zaključak	104

1 Uvod

1.1 Radiogalaksije

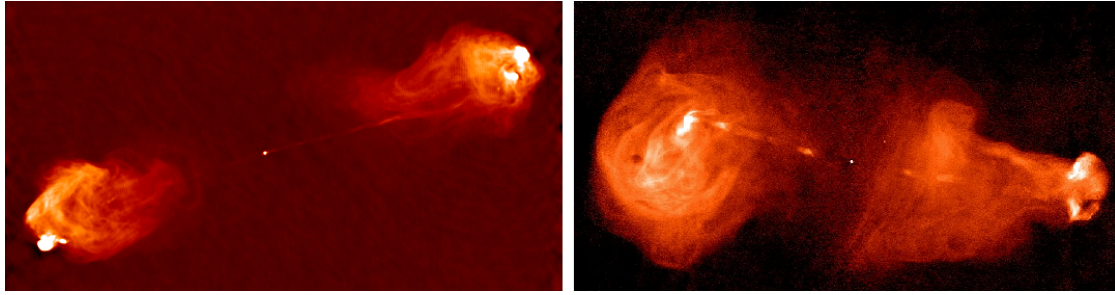
Aktivne galaktičke jezgre (eng. *active galactic nucleus* - AGN) neke su od najsnažnijih i najsvjetlijih astrofizičkih objekata u svemiru. One čine središte galaksije koje sadrži supermasivnu crnu rupu koja privlači okolni materijal koji intenzivno zrači dok upada u crnu rupu [24]. Luminozitet AGN-a ponekad može biti mnogo veći od luminoziteta ostatka galaksije i može varirati u kratkim vremeskim razmacima (od nekoliko sati do više dana). Zračenje AGN-ova, za koje se pretpostavlja da dolazi od akrecije materijala oko supermasivne crne rupe, može se detektirati u širokom rasponu elektromagnetskog spektra, od radiovalnog zračenja pa sve do gama zračenja.

Radiogalaksije čine podvrstu galaksija s aktivnom galaktičkom jezgrom koje su sjajne u radiovalnom području elektromagnetskog spektra [23,24]. One su uglavnom masivne eliptične galaksije koje često pronalazimo u području nekog jata galaksija. Radiogalaksije su vrlo pogodne za opažanje jer se mogu detektirati relativno kratkim vremenom ekspozicije na vrlo velikim udaljenostima.

1.1.1 Morfologija radiogalaksija

Morfologija radiogalaksija karakterizirana je trima strukturnim elementima [23,24]:

- središnja jezgra (eng. *core*) – područje neposredno oko supermasivne crne rupe. Radiozračenje koje opažamo u ovom području dolazi od akrecijskog materijala koji kruži oko crne rupe, ali i od crpljenja rotacijske energije crne rupe (Blandford-Znajek mehanizam [1]) koja rotira oko svoje osi.
- mlazovi (eng. *jets*) – uske i dugačke strukture koje se šire od polova središnje jezgre prema van. Fizikalno, mlaz čini plazma sastavljena od relativističkih nabijenih čestica (pretežno mješavina elektrona, pozitrona i/ili protona) koja se u uskom snopu giba brzinom usporedivom s brzinom svjetlosti i pritom sinkrotronski zrači (poglavlje 1.1.2). Zbog efekta relativističkog usnopljanja [24], koji je funkcija kuta gledanja, sjaj jednog mlaza ovisno o kutu prema promatraču može biti znatno smanjen, a sjaj drugog povećan, što može dovesti do toga da vidimo samo jedan mlaz.



Slika 1.1: Lijevo: slika radiozračenja radiogalaksije Cygnus A [27] razlučivosti $0.5''$ dobivena radioteleskopom VLA na valnoj duljini od 6 cm. Desno: slika radiozračenja radiogalaksije 3C353 [26] razlučivosti $0.44''$, također dobivena radioteleskopom VLA na valnoj duljini od 3.6 cm. Na obje slike mogu se dobro vidjeti središnja jezgra, oba mlaza i oblaci difuznog radiozračenja s vrućim točkama.

- oblaci radiozračenja (eng. *lobes*) – elipsoidalna područja difuzne radioemisije u kojima završavaju mlazovi. Sam kraj mlazova ponekad je kompaktan i vrlo sjajan, što zovemo vrućom točkom (eng. *hotspot*). Vruće točke posljedica su udarnih valova koji nastaju kada nadzvučni¹ mlaz naglo završava na granici dvaju medija. Dio energije u vrućim točkama, koja se u vruće točke kontinuirano ubrizgava mlazovima, izgubi se zračenjem, dok ostatak energije pobjegne iz vrućih točaka da bi formirala povratni tok materijala suprotno mlazu, stvarajući čahurastu strukturu (oblak radiozračenja) iza vrućih točaka.

1.1.2 Sinkrotronsko zračenje

Dobro je poznato da nabijena čestica koja biva akcelerirana proizvodi elektromagnetsko zračenje. Relativistička nabijena čestica u magnetskom polju giba se po spiralnoj putanji duž silnica magnetskog polja i stoga sinkrotronski zrači [23]. Sinkrotronsko zračenje ima veliku važnost, posebno za proučavanje AGN-ova, gdje su visokoenergetski elektroni česti, kao i magnetska polja na velikoj skali.

Oko supermasivne crne, koja čini središte AGN-a, nalazi se disk upadajućeg materijala koji je ioniziran i električki vodljiv [4, 23]. Takav disk nazivamo akrecijskim diskom. Kako materija akrecijskog diska biva povučena prema horizontu događaja rotirajuće crne rupa (Kerova crna rupa), magnetska polja sadržana u disku bivaju povučena duž površine horizonta događaja i u konačnosti međusobno poravnata duž rotacijske osi crne rupe, obično okomito na akrecijski disk. Zbog promjenjivog magnetskog polja akrecijskog diska inducira se električno polje koje snažno ubrzava nabi-

¹Brzina zvuka u ultrarelativističkoj plazmi iznosi $c/\sqrt{3}$ [24].

jene čestice do relativističkih brzina od diska prema van duž silnica nastalog snažnog magnetskog polja na polovima crne rupe. Dva najpoznatija teorijska modela stvaranja mlazova na taj način za rotirajuću crnu rupu jesu Blandford-Znajekov mehanizam [1] i Penroseov mehanizam [37]. Nabijene čestice koje se gibaju duž silnica magnetskog polja na polovima crne rupe proizvode sinkrotronsko zračenje i mogu se vidjeti kao mlazovi elektromagnetskog zračenja.

Ako pretpostavimo da na polovima crne rupe postoji magnetsko polje \vec{B} , tada ono na čestice naboja q djeluje silom \vec{F} oblika [24]:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (1.1)$$

gdje je \vec{v} vektor brzine nabijene čestice. Ako pak postoji komponenta brzine čestice okomita na smjer magnetskog polja (v_{\perp}), tada će zbog djelovanja magnetske sile \vec{F} čestica kružiti u ravnini okomitoj na smjer magnetskog polja s radijusom [24]:

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB}, \quad (1.2)$$

gdje je m masa nabijene čestice. Ako se radi o relativističkoj nabijenoj čestici, vremenski ovisan gubitak energije jedne čestice (uzmimo da se radi o elektronu) koja sinkrotronski zrači dan je Larmorovom formulom [23]:

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = \frac{q^2\gamma^4}{6\pi\epsilon_0c^3}(|a_{\perp}|^2 + \gamma^2|a_{\parallel}|^2), \quad (1.3)$$

gdje je c brzina svjetlosti, $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, ϵ_0 električna permitivnost vakuuma, a a_{\perp} i a_{\parallel} komponente akceleracije okomite i paralelne na vektor brzine čestice \vec{v} . U magnetskom polju akceleracija je okomita na vektor brzine čestice, pa preostaje samo okomita komponenta u relaciji (1.3). Iskoristimo li supstituciju oblika $a_{\perp} = evB\sin(\alpha)/\gamma m_e$ za centripetalnu akceleraciju relativističke nabijene čestice, gdje su e i m_e naboj i masa elektrona te α kut između vektora brzine elektrona i smjera magnetskog polja, uz $c^2 = (\mu_0\epsilon_0)^{-1}$, gdje je μ_0 magnetska permeabilnost vakuuma, izraz (1.3) poprima oblik [23]:

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = 2\left(\frac{e^4}{6\pi\epsilon_0^2c^4m_e^2}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^2c\frac{B^2}{2\mu_0}\gamma^2\sin^2(\alpha) \quad (1.4)$$

Prva zagrada na desnoj strani izraza (1.4) odgovara izrazu za Thomsonov udarni presjek σ_T , a član s magnetskim poljem $B^2/2\mu_0 = U_{mag}$ odgovara gustoći energije magnetskog polja. U limesu $v \rightarrow c$ izraz (1.4) poprima oblik [23]:

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = 2\sigma_T c U_{mag} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \gamma^2 \sin^2(\alpha) \quad (1.5)$$

Za pojedini visokoenergetski elektron, distribucija kuta α između vektora brzine elektrona i smjera magnetskog polja je izotropna [23]. To je zato što se očekuje da se elektroni u plazmi kontinuirano raspršuju magnetskim poljima i tijekom svog života bilo koji visokoenergetski elektron može biti nasumično raspršen u kutu α . Za izotropnu distribuciju kuta α gustoća vjerojatnosti za određeni kut α glasi $p(\alpha)d\alpha = \frac{1}{2}\sin(\alpha)d\alpha$. Množenjem relacije (1.5) s ovom distribucijom i integracijom od 0 do π po kutu α dobivamo [23]:

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = \frac{4}{3}\sigma_T c U_{mag} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \gamma^2 \quad (1.6)$$

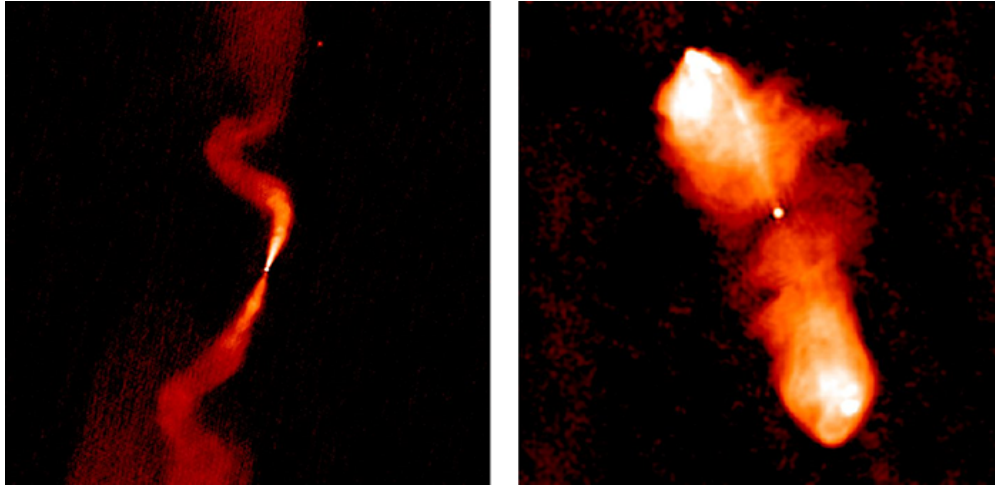
Ako pretpostavimo konstantno magnetsko polje i ako je $v \sim c$, možemo vidjeti da gubitak energije (relacija (1.6)) raste s kvadratom energije čestice budući da je $\gamma = E/mc^2$. To znači da elektroni veće energije brže gube energiju sinkrotronskim zračenjem. Emisivnost $j(\omega)$, odnosno izračena energija kao funkcija frekvencije, jedinog elektrona dana je kao [23]:

$$j(\omega) = \frac{\sqrt{3}Be^3 \sin(\alpha)}{8\pi^2 \epsilon_0 c m_e} F(x) \quad (1.7)$$

gdje je $F(x)$ funkcija kutne frekvencije elektrona tako da vrijedi $x = \omega/\omega_c$, gdje je ω_c kritična kutna frekvencija iznad koje sinkrotronsko zračenje elektrona pada oštro zbog izračene većine svoje energije.

1.1.3 Fanaroff-Riley klasifikacija

Kod radiogalaksija je pronađen širok raspon morfologija, kao i razlika u luminozitetu. To su prvi opazili Bernard Fanaroff i Julia Riley 1974. [6] koji su radiogalaksije klasificirali ili kao Fanaroff-Riley tipa 1 (FR I) ili kao Fanaroff-Riley tipa 2 (FR II). FR I izvori su najsjajniji u području središnje jezgre i unutarnjem području mlazova. Njihov spektar je općenito ravan u području središnje jezgre i postaje strmiji kako se približavamo rubovima oblaka radiogalaksije. S druge strane, FR II izvori najsjaj-



Slika 1.2: Radiogalaksije 3C31 (lijevo) i 3C98 (desno) iz [15]. Lijeva radiogalaksija pripada FR I tipu izvora, dok desna radiogalaksija pripada FR II tipu izvora.

niji su u području oblaka difuznog zračenja i vrućih točaka. Ova razlika potječe od različitih efikasnosti prijenosa energije kroz mlazove. FR II izvori imaju veliku efikasnost prijenosa energije pa velika količina energije uspije doći do rubova mlazova, odnosno do oblaka difuznog zračenja. Međutim, kod FR I izvora znatan dio energije izgubi se zračenjem prije nego što uspije dosegnuti kraj mlaza. Iz tog razloga rubovi oblaka FR II izvora mogu sadržavati vruće točke, dok to nije slučaj kod FR I izvora, kod kojih možemo reći da se "vruće točke" nalaze u unutrašnjem području mlazova uz središnju jezgru. Također, FR II izvori imaju kolimirane mlazove, ali obično manje sjajne nego u slučaju FR I izvora, vjerojatno zbog velikog kontrasta u sjaju između sjajnih oblaka difuznog zračenja i manje sjajnih mlazova. Osim po morfologiji, radiogalaksije tipa FR I i FR II razlikuju se i po luminozitetu, gdje su radiogalaksije tipa FR II općenito većeg luminoziteta od radiogalaksija tipa FR I.

1.2 Jata galaksija

Galaktički skupovi ili jata² strukture su od više galaksija koje su međusobno gravitacijski vezane. Prema broju galaksija razlikujemo grupe [11] i skupove galaksija [10]. Kod grupa galaksija broj galaksija općenito ne prelazi 50, a linearne skale na kojima se one prostiru iznose od 1 do 2 Mpc. Mase grupa galaksija kreću se oko 10^{13} Sunčevih masa. S druge strane, skupovi galaksija mnogo su veće strukture od grupa galaksija i sadrže više od 50 galaksija pa i do više 1000 galaksija. Skupovi galaksija

²https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Galaxy_groups_and_clusters



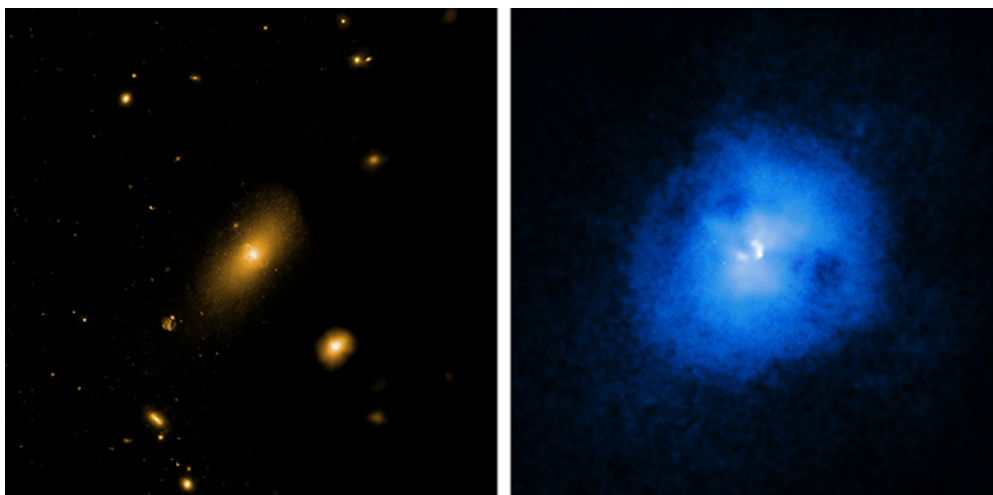
Slika 1.3: Lijevo: galaktičko jato SDSS J0333+0651 snimljeno svemirskim teleskopom Hubble [9]. Desno: galaktičko jato Cl 0024+17, također snimljeno svemirskim teleskopom Hubble [8].

tipično su promjera od 1 do 5 Mpc, a mase im se kreću između 10^{14} i 10^{15} Sunčevih masa. Treba napomenuti da nema oštre granice između grupa i skupova galaksija pa naziv grupa galaksija koristimo samo kada promatramo manja jata čija masa iznosi manje od 8×10^{13} Sunčevih masa [25]. Jata se dalje mogu grupirati u još veće tvorevine koje se nazivaju superjatima (promjera ~ 100 Mpc) ili još veće filamente materije koji čine strukturu na velikoj skali (eng. *large scale structure* - LSS) [24].

Galaksije koje pripadaju nekom jatu galaksija moguće je identificirati pomoću njihove boje i magnitudo. Promatrajući dijagram ovisnosti boje o magnitudi, galaksije koje pripadaju nekom jatu na dijagramu tvore tzv. "crveni niz" [24]. Naime, najčešće se radi o eliptičnim galaksijama koje su siromašne plinom i prašinom. U takvim galaksijama prevladava populacija starih i crvenih zvijezda, a same galaksije mogle su nastati sudarom manjih, plavih galaksija bogatih plinom i prašinom s učestalim stvaranjem zvijezda. Do sudara galaksija [24] najčešće dolazi u gusto naseljenim okolinama kao što je to središte jata galaksija, stoga se tamo najčešće i nalaze velike eliptične galaksije i to radiogalaksije.

1.2.1 Rendgensko zračenje jata galaksija

Prostor između galaksija unutar nekog jata galaksija nije u potpunosti prazan. Ako zanemarimo tamnu tvar, koja čini između 70% i 90% ukupne mase jata, prostor između galaksija ispunjen je unutarklusterskim materijalom (eng. *intracluster medium* - ICM). ICM čini vrući međugalaktički plin temperature 10^7 i 10^8 K [4]. U takvom mediju dolazi do stvaranja termalnog zakočnog zračenja (njem. *bremsstra-*



Slika 1.4: Lijevo: galaktičko jato Abell 2597 u optičkom dijelu elektromagnetskog spektra [7]. Desno: difuzno rendgensko zračenje vrućeg međugalaktičkog plina u jatu Abell 2597 snimljeno svemirskim teleskopom Chandra [7].

hlung). Zakočno zračenje je takvo zračenje kojim elektroni nailaskom na jezgru ili ion gube svoju energiju emisijom visokoenergetskog fotona i pritom bivaju usporeni. Sjaj, odnosno luminozitet L nastalog zakočnog zračenja proporcionalan je kvadratu gustoće ICM-a, gdje luminozitet plina potpuno ioniziranog vodika na temperaturi T ovisi o gustoći broja slobodnih elektrona n_e kao [24]:

$$L = 1.42 \times 10^{-40} n_e^2 T^{1/2} [W/m^3] \quad (1.8)$$

Zbog velike količine vrućeg plina i plazme u ICM-u, jata galaksija vrlo intenzivno zrače u rendgenskom dijelu elektromagnetskog spektra zahvaljujući termalnom zakočnom zračenju unutar ICM-a, a mogu se prepoznati kao prostrana područja difuzne emisije rendgenskog zračenja (slika 1.4). Jedan od načina traženja jata galaksija koji se koristi u astrofizici je upravo proučavanje difuznog rendgenskog zračenja u određenom području neba od interesa.

1.3 Spektralno starenje

1.3.1 Spektralni indeks i indeks ubrizgavanja

Emitirano sinkrotronsko zračenje ima kontinuirani spektar čiji oblik ovisi o energiji čestice koja emitira ovo zračenje. Za optički tanku plazmu, spektar sinkrotronskog zračenja ima oblik [33]:

$$S_\nu \propto \nu^{-\alpha}, \quad (1.9)$$

gdje je S_ν gustoća toka zračenja na određenoj frekvenciji ν , dok eksponent α zovemo spektralni indeks. Poznavajući gustoće toka zračenja nekog izvora na dvije različite frekvencije trivijalno dolazimo do izraza za spektralni indeks. Koristeći relaciju (1.1) dobivamo:

$$\alpha = -\frac{\log S_2 - \log S_1}{\log \nu_2 - \log \nu_1}, \quad (1.10)$$

gdje su $S_{1,2}$ gustoće toka zračenja izvora na frekvencijama $\nu_{1,2}$, respektivno. Spektralni indeks možemo povezati s jednim drugim eksponentom u eksponencijalnoj distribuciji nabijenih čestica. Naime, energetska distribucija populacije nabijenih čestica zaslužnih za sinkrotronsko zračenje $n(E)$ dana je kao [33]:

$$n(E)dE = kE^{-p}dE, \quad (1.11)$$

gdje je k normalizacijska konstanta, a p odgovarajući eksponent. Uz pretpostavku da je magnetsko polje uniformno i statično, dobiva se veza između spektralnog indeksa α i eksponenta p :

$$\alpha = \frac{p - 1}{2} \quad (1.12)$$

Uz spektralni indeks vezan je i tzv. indeks ubrizgavanja (eng. *injection index*) α_{inj} . Indeks ubrizgavanja [23] opisuje nagib spektra zračenja (relacija (1.10)) za početnu distribuciju populacije elektrona u vrućim točkama izvora. Ovaj indeks označava upravo ona mjesta izvora najmanje starosti.

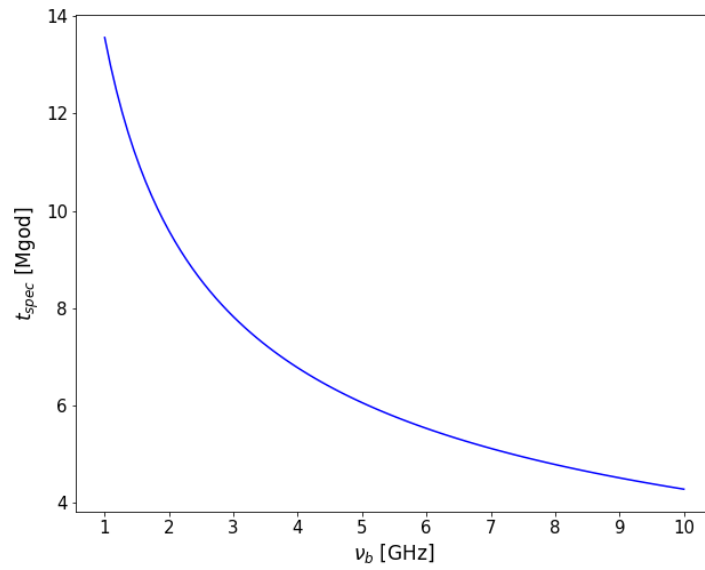
1.3.2 Spektralna starost

Česticama plazme (npr. elektroni) potrebno je određeno vrijeme da izrače svoju energiju kroz sinkrotronske i inverzno-Comptonske gubitke [23]. To vrijeme nazivamo spektralnom starošću. Kada elektroni zaostaju za vrućim točkama ispunjavajući oblake radiogalaksije, nema više udarnog ubrzavanja elektrona pa oni prolaze kroz radijativne gubitke, gdje visokoenergetski elektroni brže gube energiju. Ovo je vidljivo u zakrivljenosti spektra oblaka radiozračenja kod radiogalaksije na visokim frekvencijama i karakterizirano je opaženom frekvencijom prekida nakon koje tok zračenja naglo opada zbog radijativnih gubitaka [23]. Spektralna starost t_{spec} (mili-juni godina - Mgod) povezana je s frekvencijom prekida u sustavu opažача ν_b (GHz)

i magnetskim poljem izvora B (nT) kao [17]:

$$t_{spec} = \frac{3}{2} \frac{B^{1/2}}{B^2 + B_{CMB}^2} \left(\frac{c_7}{(1+z)\nu_b} \right)^{1/2}, \quad (1.13)$$

gdje je $B_{CMB} = 0.318(1+z)^2$ [nT] jakost magnetskog polja kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja, z crveni pomak izvora, a konstanta $c_7 = 1.12 \times 10^3$ nT³ Mgod² GHz. Uz pretpostavku iznosa frekvencije prekida i magnetskog polja izvora, iz relacije (1.13) možemo dobiti spektralnu starost t_{spec} . Na slici 1.1 možemo vidjeti



Slika 1.5: Primjer ovisnosti spektralne starosti t_{spec} u milijunima godina (Mgod) o frekvenciji prekida ν_b (u sustavu opažača) između 1 i 10 GHz dobivene relacijom (1.13) uz magnetsko polje izvora $B = 1$ nT i crveni pomak $z = 1$.

ovisnost spektralne starosti t_{spec} o frekvenciji prekida ν_b između 1 i 10 GHz prema relaciji (1.13), gdje za veće frekvencije prekida imamo manju spektralnu starost izvora. Dakle, plazma veće energije (veće frekvencije) brže gubi energiju preko radijativnih gubitaka, što je u skladu s izrazom (1.6).

2 Ciljevi rada

U ovom radu predstavljen je uzorak radiogalaksija opaženih u pregledu neba COSMOS [29]. Koristeći radiopodatke prikupljene radioteleskopima GMRT i VLA na frekvencijama od 610 MHz [34], 1.4 GHz [30] i 3 GHz [32] provodimo spektralnu analizu sinkrotronskog zračenja radiogalaksija s ciljem ispitivanja njihove spektralne starosti. U tu svrhu izrađujemo mape spektralnog indeksa te određujemo prosječno magnetsko polje u oblacima radiogalaksije i indeks ubrizgavanja, što je bitan korak prije određivanja same spektralne starosti. Uzorak radiogalaksija odabran je na širokom rasponu crvenih pomaka ($0.34 < z < 2.24$) kako bismo mogli proučiti ponašanje spektralne starosti na različitim udaljenostima, ali i usporediti spektralne starosti radiogalaksija na sličnim crvenim pomacima.

Uz spektralnu starost, proučavamo i kozmičko okruženje istih radiogalaksija, koristeći pritom podatke položaja galaksija u okolini radiogalaksija, uz podatke rendgenskog zračenja [3] i položaja poznatih jata galaksija [14] u tom području. Pritom ispitujemo položaj radiogalaksija u odnosu na moguće grupiranje galaksija u okolini radiogalaksije ako takvo postoji, odnosno položaj u odnosu na galaktičko jato ili grupu u tom području neba.

3 Podaci

3.1 Pregled neba COSMOS

Cosmic Evolution Survey (COSMOS³) je pankromatski pregled neba s ciljem ispitivanja evolucije galaksija i aktivnih galaktičkih jezgri, s naglaskom na ispitivanje njihove kozmičke okoline [29]. Polje COSMOS (centar polja RA = 10^h00^m28.6^s i DEC = +02°12'21.0") čini područje neba veličine 1.4° × 1.4° u području zvježda Sekstant. Ovo područje neba pogodno je za proučavanje velikog broja objekata u različitim epohama starosti svemira zato što u tom području nema mnogo zvijezda i nema oblaka plina u našoj galaksiji (Mliječni put) koji bi blokirali pogled na svemir.

Polje COSMOS proučavano je na valnim duljinama od rendgenskog zračenja do radiozračenja te je u optičkom i bliskofrekventnom valnom području detektirano više od dva milijuna galaksija koje se pružaju duž 75% starosti svemira [22]. Neki od najpoznatijih svemirskih teleskopa koji sudjeluju u proučavanju polja COSMOS jesu Hubble, Spitzer, GALEX (eng. *Galaxy Evolution Explorer*), XMM-Newton (eng. *X-ray Multi-Mirror Mission - XMM*), Chandra i Herschel, dok su od zemaljskih teleskopa najpoznatiji Keck, Subaru, VLA (eng. *Very Large Array*), GMRT (eng. *Giant Metrewave Radio Telescope*), UKIRT (eng. *United Kingdom Infrared Telescope*) i još mnogi drugi.

3.1.1 Radiozračenje galaksija u polju COSMOS

U svrhu spektralne analize radiogalaksija koristimo opažanja gustoće toka zračenja (u jedinicama Jy/*beam*⁴) radiogalaksija u radiovalnom području elektromagnetskog spektra u polju COSMOS. Pritom koristimo opažanja dva radioteleskopa VLA i GMRT.

Od opažanja radioteleskopa VLA⁵ korišteni su podaci gustoće toka zračenja na frekvencijama 1.4 GHz [30] i 3 GHz [32]. Na obje frekvencije opažanja radioteleskopa VLA rađena su u A i C konfiguracijama. Opažanje na frekvenciji 1.4 GHz ima razlučivost 2.5" × 2.5" i osjetljivost od 12 μJy/*beam*, a opažanje na 3 GHz razlučivost 0.75" × 0.75" i osjetljivost od 2.3 μJy/*beam* unutar dva kvadratna stupnja polja COSMOS.

³<https://cosmos.astro.caltech.edu/page/astronomers>

⁴Jy/*beam* je mjerna jedinica za spektralnu gustoću toka zračenja, gdje je 1 Jy = 10⁻²⁶ W m⁻² Hz⁻¹, a *beam* površina jediničnog rezolucijskog elementa.

⁵<https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

S druge strane, osim opažanja radioteleskopa VLA na 1.4 GHz i 3 GHz koristimo i opažanja radioteleskopa GMRT⁶ na frekvenciji od 610 MHz [34]. Unutar dva kvadratna stupnja polja COSMOS razlučivost opažanja radioteleskopa GMRT na 610 MHz iznosi $5.6'' \times 3.9''$ uz osjetljivost od $39 \mu\text{Jy}/\text{beam}$.

3.1.2 Rendgensko zračenje u polju COSMOS

Uz radiovalno zračenje koje koristimo za spektralnu analizu radiogalaksija, koristimo i opažanja rendgenskog zračenja (u jedinicama cnt/s ⁷) u polju COSMOS dobivena svemirskim teleskopom XMM-Newton⁸ [3]. Opažanje rendgenskog zračenja ima razlučivost od $4''$ po pikselu na energijama zračenja između 0.5 i 10 keV unutar dva kvadratna stupnja polja COSMOS. Za potrebe našeg istraživanja koristimo slike rendgenskog zračenja na energijama između 0.5 i 2 keV zbog većeg intenziteta zračenja u tom rasponu energija.

Podaci koji uključuju slike (mozaike) opažanja rendgenskog, ali i radiovalnog zračenja unutar polja COSMOS djelomično su dostupni javnosti putem digitalnog arhiva *NASA/IPAC Infrared Science Archive* te su za ovaj rad preuzeti iz te arhive.

⁶<http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/>

⁷ cnt/s (eng. *counts/s*) je mjerna jedinica zračenja koja opisuje broj detektiranih fotona zračenja u jedinici vremena.

⁸<https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton>

3.2 Uzorak radiogalaksija u polju COSMOS

Iz pregleda neba COSMOS izdvojeno je dvadeset radiogalaksija na različitim crvenim pomacima koje će biti predmet istraživanja u ostatku ovog rada. U tablici 3.1 prikazana su neka svojstva odabranih radiogalaksija koja koristimo u našem istraživanju.

ID (3 GHz)	RA [h:m:s]	DEC [°:':"]	FR klasa	$S_{1.4GHz}$ [mJy]	z
44	10:00:26.49	+02:42:29.7	FR I	6.452	0.351 ^s
177	10:00:58.05	+01:51:33.3	FR I	13.26	1.687 ^s
187	09:59:46.30	+02:36:02.1	FR I	18.05	0.344 ^s
10900	09:59:08.31	+02:43:09.6	FR II	60.5	1.308 ^s
10901	09:57:58.04	+01:58:25.1	FR II	53.03	2.239 ^s
10902	09:58:23.31	+02:26:28.4	FR II	116.5	1.168 ^s
10904	10:02:43.20	+01:59:43.4	FR II	41.44	1.206 ^p
10910	10:00:49.59	+01:49:23.7	FR II	15.1	0.530 ^s
10913	10:00:28.28	+02:41:03.3	FR II	82.74	0.349 ^s
10914	10:02:30.19	+02:09:13.2	FR II	7.751	1.437 ^p
10916	10:01:40.13	+01:51:29.6	FR II	12.83	0.459 ^s
10918	09:58:24.01	+02:49:16.1	FR II	56.62	0.345 ^s
10919	10:01:14.13	+01:54:44.1	FR II	8.119	1.483 ^p
10923	10:03:03.67	+01:47:35.9	FR II	37.02	1.203 ^p
10928	09:58:22.49	+02:47:22.1	FR II	30.12	0.878 ^s
10933	10:00:43.19	+01:46:07.8	FR I	88.17	0.346 ^s
10935	09:59:27.25	+02:37:29.3	FR II	6.548	0.954 ^s
10936	10:00:28.23	+01:35:08.5	FR II	29.13	0.839 ^s
10953	10:00:18.50	+02:32:56.2	FR I	3.192	0.890 ^s
10959	10:02:45.40	+02:45:16.1	FR II	34.76	0.986 ^p

Tablica 3.1: Uzorak radiogalaksija: identifikacijski broj (ID) galaksije iz kataloga na 3 GHz [36], koordinate rektascenzije (RA) i deklinacije (DEC) optičkog središta radiogalaksije [36], Fanaroff-Riley klasifikacija (FR klasa) [36], gustoća toka zračenja ($S_{1.4GHz}$) radiogalaksije na 1.4 GHz (uzeto iz *COSMOS VLA Deep Catalogue* [5]), te crveni pomak radiogalaksije (s – spektroskopski, p – fotometrijski) uzet iz kataloga na 3 GHz [36].

Iz mozaika gustoće toka zračenja u pregledu neba COSMOS na frekvencijama 610 MHz, 1.4 GHz i 3 GHz izrezali smo slike jednake kutne veličine za pojedinu radiogalaksiju, sa središtem na koordinati optičkog središta radiogalaksije (tablica 3.1). Dobivene slike koristili smo za spektralnu analizu, koja je uključivala određivanje spektralnog indeksa i indeksa ubrizgavanja te prilagodbu modela spektralne starosti (poglavlje 4.).

3.3 Katalozi galaksija i grupa galaksija u polju COSMOS

Za proučavanje kozmičke okoline (poglavlje 4.7) odabranih radiogalaksija potrebne su nam informacije o položaju galaksija u okolini oko naših radiogalaksija. U tu svrhu koristimo katalog [20] koji sadrži informacije o fotometrijskom crvenom pomaku i koordinatama rektascenzije (RA) i deklinacije (DEC) 937 013 objekata u polju COSMOS. Pritom za odabrani uzorak radiogalaksija koristimo koordinate položaja i crveni pomak iz tablice 3.1.

Za detaljnije proučavanje kozmičke okoline radiogalaksija, koristimo katalog [21] koji sadrži 247 poznatih jata, odnosno grupa galaksija na crvenim pomacima $0.08 \leq z < 1.53$ u polju COSMOS, a koja su pronađena opažanjem difuznog rendgenskog zračenja međugalaktičkog plina pomoću svemirskih teleskopa Chandra i XMM-Newton [14]. U katalogu su dani podaci o koordinatama položaja (RA i DEC), crveni pomak z_{jato} , radijus jata ili grupe R_{200} , koji je definiran kao radijus pri kojem je gustoća plazme jata 200 puta veća od kritične gustoće svemira⁹, te masa M_{200} u jedinicama mase Sunca (M_{\odot} ¹⁰) unutar radijusa R_{200} .

⁹Kritična gustoća svemira je prosječna gustoća materije ravnog svemira koja iznosi približno 10^{-26} kg/m³, odnosno 10 atoma vodika po kubičnom metru.

¹⁰Masa Sunca iznosi oko $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30}$ kg.

4 Metodologija

4.1 Priprema slika radiogalaksija

Da bi mogli uopće raditi spektralnu analizu neke radiogalaksije, razlučivost slika, kao i njihova veličina u pikselima i kutna veličina pojedinog piksela mora biti jednaka. U tu svrhu koristili smo softver CASA¹¹. Korištenjem funkcije *imsmooth* u CASA-i slike bolje razlučivosti (1.4 i 3 GHz) konvoluirali smo na razlučivost koju je imala slika najlošije razlučivosti (610 MHz). Nakon toga smo koristeći funkciju *imregrid* slike podesili na jednaku veličinu piksela koju je imala slika najlošije razlučivosti.

4.2 Učitavanje slika i postavljanje regija radioizvora

Za potrebe spektralne analize podataka gustoće toka zračenja korišten je softver *Broadband Radio Astronomy Tools* (BRATS)¹² na Linux operativnom sustavu. Međutim, prije spektralne analize u softveru BRATS potrebno je napraviti nekoliko bitnih početnih koraka [16]. Prije unosa slika u softver BRATS, naredbom *sigma* postavljamo granicu na razinu detekcije izvora. Ako je gustoća toka zračenja izvora iznad odabrane vrijednosti σ , BRATS će spremiti taj tok u memoriju. Na taj način zanemarujemo velik dio pozadinskog šuma i zdržavamo samo signal od željenog radioizvora. Za potrebe našeg istraživanja odabrali smo razinu detekcije s vrijednošću od 2σ .

Naredbom *load* u BRATS unosimo slike radiogalaksije na svim frekvencijama, podatak o crvenom pomaku izvora i dvije *region* datoteke koje smo prethodno napravili koristeći program *SAOImageDS9*¹³. Jedna *region* datoteka sadrži koordinate područja slike gdje se nalazi naš izvor (pritom izostavljamo središnju jezgru zbog različite fizičke prirode u odnosu na mlazove i oblake), a druga *region* datoteka sadrži koordinate područja slike izvan izvora gdje BRATS određuje kvadratnu sredinu (eng. *Root Mean Square* - RMS) pozadinskog šuma.

Naredbom *setregions* određujemo piksele, tj. regije za koje želimo izračunati spektralni indeks, gdje BRATS zadržava samo one piksele za koje postoji preklapanje na svim slikama nekog radioizvora. Prije naredbe *setregions* korisno je postaviti omjer signala prema šumu (naredba *signaltonoise*) na željenu vrijednost kako bi još više

¹¹<https://casa.nrao.edu/>

¹²<http://www.askanastronomer.co.uk/brats/>

¹³<https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

smanjili utjecaj pozadinskog šuma. Za potrebe naše analize zadržavamo unaprijed postavljenu vrijednost $signalnoise = 1$. Također, kako bi smanjili utjecaj termalnog šuma izvora, naredbom *onsource* zadajemo faktor kojim se množi RMS vrijednosti šuma izvora. Za našu smo analizu koristili vrijednost $onsource = 3$.

4.3 Izrada mape spektralnog indeksa

Prvi korak u određivanju spektralne starosti uključuje određivanje spektralnog indeksa radioizvora. Spektralni indeks u softveru BRATS dobivamo pomoću naredbe *specindex* koja računa spektralni indeks svakog pojedinog piksela izvora. Budući da se radi o slikama na više od dvije frekvencije, BRATS za određivanje spektralnog indeksa α koristi izraz [16]:

$$\alpha = \frac{N \sum_{i=1}^N (\log \nu_i \cdot \log S_{i,r}) - \sum_{i=1}^N \log \nu_i \cdot \sum_{i=1}^N \log S_{i,r}}{N \sum_{i=1}^N (\log \nu_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \log \nu_i)^2}, \quad (4.1)$$

gdje je N broj frekvencija ν (u našem slučaju $N = 3$), i individualni indeks slike, r broj piksela, a S gustoća toka zračenja piksela. Kako bi odredio pogrešku spektralnog indeksa, BRATS koristi GSL (eng. GNU Scientific Library) funkcije *wlinear* i *linear_est*¹⁴ za metodu najmanjih kvadrata sa statističkim težinama $w = 1/\sigma^2$, gdje je σ pogreška na izmjerenu gustoću toka zračenja. Pogreška spektralnog indeksa sa statističkim težinama w (u logaritamskoj skali) dana je kao [16]:

$$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N w_i}{(\sum_{i=1}^N \log(\nu_i^2) w_i)(\sum_{i=1}^N w_i) - (\sum_{i=1}^N \log(\nu_i) w_i)^2}} \quad (4.2)$$

Softver BRATS kao rezultat prikazuje graf koji pokazuje spektralni indeks kao funkciju položaja unutar odabranog izvora, ispisujući pritom minimum i maksimum spektralnog indeksa cijelog izvora i njihove pripadne pogreške.

4.4 Određivanje magnetskog polja

Uz pretpostavku da je ukupna energija u radiogalaksiji zbroj energije elektrona E_e , energije teških čestica E_p i energije magnetskog polja E_B , $E_{tot} = E_e + E_p + E_B$, možemo procijeniti magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije koristeći uvjet mi-

¹⁴<https://www.gnu.org/software/gsl/doc/html/lts.html#linear-regression>

nimuma energije, koji približno odgovara ekviparticipiji između relativističkih čestica i magnetskog polja. Ekviparticipija zahtijeva da je magnetska energija jednaka ukupnoj energiji čestica, tj. $E_B = E_e + E_p$, dok uvjet minimuma energije vrijedi za $E_B = \frac{3}{4}(E_e + E_p)$. Za izračun magnetskog polja koristimo gotov izraz [31]:

$$B = 5.69 \times 10^{-5} \left[\frac{1+k}{\eta} (1+z)^{3+\alpha} \frac{1}{\Theta_x \Theta_y l \sin^{3/2}(\Phi)} \frac{F_0 \nu_2^{1/2-\alpha} - \nu_1^{1/2-\alpha}}{\nu_0^\alpha \frac{1}{2} - \alpha} \right]^{2/7} [G], \quad (4.3)$$

gdje je k omjer relativističkih energija protona i elektrona, η faktor punjenja emitirajućih regija, z crveni pomak izvora, Θ_x i Θ_y (lučne sekunde) redom velika i mala os jediničnog rezolucijskog elementa, l duljina puta (kpc) kroz izvor duž doglednice, Φ kut između uniformnog magnetskog polja i doglednice, F_0 (Jy) gustoća toka zračenja izvora na promatranjnoj frekvenciji ν_0 (GHz), ν_1 i ν_2 (GHz) pretpostavljena donja i gornja granična frekvencija radiospektra te α srednji spektralni indeks područja izvora.

Budući da nemamo dovoljno informacija o radioizvorima, uzimamo određene aproksimacije. Pretpostavljamo da plazma popunjuje cijeli volumen ($\eta = 1$), da je magnetsko polje transverzalno na doglednicu ($\sin\Phi = 1$), da je relativistička energija protona jednaka onoj za elektrone ($k = 1$), da postoji cilindrična simetrija (l odgovara širini izvora na nebu, u našem slučaju širini oblaka radiogalaksije) te da su granične frekvencije spektra radiozračenja 10 MHz i 100 GHz. Za izračun magnetskog polja koristimo podatke na frekvenciji $\nu_0 = 1.4$ GHz, na kojoj s početnih slika procijenjujemo širinu l oblaka radiogalaksije koristeći *astropy.cosmology* u programskom jeziku Python uz kozmološke parametre $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0.31$, $\Omega_\Lambda = 0.69$, a za gustoću toka zračenja radiogalaksije F_0 uzimamo već gotove vrijednosti iz tablice 3.1. Za spektralni indeks α uzimamo srednju vrijednost spektralnog indeksa u oblacima radiogalaksije.

4.5 Određivanje indeksa ubrizgavanja

Jedan od ključnih parametara nekog modela spektralne starosti je indeks ubrizgavanja α_{inj} . Kako bismo odredili indeks ubrizgavanja koji najbolje odgovara određenom modelu spektralne starosti, koristimo naredbu *findinject* [16] u softveru BRATS. Pri tom zadajemo magnetsko polje u oblacima radiogalaksije (naredba *bfield*) u jedinicama tesla (T), interval vrijednosti indeksa ubrizgavanja (naredbe *maxinject* i *mininject*) i broj točaka (naredba *injectintervals*, broj točaka = *injectintervals* + 1)

unutar tog intervala za koje naredba *findinject* određuje χ^2 vrijednost prilagodbe određenog modela spektralne starosti za svaki piksel izvora. Kao rezultat naredba *findinject* daje onaj indeks ubrizgavanja koji odgovara minimumu sume χ^2 vrijednosti svih piksela izvora. Tako dobivenu vrijednost indeksa ubrizgavanja koristimo za određivanje spektralne starosti našeg izvora. χ^2 vrijednost prilagodbe modela spektralne starosti za određeni piksel izvora dana je kao [23]:

$$\chi^2 = \sum_{\nu=1}^N \left(\frac{S_{i,\nu} - S_{model,\nu}}{\Delta S_{i,\nu}} \right)^2, \quad (4.4)$$

gdje je $S_{i,\nu}$ opažena gustoća toka zračenja na frekvenciji ν za piksel i , $S_{model,\nu}$ gustoća toka zračenja koju daje određeni model spektralne starosti, N ukupan broj promatranih frekvencija, a $\Delta S_{i,\nu}$ nepouzdanost gustoće toka zračenja koja je dana kao [16]:

$$\Delta S_{i,\nu} = \sqrt{((J \times S_{RMS}) \sqrt{n_{reg}/a_{beam}})^2 + (S_{i,\nu} \times \Delta S_E)^2}, \quad (4.5)$$

gdje je J *on source* faktor koji množi RMS pozadinskog šuma (S_{RMS}), n_{reg} broj piksela unutar regije (u našem slučaju svaka regija jednaka je jednom pikselu), a_{beam} površina jediničnog rezolucijskog elementa u brojevima piksela, a $\Delta S_E = 0.02$ standardna kalibracijska pogreška gustoće toka zračenja za opažanje radioteleskopa VLA.

4.6 Izrada mape spektralne starosti

Jednom kad znamo magnetsko polje i indeks ubrizgavanja, možemo odrediti spektralnu starost radiogalaksije. Unutar softvera BRATS postoji nekoliko modela spektralne starosti [16, 23], koji u suštini opisuju sinkrotronsku emisiju relativističkih elektrona koji se gibaju u magnetskom polju od mjesta vrućih točaka prema ostatku oblaka radiogalaksije, gdje se događaju radijativni gubitci.

4.6.1 Model spektralne starosti uz konstantno magnetsko polje

Gustoća toka zračenja modela spektralne starosti na nekoj frekvenciji ν uz konstantno magnetsko polje B u svakom dijelu izvora dana je kao [16]:

$$S_{model}(\nu) = \frac{\sqrt{3}e^3 B}{8\pi\epsilon_0 c m_e} \int_0^\pi \int_{E_{min}}^{E_{max}} F(x) \frac{1}{2} \sin^2(\delta) n(E) dE d\delta, \quad (4.6)$$

gdje je e naboj elektrona, m_e masa elektrona, c brzina svjetlosti, ϵ_0 električna permisivnost vakuumu, δ kut između vektora brzine elektrona i konstantnog magnetskog polja, a E energija relativističkih elektrona. Funkcija $F(x)$ ima oblik [16]:

$$F(x) = x \int_x^\infty K_{5/3}(z) dz, \quad (4.7)$$

gdje je $K_{5/3}$ Besselova funkcija reda $5/3$, $x \equiv \nu/\nu_c$, a $\nu_c = \gamma^2 e B_\perp / 2\pi m_e$ kritična frekvencija i $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ te v brzina elektrona. Funkcija $n(E)$ odgovara energetskej distribuciji elektrona, a dana je kao [23]:

$$n(E) = n_0 E^{-2\alpha+1} (1 - \beta)^{(2\alpha+1)-2}, \quad (4.8)$$

gdje je n_0 početna energetska distribucija elektrona, α spektralni indeks, a β vremenski ovisan gubitak energije elektrona za neki model.

Dva modela spektralne starosti [23] koji pretpostavljaju konstantno magnetsko polje u svakom dijelu izvora jesu Kardashev-Pacholczykov (KP) model (1970.) i Jaffe-Perolaov (JP) model (1973.). KP model spektralne starosti pretpostavlja da je kut δ između vektora brzine elektrona i konstantnog magnetskog polja B izotropan i konstantan kroz cijelo vrijeme zračenja elektrona. Vremenski ovisan gubitak energije elektrona β za KP model ima oblik [16]:

$$\beta_{KP} = B^2 Et \frac{4\sigma_T \sin(\delta)}{6m_e^2 \nu_c^3 \mu_0}, \quad (4.9)$$

gdje je t vrijeme proteklo od početne akceleracije elektrona, μ_0 magnetska permeabilnost vakuumu, a σ_T Thomsonov udarni presjek. S druge strane, JP model spektralne starosti pretpostavlja da je kut δ između vektora brzine elektrona i konstantnog magnetskog polja B izotropan samo na kratkim vremenskim skalama. Iz tog razloga JP model koristi vremenski usrednjenu vrijednost kuta između vektora brzine elektrona i magnetskog polja. Vremenski ovisan gubitak energije elektrona β za JP model stoga ima oblik [16]:

$$\beta_{JP} = B^2 Et \frac{4\sigma_T}{6m_e^2 \nu_c^3 \mu_0} \quad (4.10)$$

4.6.2 Model spektralne starosti uz neuniformno magnetsko polje

Iako KP i JP model spektralne starosti pružaju razuman opis energija populacije elektrona, koji prolaze kroz radijativne gubitke u oblacima radiogalaksije, ovi modeli pretpostavljaju konstantno magnetsko polje u cijelom području izvora. Takvo što je malo vjerojatno za strukture na velikoj skali poput radiogalaksija, kod kojih nehomogenosti mogu biti učestale. Peter C. Tribble 1993. godine stoga predlaže model spektralne starosti [35] koji je baziran na gubitcima energije JP modela (relacija 4.10), ali uz nasumičnu Gaussovu raspodijelu magnetskog polja u oblacima radiogalaksije. Gustoća toka zračenja za Tribble model ima stoga sličan oblik kao i relacija (4.6) uz integraciju preko Maxwell-Boltzmannove distribucije, što daje [16]:

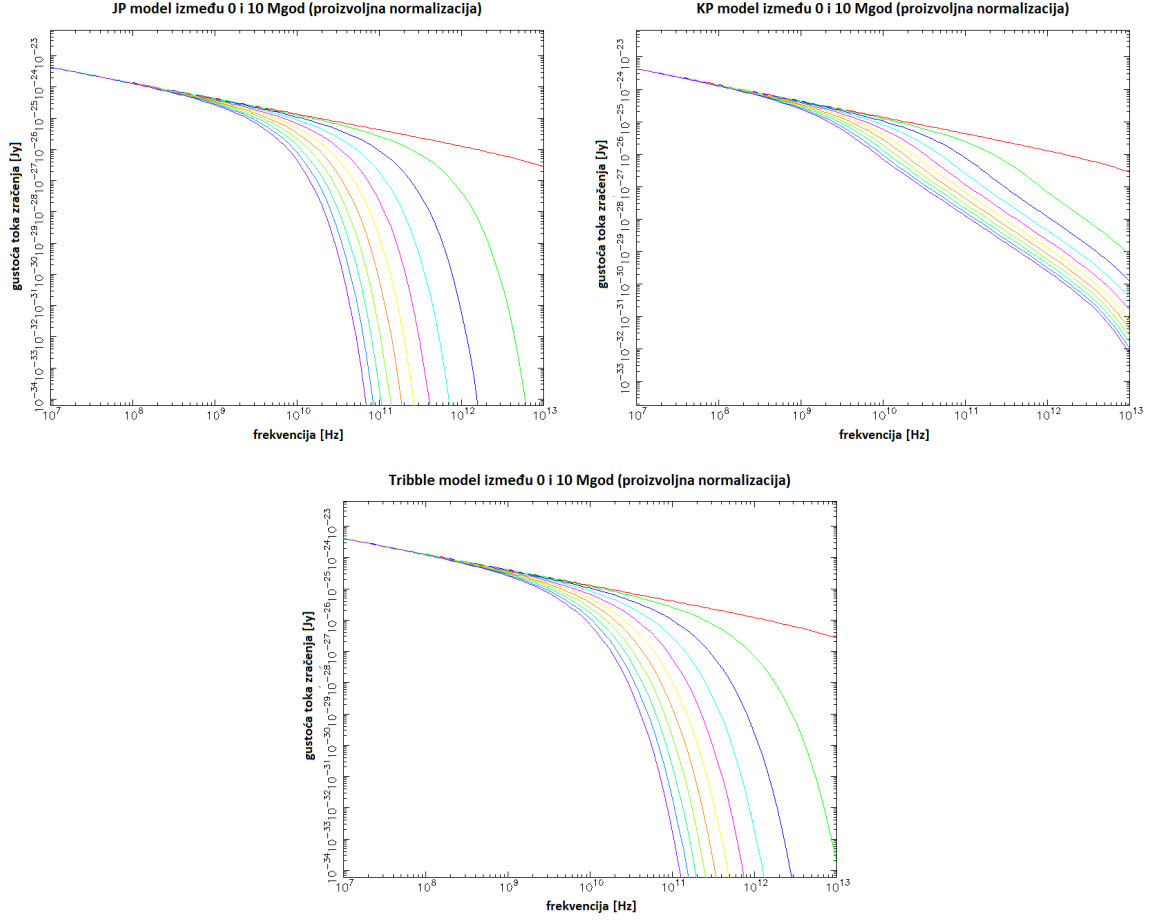
$$S_{model}(\nu) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sqrt{3}e^3}{8\pi\epsilon_0 cm_e} \int_0^\infty \int_0^\pi \int_{E_{min}}^{E_{max}} F(x) \frac{\sin^2(\delta)}{2} n(E) \frac{B^3 e^{\frac{B^2}{2B_0^2}}}{B_0^3} dE d\delta dB, \quad (4.11)$$

gdje je B_0 prosječno magnetsko polje u oblacima radiogalaksije (relacija 4.3), a $n(E)$ energetska distribucija elektrona iz relacije 4.8 uz $\beta = \beta_{JP}$.

Na slici 4.1 možemo vidjeti ovisnost gustoće toka zračenja o frekvenciji za JP, KP i Tribble model spektralne starosti između 0 i 10 milijuna godina. Vidimo da povećanjem spektralne starosti raste i nagib spektra zračenja, što znači da područja izvora većeg spektralnog indeksa imaju veću spektralnu starost. Također, povećanjem vrijednosti spektralne starosti vidimo da se vrijednost frekvencije prekida, nakon koje dolazi do naglog pada spektra zračenja, pomiče prema manjim vrijednostima.

4.6.3 Prilagodba modela spektralne starosti

Kod prilagodbe određenog modela spektralne starosti, kao dva najbitnija početna parametra postavljamo magnetsko polje (naredba *bfield*) u oblacima radiogalaksije i dobiveni indeks ubrizgavanja (naredba *injectionindex*). Također, posebno je postaviti minimalnu (naredba *minmyears*) i maksimalnu (naredba *myears*) spektralnu starost između kojih BRATS radi prilagodbu modela spektralne starosti. Kao minimum odabiremo 0 milijuna godina za sve modele i sve radiogalaksije u uzorku. Maksimalna spektralna starost će se naravno mijenjati ovisno o radiogalaksiji, a za potrebe našeg istraživanja za pojedinu radiogalaksiju odabiremo jednaku maksimalnu starost za sve modele spektralne starosti.



Slika 4.1: Primjeri JP modela (gore lijevo), KP modela (gore desno) i Tribble modela (dolje) gustoće toka zračenja (S_{model}) između 10 MHz i 10 THz za magnetsko polje $B = 1$ nT, indeks ubrizgavanja $\alpha_{inj} = 0.5$ i crveni pomak $z = 1$ uz proizvoljnu normalizaciju. Krivulje pokazuju model spektralne starosti između 0 milijuna godina (crvena krivulja) i 10 milijuna godina (ljubičasta krivulja).

Za prilagodbu JP, KP i Tribble modela spektralne starosti u softveru BRATS naredbe su redom *fitjpmode*, *fitkpmode* i *fitjptribble*. Svaka ova naredba računa model gustoće toka zračenja (S_{model}) na svim zadanim frekvencijama i uspoređuje rezultat s opaženom gustoćom toka zračenja (S). Pritom BRATS određuje χ^2 vrijednosti (relacija (4.4)) za odabrani model kako bi odredio dobrotu prilagodbe modela, računajući pritom i nepouzdanost spektralne starosti. Taj se postupak zatim ponavlja kroz određeni raspon spektralne starosti i određuje se najbolja prilagodba spektralne starosti za svaku regiju/piksel izvora. Pri završetku prilagodbe modela spektralne starosti, BRATS ispisuje vrijednost spektralne starosti određene regije/piksela unutar radioizvora koja je imala minimalnu spektralnu starost i regije/piksela koja je imala maksimalnu spektralnu starost te njihove pripadne pogreške.

4.7 Dijagrami Voronoi teselacije

Za proučavanje kozmičke okoline radiogalaksija koristimo metodu koja se temelji na postupku Voronoi teselacije. Voronoi teselacija [24, 28] podjela je plohe (u našem slučaju 2D plohe), koja sadrži proizvoljno razmještene točke, u mnogokute tako da svaki mnogokut (Voronoi ćelija) sadrži točno jednu točku. Svaka stranica mnogokuta jednako je udaljena od dviju točaka koje razdvaja, a svaki čvor Voronoi mreže jednako je udaljen od tri najbliže točke. U našem slučaju točke na 2D plohi predstavljaju položaj galaksija na nebeskoj sferi određen koordinatama rektascenzije (RA) i deklinacije (DEC). Postupkom Voronoi teselacije svakoj je galaksiji pridružena Voronoi ćelija određene površine, čiji je inverz jednak lokalnoj gustoći pripadne galaksije.

U svrhu izrade Voronoi dijagrama koristimo paket *scipy* unutar programskog jezika Python koji sadrži funkcije za provedbu Voronoi teselacije. Za radiogalaksije koje promatramo, iz kataloga [20] u polju COSMOS uzimamo galaksije na crvenim pomacima između $z - 0.1$ i $z + 0.1$, gdje je z crveni pomak radiogalaksije. Pritom uzimamo polje veličine 10×10 kvadratnih lučnih minuta centrirano na položaju radiogalaksije koju promatramo.

4.7.1 Kriterij povećane gustoće naseljenosti galaksija

Kako bismo odredili postoje li grupiranja galaksija oko radiogalaksija određujemo kriterij za povećanu gustoću naseljenosti galaksija. Uzimamo polje veličine jednog kvadratnog stupnja čiji se centar poklapa s centrom polja COSMOS. Crveni pomaci galaksija unutar jednog kvadratnog stupnja odgovaraju onima za prethodno manje polje oko naših radiogalaksija. Da bi se isključila mogućnost da je povećana gustoća rezultat slučajnog razmještaja galaksija, a ne stvarne grupiranosti galaksija, proveli smo Monte Carlo simulaciju. Naime, jednak broj galaksija kao i na realnoj slici od jednog kvadratnog stupnja nasumično je razmješten po jednakoj površini koju ima realna slika te je provedena Voronoi teselacija na takvoj simuliranoj slici i određena srednja gustoća naseljenosti. Postupak smo proveli 100 puta i na taj način odredili srednju vrijednost $\bar{\rho}$ i standardnu devijaciju σ_{ρ} dobivenih srednjih gustoća. Za granicu povećane gustoće uzeli smo vrijednost $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$. Sve galaksije čija lokalna gustoća prelazi ovu vrijednost smatramo gusto naseljenim galaksijama i njih zadržavamo u konačnom Voronoi dijagramu.

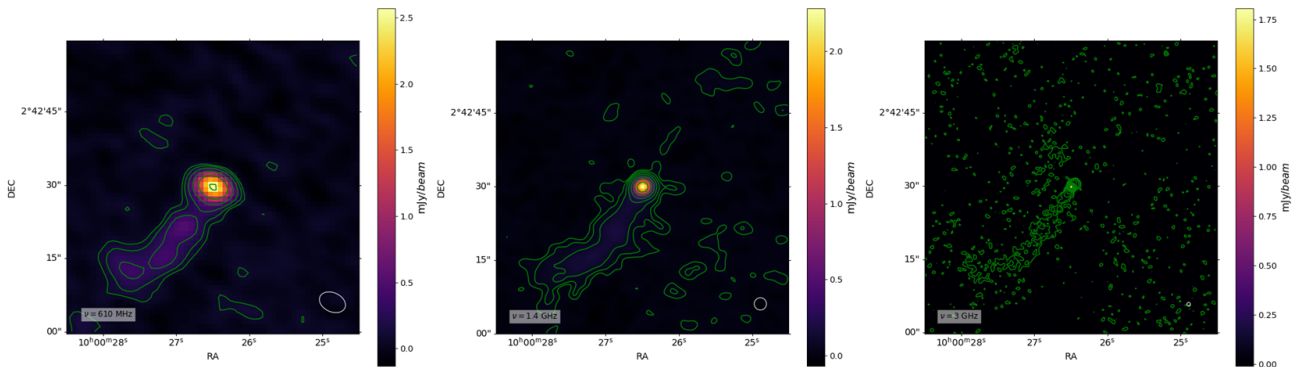
4.7.2 *Rendgensko zračenje i jata galaksija*

Uz pomoć Voronoi dijagrama možemo zaključiti postoji li grupiranje galaksija oko naših radiogalaksija, međutim to je nedovoljno da bismo bili sigurni da to grupiranje galaksija, ako ono postoji, čini galaktičko jato ili grupu. Da bi to saznali, najprije odabiremo one galaksije iz prethodno dobivenih Voronoi dijagrama čija je lokalna gustoća bila veća od postavljenog kriterija za gustoću $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$ i izrađujemo dijagram njihovog položaja na nebeskoj sferi. Koristeći podatke rendgenskog zračenja, prikupljenog od strane teleskopa XMM-Newton u području neba u kojem se nalaze naše galaksije, dodajemo konture rendgenskog zračenja na prethodno dobiveni dijagram položaja galaksija. Ako postoji područje rendgenskog zračenja oko naših radiogalaksija uz grupiranje okolnih galaksija oko njih ili u njohovoj blizini, to će biti potvrda da se vjerojatno radi o galaktičkom jatu, odnosno grupi. Na tom istom dijagramu, koristeći podatke položaja i radijusa jata galaksija iz kataloga poznatih galaktičkih jata u polju COSMOS, označujemo i područje poznatih jata, odnosno grupa galaksija. Na taj način dobit ćemo informaciju o tome nalaze li se radiogalaksije u području poznatih jata, odnosno grupa galaksija ili ne.

5 Rezultati

5.1 Radiogalaksija 44

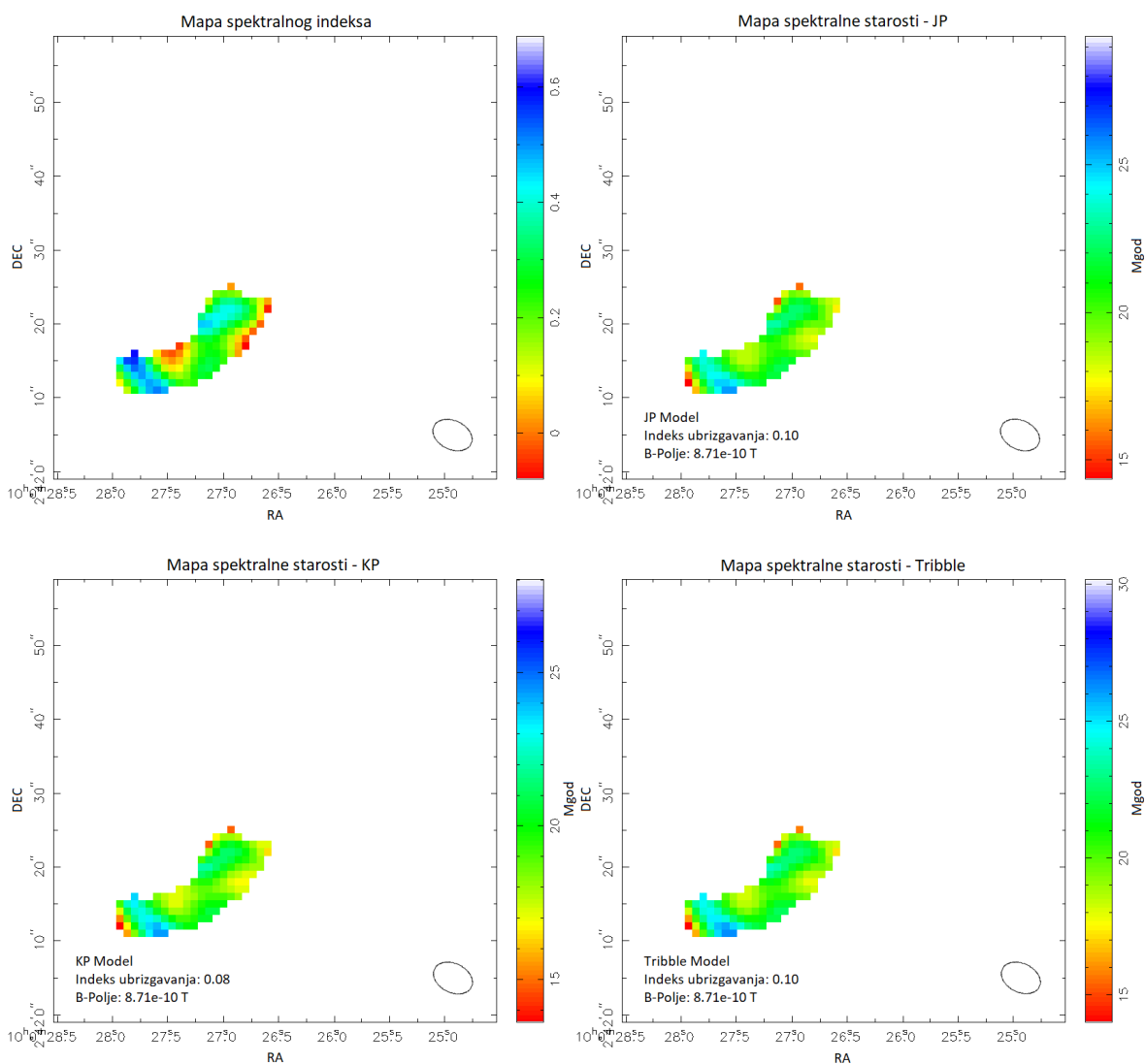
Radiogalaksija 44 nalazi se na crvenom pomaku $z_{radio} = 0.351$. Prema katalogu iz [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR I izvor, što vidimo na slici 5.1. Također, radiogalaksija 44 jedina je radiogalaksija u našem uzorku kod koje možemo vidjeti samo jedan oblak, što je vjerojatno posljedica relativističkog usnopljanja.



Slika 5.1: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 44 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Mapa spektralnog indeksa radiogalaksije 44 (slika 5.2, gore lijevo) pokazuje vrlo ravan spektar ($\alpha < 0.4$) sinkrotronskog zračenja u velikom području oblaka radiogalaksije. Minimum spektralnog indeksa radiogalaksije 44 iznosi $\alpha_{min} = -0.08 \pm 5.50$, a maksimum $\alpha_{max} = 0.60 \pm 5.38$, dok je srednja vrijednost spektralnog indeksa cijelog izvora jednaka $\bar{\alpha} = 0.25$. Dobivene velike nepouzdanosti minimuma i maksimuma spektralnog indeksa najvjerojatnije su rezultat toga što se i minimum i maksimum nalaze na rubu oblaka radiogalaksije. Maksimum spektralnog indeksa nalazi se pri kraju oblaka, što je očekivani rezultat za FR I izvor, kod kojeg energija plazme opada prema kraju oblaka. Također, primjećujemo da minimum spektralnog indeksa ima negativnu vrijednost, što odgovara invertiranom spektru zračenja. Međutim, zbog relativno male širine izvora i činjenice da se minimum nalazi na samom rubu oblaka, negativna vrijednost mogla bi biti rubni artefakt, a ne pouzdana vrijednost.

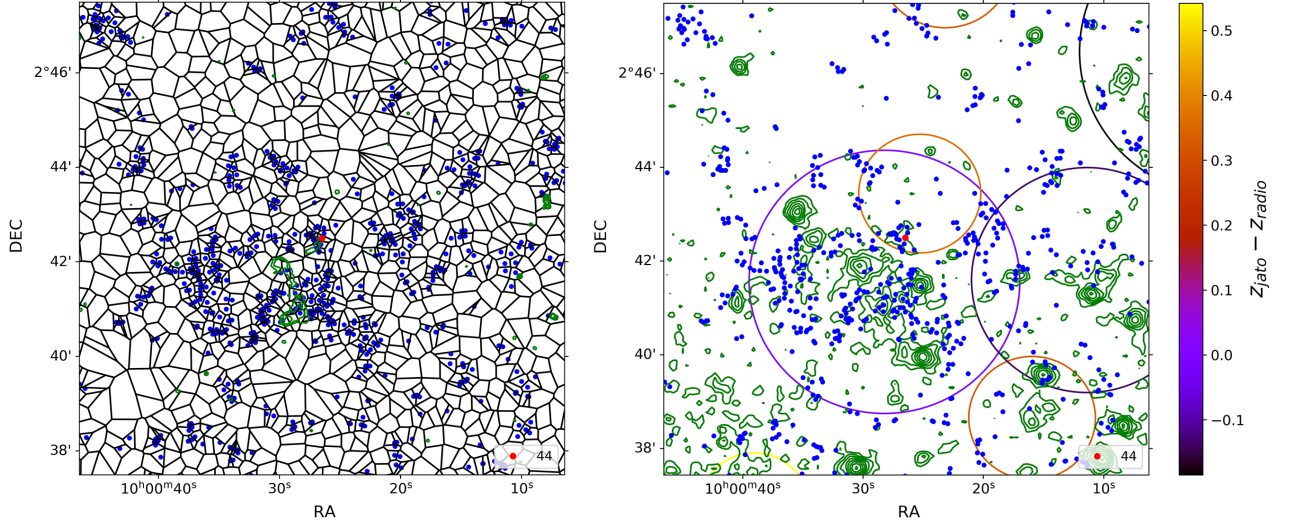
Za radiogalaksiju 44 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblaku u iznosu od $B = 0.871 \text{ nT}$. Dobivena vrijednost magnetskog polja rezultirala je indeksima



Slika 5.2: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 44. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 44. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	0.871	0.10	$14.35^{+10.63}_{-14.35}$	$25.53^{+5.65}_{-5.55}$
KP		0.08	$13.60^{+10.24}_{-13.60}$	$24.38^{+6.90}_{-5.52}$
Tribble		0.10	$14.00^{+11.68}_{-14.00}$	$26.25^{+6.66}_{-6.11}$

Tablica 5.1: Prosječno magnetsko polje B u oblaku radiogalaksije 44, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.3: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 44 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 44 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 25 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 44 (z_{radio}).

ubrzigavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.10$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.08$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.10$ za tri modela spektralne starosti. Vidimo da su sve tri vrijednosti indeksa ubrzigavanja slične i relativno blizu minimuma spektralnog indeksa radiogalaksije 44, što očekujemo.

Mape spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.2) pokazuju slična ponašanja spektralne starosti u oblaku radiogalaksije 44. Primjećujemo veliku spektralnu starost u cijelom području oblaka koja u većem području prelazi vrijednost iznad 17 milijuna godina. Najstarije područje oblaka odgovara upravo vrhu oblaka, što smo mogli očekivati jer kod FR I izvora najmanju energiju ima plazma na krajevima oblaka pa njezina starost mora biti velika. Uspoređujući mape spektralne starosti s mapom spektralnog indeksa vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralne starosti, što je u skladu s teorijskim predviđanjem. Prema rezultatima tablice 5.1 vidimo da je minimum spektralne starosti oblaka radiogalaksije za sva tri modela spektralne starosti oko 14 milijuna godina. Maksimum spektralne starosti za JP i Tribble model iznosi oko 26 milijuna godina, dok za KP model iznosi oko 24 milijuna godina. Uzevši pogrešku spektralne starosti, maksimum spektralne starosti kreće se i do oko 31 ili čak 33 milijuna godina, ovisno o modelu. Voronoi dijagram

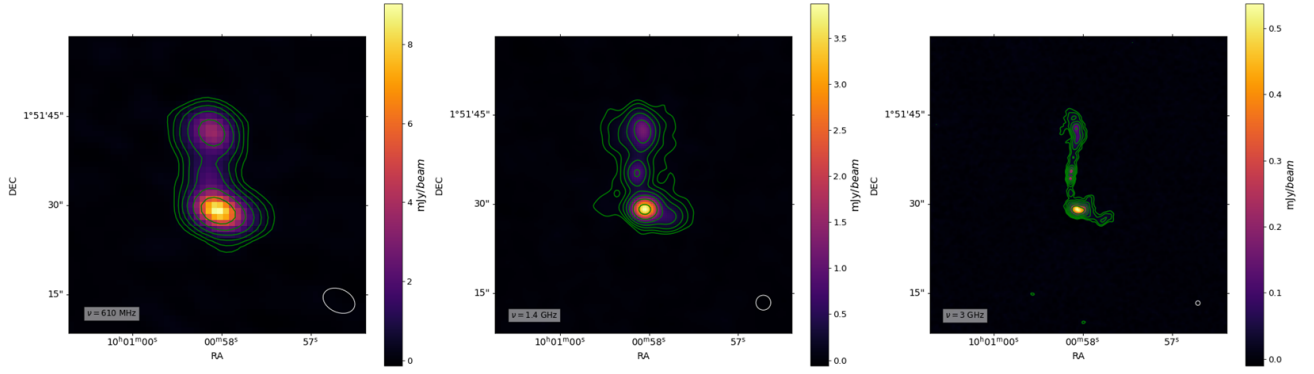
(slika 5.3, lijevo) okoline radiogalaksije 44 (crvena točka) pokazuje da se ona nalazi u gusto naseljenom području. Neposredno oko same radiogalaksije vidljivo je grupiranje malog broja galaksija, dok u blizini vidimo još dva grupiranja (ispod i lijevo od radiogalaksije 44) mnogo većeg broja galaksija koja bi skupa mogla činiti jato. Prema konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz vidimo da se ispod radiogalaksije 44 nalazi radiogalaksija 10913 ($z_{radio} = 0.349$), koju ćemo kasnije detaljno analizirati.

Već iz samog Voronoi dijagrama mogli bismo zaključiti da je radiogalaksija 44 dio galaktičkog jata. Kao dodatnu potvrdu promatramo dijagram iste kozmičke okoline (slika 5.3, desno) kao i na Voronoi dijagramu, ali s označenim konturama rendgenskog zračenja (zeleno) i galaktičkih jata (krugovi). Na dijagramu vidimo izraženo rendgensko zračenje u području većeg grupiranja galaksija u blizini radiogalaksije 44, pogotovo ispod nje. Također, vidimo ne toliko izraženo rendgensko zračenje neposredno oko same radiogalaksije. Prema konturama galaktičkih jata vidimo da postoji jedno galaktičko jato koje okružuje radiogalaksiju 44, obuhvaćajući pritom i veće područje velike gustoće naseljenosti, gdje postoji izraženo rendgensko zračenje. Crveni pomak ovog jata iznosi $z_{jato} = 0.349$, što odgovara crvenom pomaku radiogalaksije 10913 u blizini, dok je masa jata prema katalogu [21] jednaka $M_{200} = 9.12 \times 10^{13} M_{\odot}$. Budući da je razlika crvenih pomaka jata i radiogalaksije 44 jednaka svega $|\Delta z| = 0.002$ zaključujemo da je radiogalaksija 44 dio ovog jata galaksija.

5.2 Radiogalaksija 177

Radiogalaksija 177 druga je najudaljenija radiogalaksija u našem uzorku, a nalazi se na crvenom pomaku $z_{radio} = 1.687$. Prema [36] ova radiogalaksija klasificirana je kao FR I izvor s dva mlaza, gdje je južni dio više nalik FR II izvoru. Na 3 GHz (slika 5.4) vidimo savijenost južnog oblaka što upućuje na moguću interakciju s okolinom.

Mapa spektralnog indeksa radiogalaksije 177 (slika 5.5, gore lijevo) pokazuje ravan spektar ($\alpha < 0.6$) u području neposredno oko središnje jezgre radiogalaksije i na desnom rubu sjevernog oblaka, gdje je minimum spektralnog indeksa $\alpha_{min} = 0.44 \pm 5.48$. Ponovno imamo veliku nepouzdanost minimuma spektralnog indeksa kao i kod radiogalaksije 44. U ostatku oblaka radiogalaksije spektar zračenja je strmiji ($\alpha > 0.6$) s nagibom koji se povećava prema rubovima oblaka, a najstrmiji je na rubu južnog oblaka s nagibom od $\alpha_{max} = 1.01 \pm 2.35$. Srednja vrijednost spektralnog

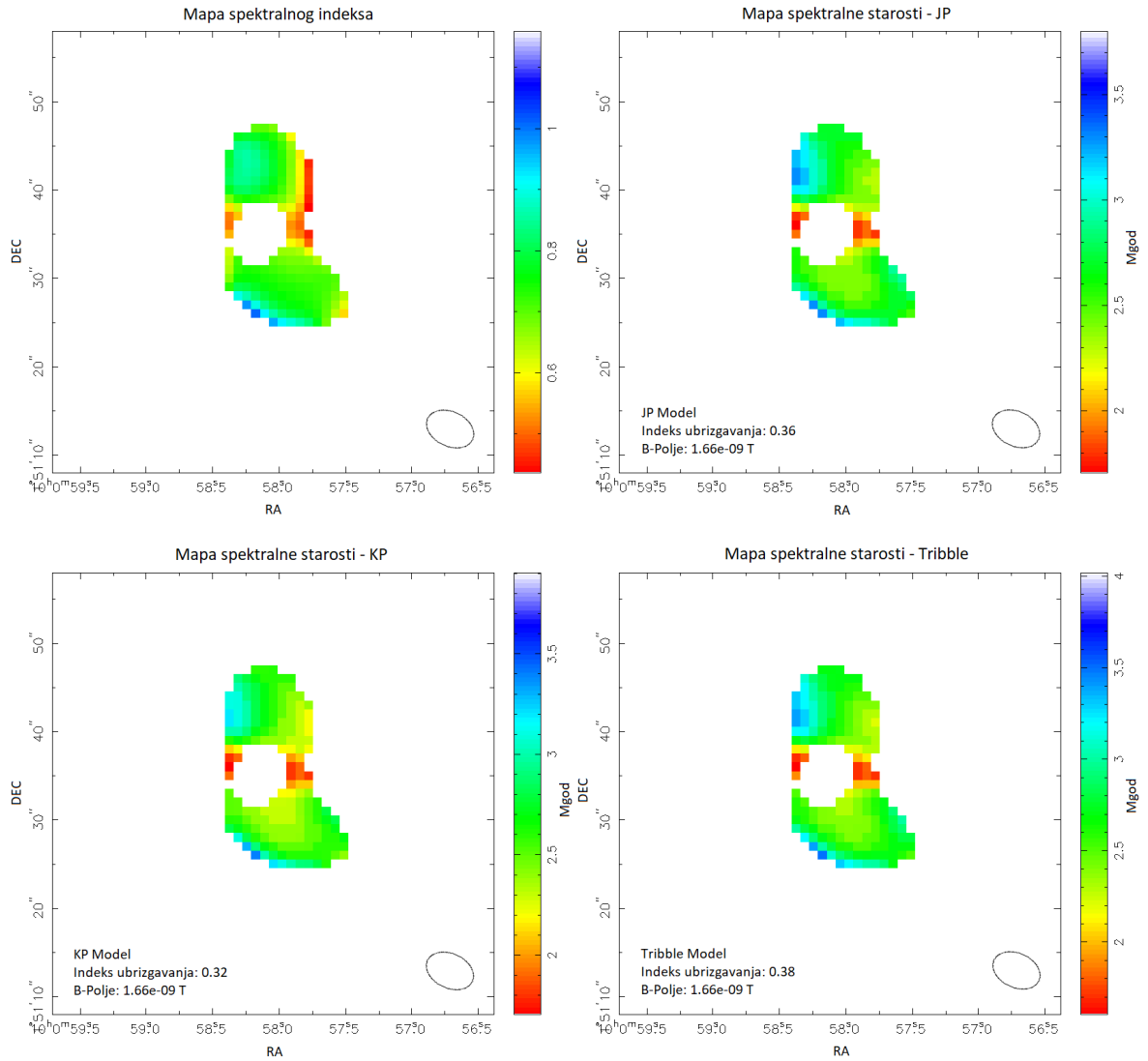


Slika 5.4: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 177 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

indeksa cijelog izvora jednaka je $\bar{\alpha} = 0.72$, što odgovara relativno strmom spektru sinkrotronskog zračenja oblaka.

Za radiogalaksiju 177 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1.66 \text{ nT}$. Za ovo magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.36$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.32$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.38$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja vrlo su slična i nalaze se ispod, ali ipak blizu vrijednosti minimuma spektralnog indeksa, što i očekujemo.

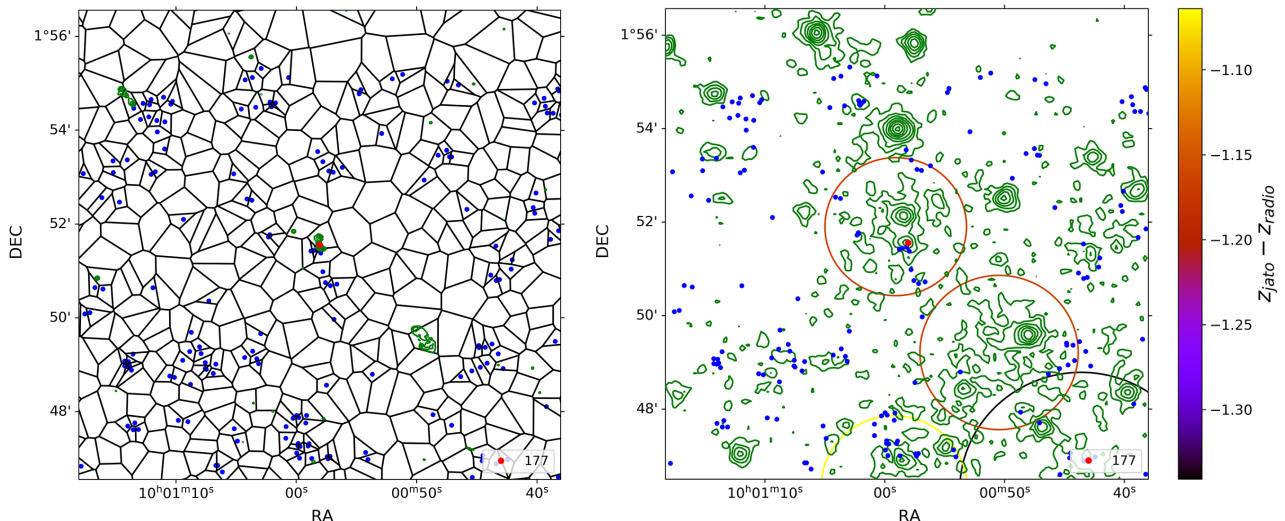
Analizirajući mape spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.5) vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralnog indeksa, što i očekujemo. Na mapama spektralne starosti možemo vidjeti da najmanja spektralna starost odgovara području oko središnje jezgre radiogalaksije 177. Prema tablici 5.2 minimum spektralne starosti za JP i KP model iznose 1.71 milijuna godina, dok za Tribble model iznosi 1.61 milijuna godina. Udaljavanjem od središnje jezgre spektralna starost raste, što i očekujemo za FR I izvore. Također, vidimo da u području južnog oblaka radiogalaksije 177 spektralna starost raste približavanjem rubovima oblaka, gdje maksimum spektralne starosti iznosi između 3.3 i 3.5 milijuna godina, ovisno o modelu. U području sjevernog oblaka radiogalaksije 177 lijeva strana oblaka ima veću spektralnu starost od desne strane, što je vjerojatno posljedica blage zakrivljenosti sjevernog oblaka vidljive na frekvenciji od 3 GHz (slika 5.4). Uzimajući pogrešku spektralne starosti u obzir, maksimalna spektralna starost radiogalaksije 177 kreće se i do vrijednosti od oko 4.1 milijuna godina za KP i Tribble model.



Slika 5.5: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 177. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 177. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.66	0.36	$1.71^{+1.11}_{-1.71}$	$3.31^{+0.57}_{-0.53}$
KP		0.32	$1.71^{+1.06}_{-1.71}$	$3.39^{+0.70}_{-0.65}$
Tribble		0.38	$1.61^{+1.27}_{-1.61}$	$3.49^{+0.60}_{-0.68}$

Tablica 5.2: Prosječno magnetsko polje B u oblaku radiogalaksije 177, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.6: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 177 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 3.5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 177 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2.5 i 50 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 177 (z_{radio}).

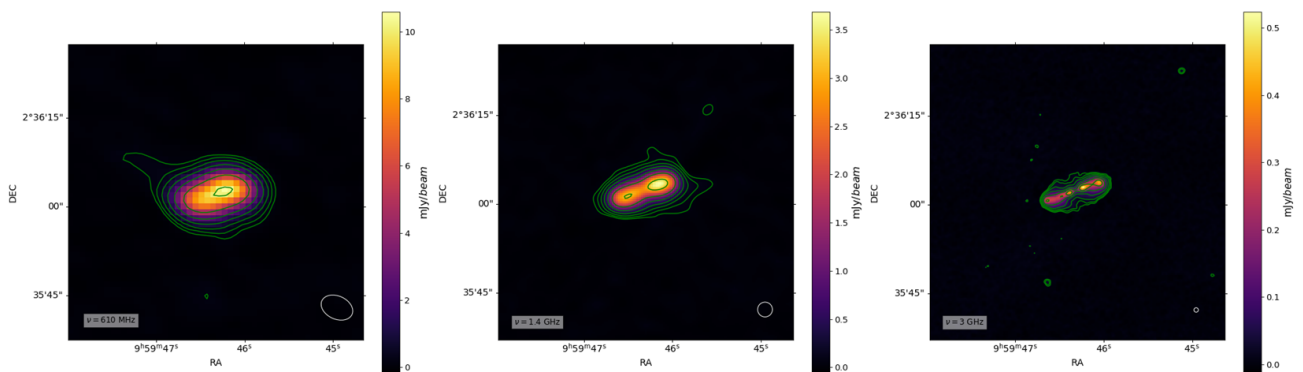
Voronoi dijagram (slika 5.6, lijevo) okoline radiogalaksije 177 pokazuje da se radiogalaksija nalazi u području male gustoće naseljenosti. U neposrednoj blizini radiogalaksije 177 (crvena točka) postoji izrazito malen broj galaksija grupiran oko same radiogalaksije. Također, na Voronoi dijagramu ne vidimo veća grupiranja galaksija koja bi mogla upućivati na postojanje galaktičkog jata u okolini radiogalaksije. Analizirajući konture radiozračenja (zeleno), vidimo da se u području neba oko radiogalaksije 177 nalazi radiogalaksija 10910 (dolje desno) na crvenom pomaku $z_{radio} = 0.53$ i radiogalaksija 10919 (gore lijevo) na crvenom pomaku $z_{radio} = 1.483$, koje ćemo kasnije detaljno analizirati.

Na dijagramu iste okoline radiogalaksije 177 (slika 5.6, desno) vidimo izraženo rendgensko zračenje u široj okolini i u području neposredno oko radiogalaksije, gdje vidimo dva maksimuma, a gdje se jedan nalazi na položaju radiogalaksije. Prema katalogu iz [32], sama radiogalaksija 177 točkasti je izvor rendgenskog zračenja. Također, na dijagramu vidimo da oko radiogalaksije postoji galaktičko jato, međutim njegov crveni pomak je $z_{jato} = 0.529$, što je vrlo daleko od crvenog pomaka radiogalaksije 177, a masa mu prema [21] iznosi $M_{200} = 3.34 \times 10^{13} M_{\odot}$, što odgovara

masi grupe galaksija. Drugi maksimum rendgenskog zračenja u neposrednoj blizini radiogalaksije 177 vjerojatno pripada ovoj grupi. Na temelju prethodno iznesenih rezultata možemo zaključiti da je radiogalaksija 177 vjerojatno izolirana galaksija.

5.3 Radiogalaksija 187

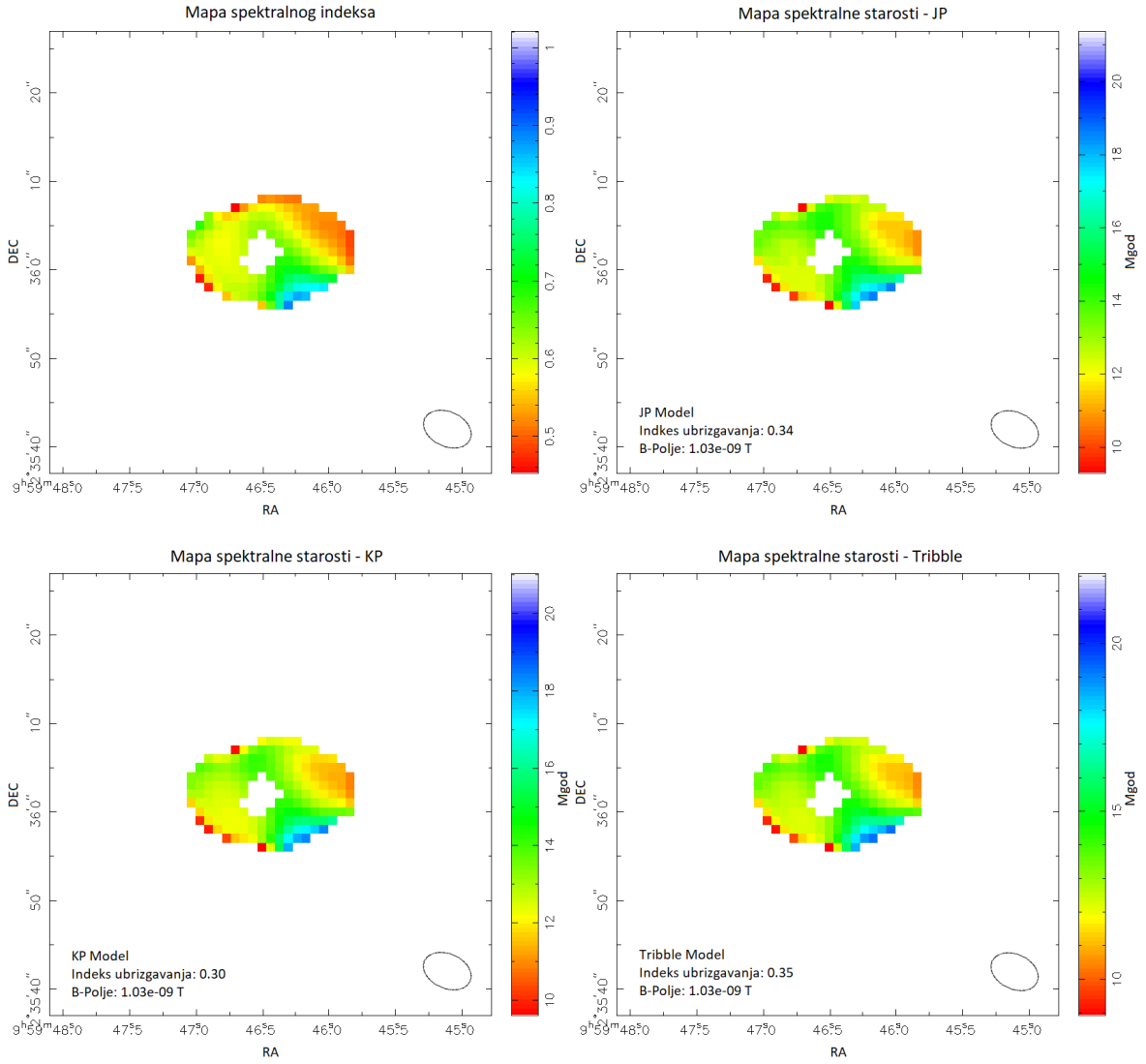
Radiogalaksija 187 najbliža je radiogalaksija u našem uzorku, a nalazi se na crvenom pomaku $z_{radio} = 0.344$. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR I izvor s dva difuzna oblaka, što vidimo na slici 5.7. Na frekvenciji 3 GHz radiogalaksija 187 ima blago profinjeniju strukturu u odnosu na frekvenciju 1.4 GHz ili 610 MHz, na kojoj zbog loše razlučivosti ne vidimo dobro strukturu radiogalaksije.



Slika 5.7: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 187 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Analizirajući mapu spektralnog indeksa radiogalaksije 187 (slika 5.8, gore lijevo) vidimo relativno ravan spektar ($\alpha < 0.6$) u velikom području oba oblaka radiogalaksije, najviše u području vrha oblaka. Minimum spektralnog indeksa iznosi $\alpha_{min} = 0.45 \pm 5.48$, dok maksimum iznosi $\alpha_{max} = 0.89 \pm 5.45$. Ponovno imamo slučaj velike nepouzdanosti minimuma i maksimuma spektralnog indeksa zbog blizine rubu izvora. Srednji spektralni indeks oblaka iznosi oko $\bar{\alpha} = 0.57$, što je blizu granice ravnog i strmog spektra zračenja.

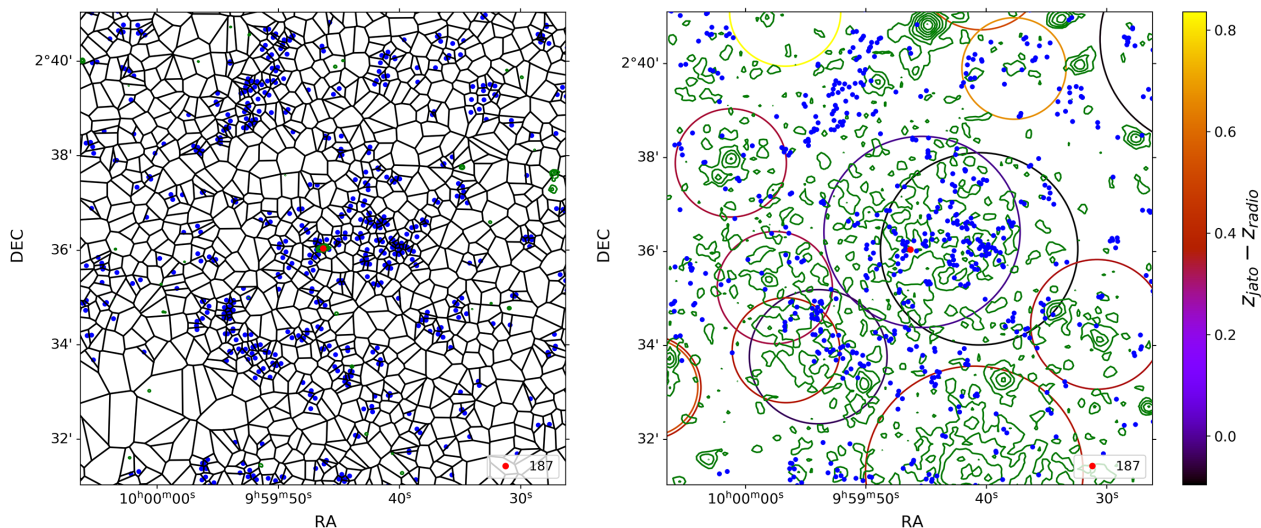
Za radiogalaksiju 187 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u odnosu od $B = 1.03 \text{ nT}$. Dobivena vrijednost magnetskog polja rezultirala je indeksima ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.34$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.30$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.35$ za tri modela spektralne starosti. Za sva tri modela spektralne starosti indeksi ubrizgavanja imaju



Slika 5.8: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 187. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 187. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.03	0.34	$9.28^{+8.73}_{-9.28}$	$18.59^{+5.67}_{-6.04}$
KP		0.30	$9.60^{+8.51}_{-9.60}$	$18.30^{+10.42}_{-7.92}$
Tribble		0.35	$8.92^{+9.44}_{-8.92}$	$19.20^{+6.72}_{-6.80}$

Tablica 5.3: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 187, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.9: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 187 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 3.5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 187 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2 i 70 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 187 (z_{radio}).

slične vrijednosti i nalaze se mnogo više ispod vrijednosti minimuma spektralnog indeksa u odnosu na preostale radiogalaksije, ali ipak relativno blizu minimuma.

Mape spektralne starosti JP, KP i Tribble modela (slika 5.8) pokazuju ponašanje spektralne starosti radiogalaksije 187 u skladu s ponašanjem spektralnog indeksa, što je u skladu očekivanjem. Za sva tri modela vidimo da manju spektralna starost imaju područja vrhova oblaka, gdje je radiogalaksija bila najsajnija (slika 5.7). Također, većina područja oblaka ima spektralnu starost između 10 i 14 milijuna godina, dok područja dalje od vrhova oblaka imaju mnogo veću spektralnu starost. Prema rezultatima tablice 5.3 vidimo da je minimum spektralne starosti za JP i Tribble model oko 9 milijuna godina, a za KP model bliže 10 milijuna godina, dok je maksimum spektralne starosti oko 19 milijuna godina za JP i Tribble model, a oko 18 milijuna godina za KP model. Velika spektralna starost oblaka u skladu je s očekivanjem spektralne starosti za FR I izvor. Uzimajući u obzir pogrešku spektralne starosti, maksimum spektralne starosti oblaka kreće se do vrijednosti između 24 i 29 milijuna godina, ovisno o modelu.

Analizirajući Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 187 (slika 5.9, lijevo) vi-

dimo da se ona nalazi u području velike gustoće naseljenosti. Na dijagramu postoji grupiranje većeg broja galaksija neposredno oko radiogalaksije 187 (crvena točka), ali i s njezine desne strane. Također, vidljiva su i dva veća, udaljenija i izdužena grupiranja galaksija ispod i iznad položaja radiogalaksije 187. Grupiranje galaksija oko radiogalaksije 187 upućuje na postojanje mogućeg galaktičkog jata u tom području.

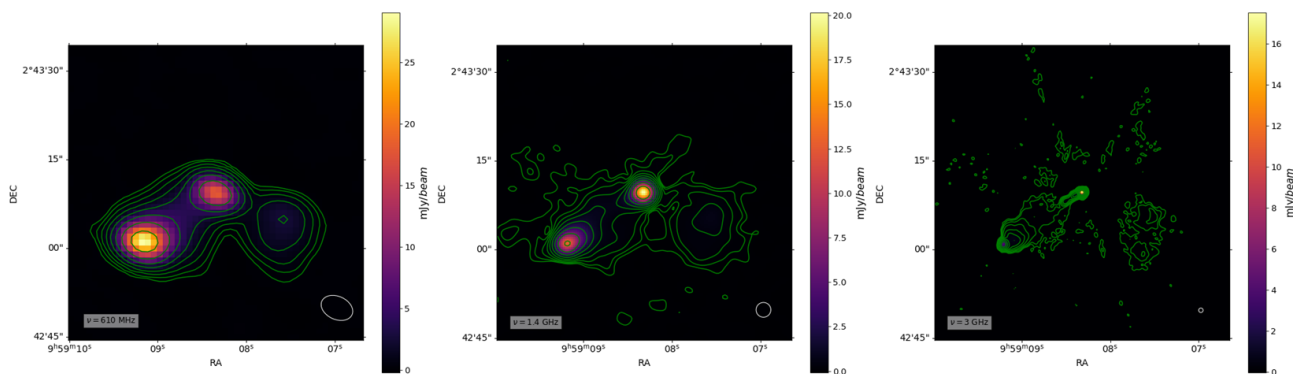
Na dijagramu iste kozmičke okoline radiogalaksije 187 (slika 5.9, desno), vidimo izraženo rendgensko zračenje (zeleno) u cijelom području okoline radiogalaksije. Oko same radiogalaksije 187 vidimo široko područje rendgenskog zračenja koje obuhvaća grupu galaksija vidljivu na Voronoi dijagramu oko radiogalaksije. Prema konturama poznatih galaktičkih jata (krugovi) vidimo da postoji veliki broj jata u području neba oko radiogalaksije 187. Oko radiogalaksije 187 postoje čak dva jata čiji rubovi okružuju radiogalaksiju, a gdje je centar lijevog jata vizualno bliži položaju radiogalaksije. Crveni pomak desnog jata (crni krug) je $z_{jato} = 0.248$, a lijevog jata (ljubičasti krug) $z_{jato} = 0.342$, dok su im mase redom $M_{200} = 1.55 \times 10^{13} M_{\odot}$ i $M_{200} = 3.3 \times 10^{13} M_{\odot}$, što odgovara masama grupe galaksija. Budući da je razlika crvenih pomaka lijeve grupe i radiogalaksije 187 svega $|\Delta z| = 0.002$, zaključujemo da radiogalaksija pripada upravo lijevoj grupi galaksija. Također, u okolini radiogalaksije 187 postoji treća grupa mase $M_{200} = 8.84 \times 10^{12} M_{\odot}$ koja je relativno blizu ($z = 0.308$), a okružuje izduženu nakupinu galaksija vidljivu ispod radiogalaksije.

5.4 Radiogalaksija 10900

Radiogalaksija 10900 nalazi se na crvenom pomaku $z_{radio} = 1.308$. Prema [36] ova radiogalaksija klasificirana je kao FR II izvor sa svinutim repovima. Svinuti repovi mogu se vidjeti na slici 5.10, gdje su oba oblaka radiogalaksije svinuta prema jugu. Takva svinutost oblaka upućuje na interakciju radiogalaksije s okolinom.

Prema mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10900 (slika 5.11, gore lijevo) vidimo da ravan spektar ($\alpha < 0.6$) obuhvaća veće područje desnog oblaka i gornji dio lijevog oblaka, dok jug lijevog oblaka ima strmiji ($\alpha > 0.6$) spektar zračenja. Minimum spektralnog indeksa oblaka iznosi $\alpha_{min} = 0.19 \pm 2.32$, dok maksimum iznosi $\alpha_{max} = 0.97 \pm 1.54$. Srednja vrijednost spektralnog indeksa iznosi $\bar{\alpha} = 0.64$, što odgovara strmom spektru sinkrotronskog zračenja.

Za radiogalaksiju 10900 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u



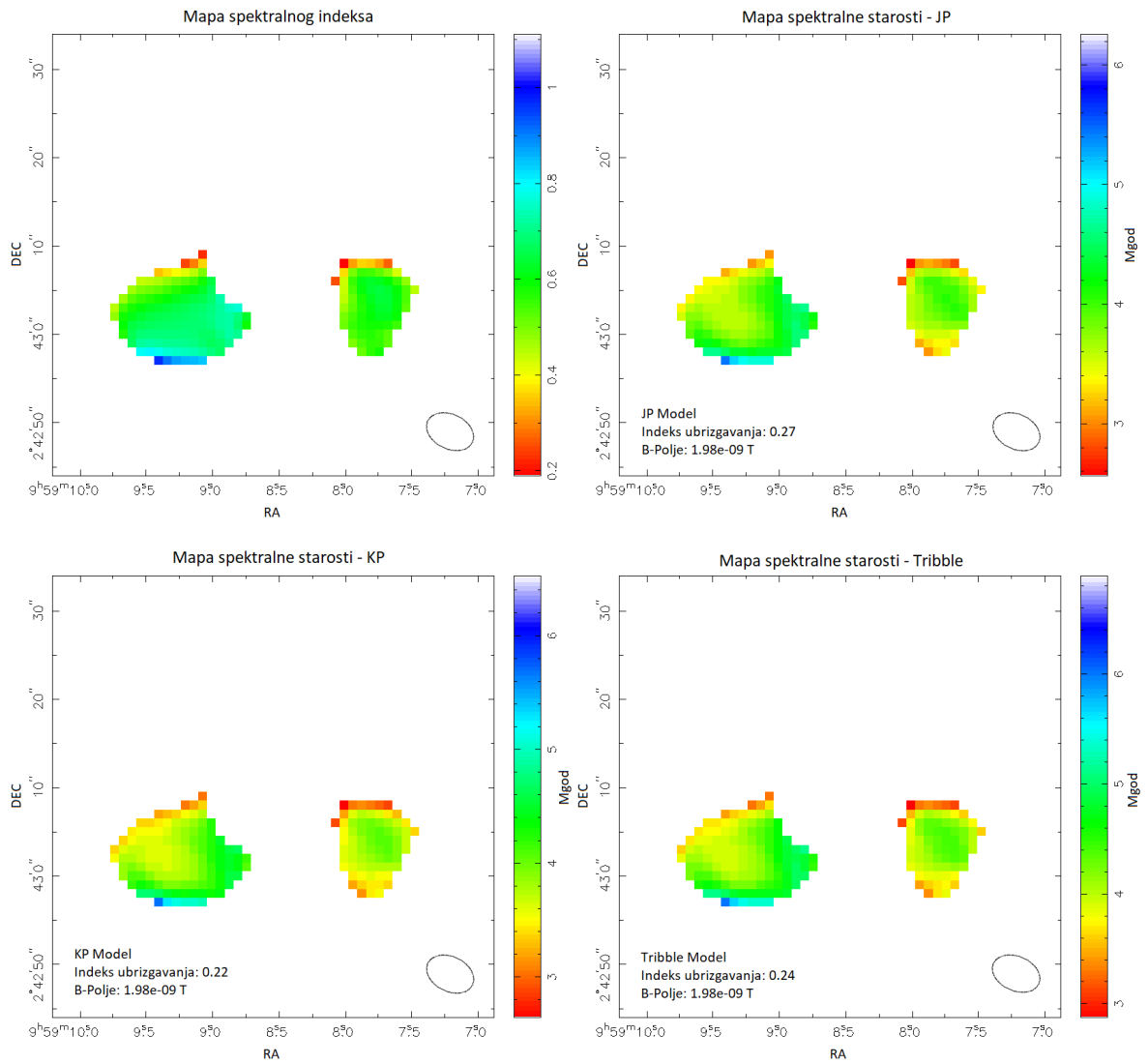
Slika 5.10: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10900 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

iznosu od $B = 1.98 \text{ nT}$. Ovo magnetsko polje dalo je kao rezultat indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.27$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.22$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.24$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja u blizini su minimuma spektralnog indeksa, što smo i očekivali.

Na mapama spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.11) vidimo da spektralna starost oblaka radiogalaksije 10900 prati slično ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela spektralne starosti vidimo da najmanju spektralnu starost imaju rubna područja desnog oblaka te sjever i unutrašnjosti lijevog oblaka bliže vrhu, gdje je radiogalaksija bila vidljivo najsjajnija (slika 5.10). Prema rezultatima tablice 5.4 vidimo da je minimum spektralne starosti između 2.5 i 3 milijuna godina za sva tri modela spektralne starosti, dok se maksimum kreće između 5.4 milijuna godina za JP model i 6 milijuna godina za Tribble model spektralne starosti. Uzimajući u obzir pogrešku spektralne starosti, spektralna starost oblaka radiogalaksije 10900 ne prelazi 7 milijuna godina.

Na Voronoi dijagramu okoline radiogalaksije 10900 (slika 5.12, lijevo) vidimo da neposredno oko same radiogalaksije 10900 (crvena točka) postoji mali broj galaksija grupiran oko nje same. U široj okolini radiogalaksije na dijagramu ne vidimo neko veće grupiranje galaksija koje bi moglo upućivati na postojanje galaktičkog jata u blizini radiogalaksije 10900.

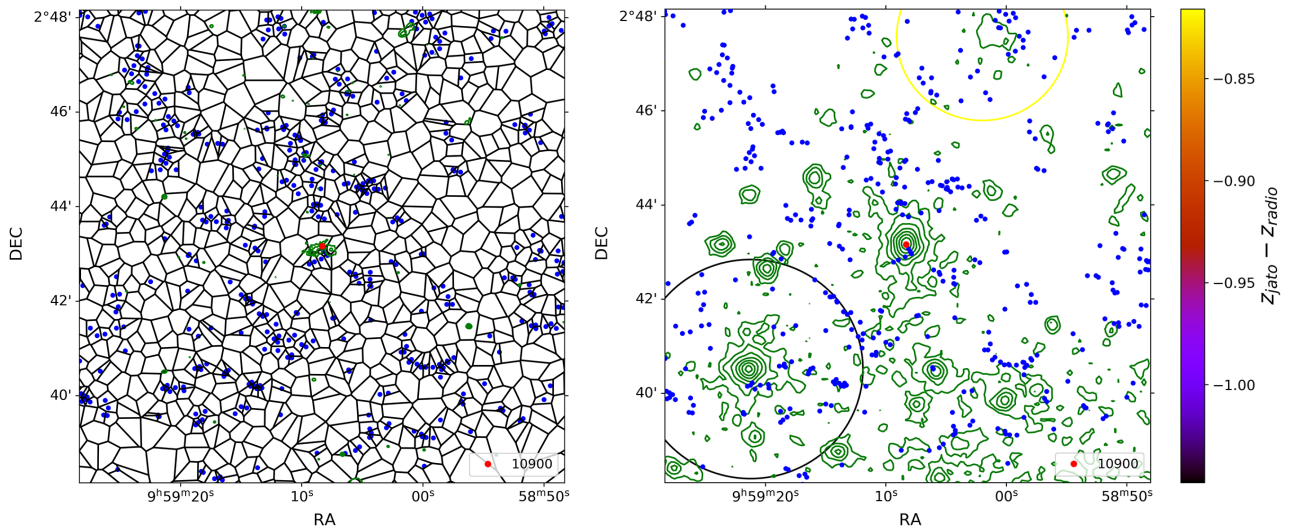
Analizirajući dijagram iste kozmičke okoline radiogalaksije 10900 (slika 5.12, desno) vidimo izraženo rendgensko zračenje (zeleno) oko same radiogalaksije, gdje



Slika 5.11: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10900. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10900. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.98	0.27	$2.56^{+0.87}_{-1.35}$	$5.44^{+0.64}_{-0.69}$
KP		0.22	$2.64^{+0.77}_{-0.96}$	$5.68^{+0.78}_{-0.79}$
Tribble		0.24	$2.88^{+0.92}_{-1.26}$	$6.00^{+0.64}_{-0.81}$

Tablica 5.4: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10900, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



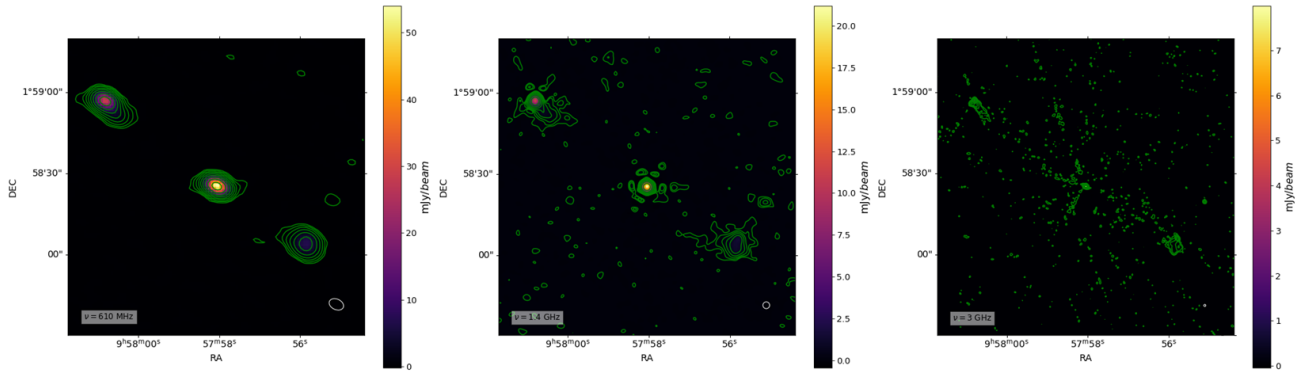
Slika 5.12: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10900 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 20 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10900 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2 i 200 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10900 (z_{radio}).

se maksimum tog zračenja poklapa s položajem optičkog središta radiogalaksije 10900. Prema katalogu iz [32] ova radiogalaksija snažan je točkasti izvor rendgenskog zračenja, što je vidljivo iz kontura rendgenskog zračenja na dijagramu. Međutim, na temelju kontura poznatih galaktičkih jata (krugovi), oko radiogalaksije 10900 ne postoji galaktičko jato. Stoga, prema rezultatima dijagrama na slici 5.12 možemo zaključiti da radiogalaksija 10900 vjerojatno ne pripada nekom galaktičkom jatu ili grupi.

5.5 Radiogalaksija 10901

Radiogalaksija 10901 najudaljenija je radiogalaksija u našem uzorku, a nalazi se na crvenom pomaku od $z_{\text{radio}} = 2.239$. Prema [36] radiogalaksija 10901 klasificirana je kao FR II izvor s istaknutom središnjom jezgrom. Središnja jezgra najbolje se vidi na slici 5.13, gdje vidimo da je ona na sve tri frekvencije mnogo sjajnija od oblaka.

Na mapi spektralnog indeksa radiogalaksije 10901 (slika 5.14, gore lijevo) vidimo da je ravan spektar ($\alpha < 0.6$) zračenja uglavnom lokaliziran na malom području početka sjevernog oblaka radiogalaksije. U ostatku područja oba oblaka radiogalak-

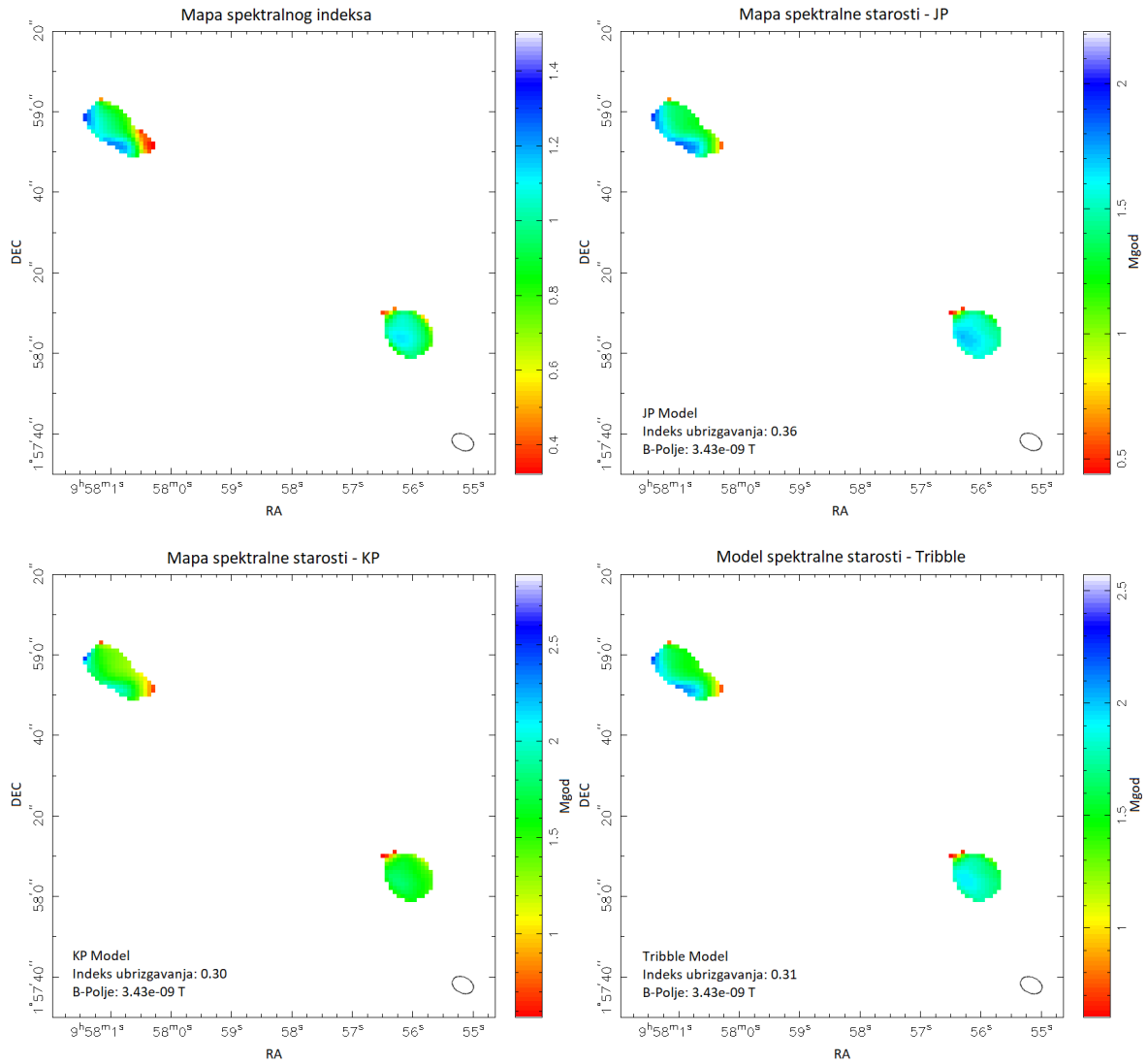


Slika 5.13: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10901 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

sije vidimo izrazito strm spektar zračenja ($\alpha > 0.6$). Minimum spektralnog indeksa oblaka jednak je $\alpha_{min} = 0.32 \pm 6.33$, dok je maksimum jednak $\alpha_{max} = 1.31 \pm 3.81$. Ponovno vidimo veliku nepouzdanost spektralnog indeksa zbog blizine rubu oblaka. Srednja vrijednost spektralnog indeksa oblaka jednaka je $\bar{\alpha} = 0.88$, što odgovara vrlo strmom spektru sinkrotronskog zračenja.

Za radiogalaksiju 10901 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 3.43 \text{ nT}$, što je najveći iznos magnetskog polja za radiogalaksiju u uzorku. Dobiveni iznos magnetskog polja rezultirao je indeksima ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.36$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.30$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.31$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se oko vrijednosti minimuma spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem.

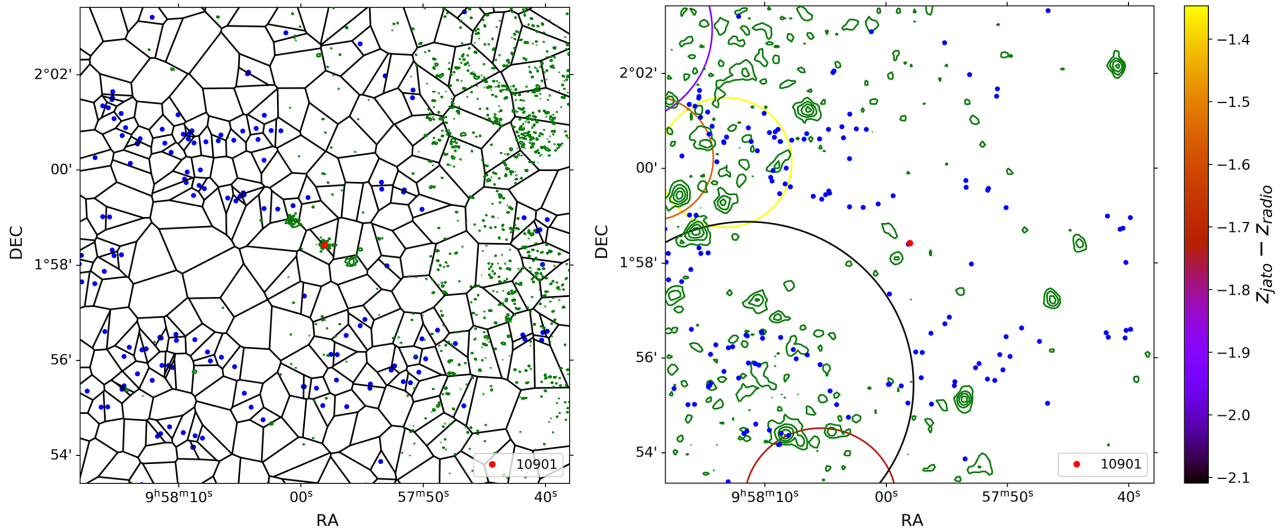
Analizirajući mape spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.14) vidimo očekivano slaganje u ponašanju spektralne starosti i spektralnog indeksa u oblacima. Prema dobivenim mapama spektralne starosti vidimo da je radiogalaksija 10901 spektralno mlada radiogalaksija, kod koje su veća područja oblaka radiogalaksije spektralne starosti mnogo manje od 2 milijuna godina za sva tri modela. Prema tablici 5.5 vidimo da se vrijednost minimuma spektralne starosti kreće između 0.4 i 0.6 milijuna godina, a maksimum između 1.9 i 2.5 milijuna godina, ovisno o modelu. Čak i ako uzmemo pogrešku spektralne starosti u obzir, dobivamo da spektralna starost oblaka ne prelazi 3 milijuna godina. Ovaj rezultat upućuje na to da je plazma u oblacima ovog dalekog FR II izvora tek na početku radijativnih gubitaka energije.



Slika 5.14: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10901. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10901. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	3.43	0.36	$0.44^{+0.98}_{-0.44}$	$1.92^{+0.67}_{-0.42}$
KP		0.30	$0.57^{+0.91}_{-0.57}$	$2.49^{+0.00}_{-0.81}$
Tribble		0.31	$0.60^{+1.02}_{-0.60}$	$2.24^{+0.76}_{-0.52}$

Tablica 5.5: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10901, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.15: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10901 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 20 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10901 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 13 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10901 (z_{radio}).

Zanimljivost je da smo za gornju pogrešku maksimuma starosti za KP model dobili 0 milijuna godina. Taj rezultat znači da pogreška prelazi zadani maksimum spektralne starosti za prilagodbu modela. Nažalost, povećanje maksimuma spektralne starosti (naredba *myears*) za prilagodbu KP modela ne pomaže u rješavanju ovog problema i daje kao rezultat spektralnu starost veću od zadanog maksimuma.

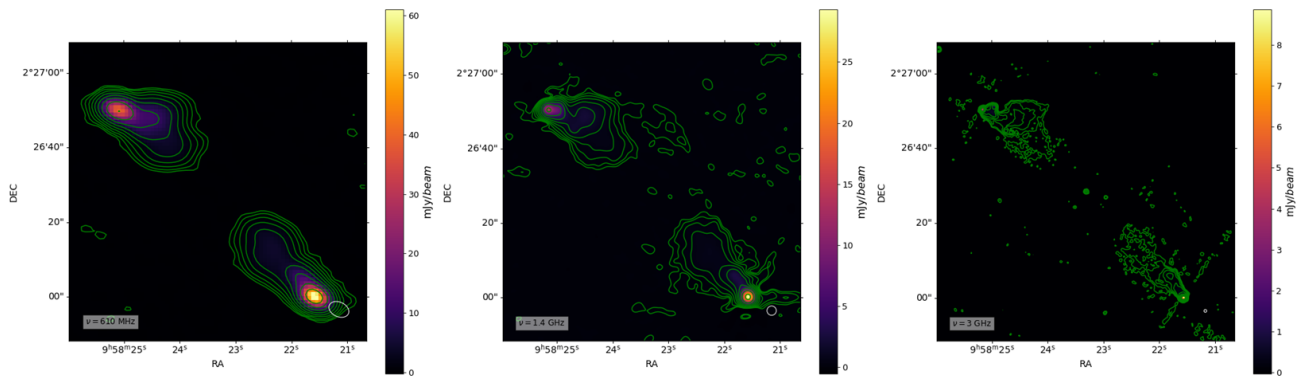
Prema Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10901 (slika 5.15, lijevo) vidimo da se radiogalaksija nalazi u području vrlo male gustoće naseljenosti. Unutar promatrane okoline radiogalaksije ne vidimo niti jedno veliko grupiranje galaksija koje bi upućivalo na postojanje galaktičkog jata, a neposredno uz samu radiogalaksiju nema grupiranja galaksija.

Na dijagramu iste kozmičke okoline radiogalaksije 10901 (slika 5.15, desno) vidimo da nema izraženog rendgenskog zračenja (zeleno) u području oko same radiogalaksije, dok na većim udaljenostima vidimo određeni broj maksimuma rendgenskog zračenja. Međutim, uspoređujući slabo izražene konture rendgenskog zračenja oko radiogalaksije i konture radiozračenja (zeleno) na Voronoi dijagramu, možemo vidjeti da postoji slaba kontura rendgenskog zračenja na mjestu sjevernog mlaza ra-

diogalaksije. Ovaj rezultat upućuje na to da mlazovi radiogalaksije 10901 emitiraju rendgensko zračenje, što je u skladu s podatkom iz kataloga [32] da radiogalaksija 10901 emitira i rendgensko zračenje. Analizirajući konture galaktičkih jata (kru-govi) vidimo da neposredno oko radiogalaksije 10901 nema galaktičkog jata. Dakle, prema prethodnim rezultatima dijagrama na slici 5.15, zaključujemo da je radioga-laksija 10901 vjerojatno izolirana galaksija.

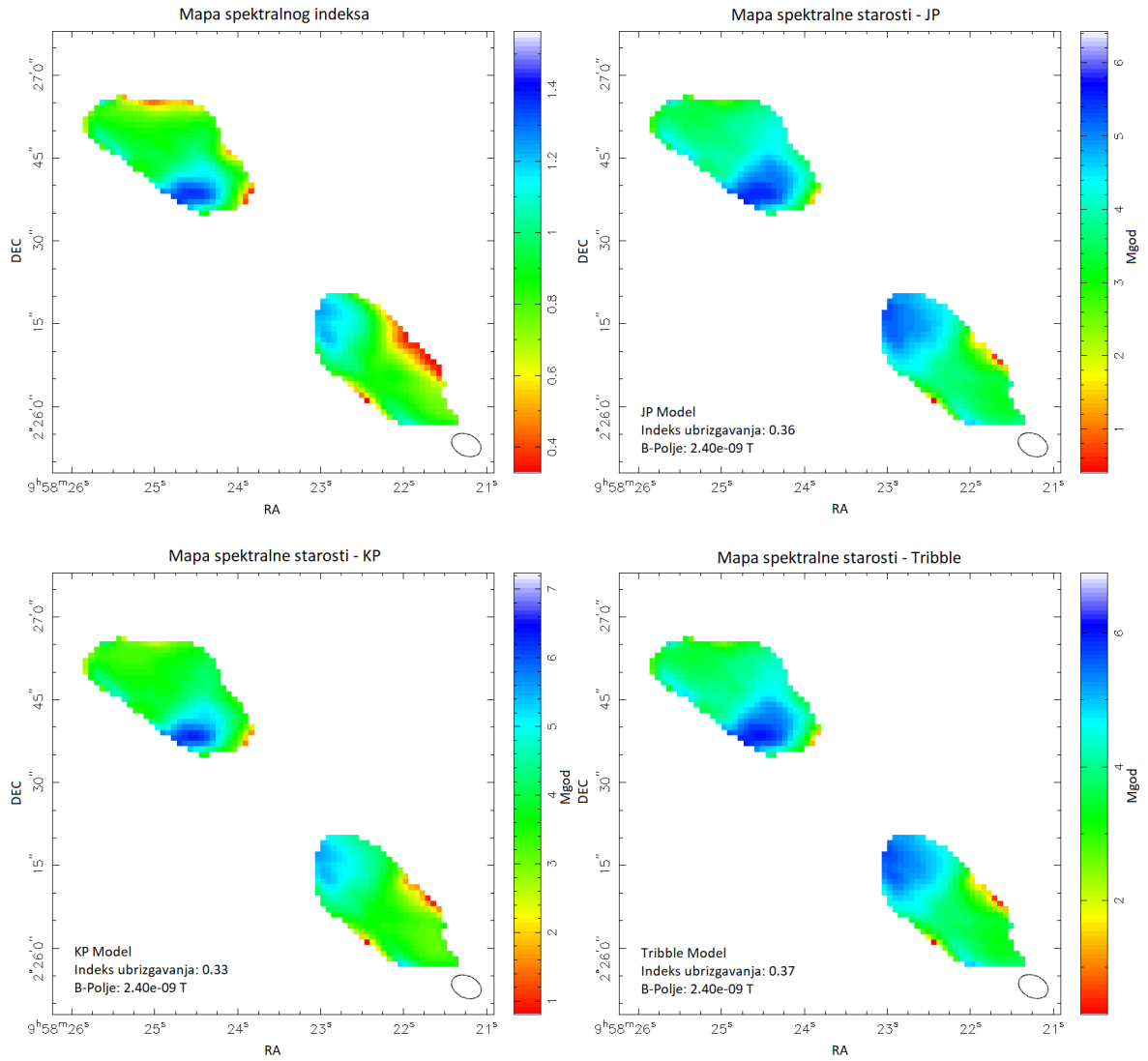
5.6 Radiogalaksija 10902

Radiogalaksija 10902 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 1.168$. Prema ka-talogu iz [36] radiogalaksija 10902 klasificirana je kao simetrični FR II izvor, što je vidljivo prema morfologiji radiogalaksije na slici 5.16.



Slika 5.16: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10902 u jedinicama $mJy/beam$ na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610MHz} = 0.039 mJy/beam$, $\sigma_{1.4GHz} = 0.012 mJy/beam$ i $\sigma_{3GHz} = 0.0023 mJy/beam$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Na mapi spektralnog indeksa radiogalaksije 10902 (slika 5.17, gore lijevo) uočavamo da oba oblaka radiogalaksije imaju strm spektar ($\alpha > 0.6$) sinkrotron-skog zračenja unutar velikog područja. Najstrmiji spektar ($\alpha > 1$) vidimo u području dna oba oblaka radiogalaksije prema središnjoj jezgri. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer plazma upravo u tom području FR II izvora ima najmanju energiju. Ravniji spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) vidimo jedino na rubovima oblaka radiogalaksije 10902, što može, ali ne i nužno, biti rubni artefakt. Minimum spektralnog indeksa oblaka iznosi $\alpha_{min} = 0.33 \pm 5.62$, gdje ponovno vidimo veliku nepouzdanost, dok maksimum iznosi $\alpha_{max} = 1.36 \pm 1.25$. Srednji spektralni indeks oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.89$, što odgovara vrlo strmom spektru zračenja. Rezultati mape spektralnog indeksa koje



Slika 5.17: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10902. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10902. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	2.40	0.36	$0.40^{+2.97}_{-0.40}$	$5.59^{+1.14}_{-0.84}$
KP		0.33	$0.81^{+2.48}_{-0.81}$	$6.30^{+1.39}_{-0.85}$
Tribble		0.37	$0.30^{+3.17}_{-0.30}$	$6.00^{+1.38}_{-1.07}$

Tablica 5.6: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10902, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.

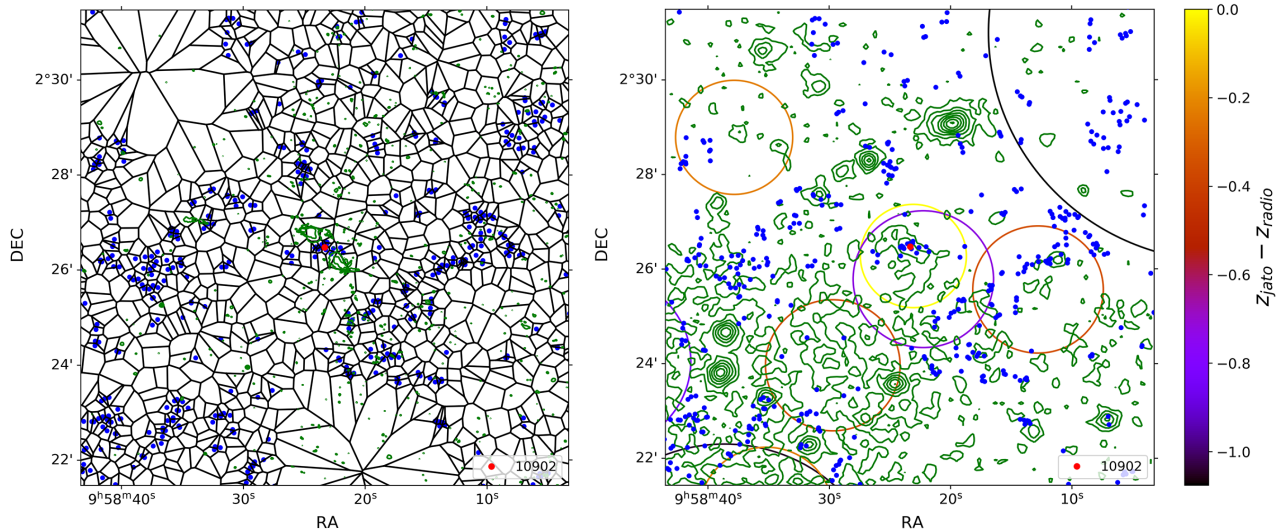
smo dobili u skladu su s rezultatima iz [19], gdje je također dobiven strm spektar zračenja, pogotovo u području dna oblaka, i gdje srednja vrijednost nagiba spektra oba oblaka zajedno iznosi $\bar{\alpha} = 1.0 \pm 0.2$, što obuhvaća našu vrijednost $\bar{\alpha} = 0.89$.

Za radiogalaksiju 10902 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 2.4$ nT, što je drugi najveći iznos magnetskog polja za radiogalaksiju u uzorku. Ovaj iznos magnetskog polja dao je kao rezultat indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.36$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.33$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.37$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja u blizini su minimuma spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem.

Prema mapama spektralne starosti JP, KP i Tribble modela (slika 5.17) vidimo da spektralna starost u oblacima približno prati ponašanje spektralnog indeksa. Za sva tri modela spektralne starosti primjećujemo da veći dio oblaka radiogalaksije ima spektralnu starost veću od 2 milijuna godina. Manju spektralnu starost imaju tek rubna područja na mjestima manjeg spektralnog indeksa. Također, vidimo da su područja oblaka prema vrhu spektralno mlađa od područja dna oblaka, što je u skladu s očekivanjem jer plazma uz vrh oblaka FR II izvora ima veću energiju, a time i manju starost. Prema rezultatima tablice 5.6 vidimo da se minimum spektralne starosti kreće između 0.3 i 0.8 milijuna godina, a maksimum između 5.6 i 6.3 milijuna godina, ovisno o modelu spektralne starosti. Ako uzmemo u obzir i pogrešku spektralne starosti, maksimum ne prelazi 8 milijuna godina.

Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10902 (slika 5.18, lijevo) vidimo da postoje određena grupiranja galaksija u okolini radiogalaksije. Neposredno oko same radiogalaksije (crvena točka) vidljiv je mali broj gusto grupiranih galaksija koji upućuje na postojanje mogućeg manjeg jata galaksija oko radiogalaksije 10902. Međutim, samo na temelju Voronoi dijagrama ne možemo donijeti čvrsti zaključak da takvo jato postoji.

Analizirajući dijagram iste okoline radiogalaksije 10902 (slika 5.18, desno) s ucrtanim konturama rendgenskog zračenja (zeleno), vidimo da postoji izraženo rendgensko zračenje u široj okolini radiogalaksije, pogotovo u donjem lijevom kutu dijagrama. Međutim, vidljivo je i rendgensko zračenje oko same radiogalaksije, a koje obuhvaća i okolne gusto grupirane galaksije. Promotrimo li konture jata galaksija (krugovi), možemo vidjeti da našu radiogalaksiju vizualno okružuju dva jata. Položaj središta jednog od tih jata (žuti krug) blizu je položaja optičkog središta radiogalak-



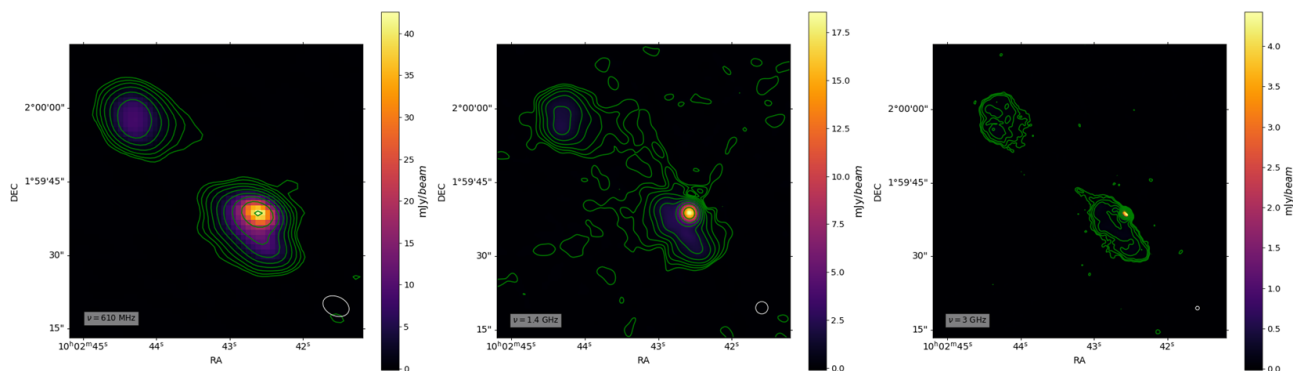
Slika 5.18: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10902 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.06 i 25 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10902 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2.5 i 80 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10902 (z_{radio}).

sije 10902, a crveni pomak samog jata poklapa se s crvenim pomakom radiogalaksije 10902 ($z_{jato} = z_{radio} = 1.168$), dok mu masa iznosi $M_{200} = 6.44 \times 10^{13} M_{\odot}$, što odgovara masi grupe galaksija. Dakle, prema prethodno iznesenim rezultatima, možemo zaključiti da se radiogalaksija 10902 nalazi unutar grupe galaksija, što je u skladu s rezultatima Voronoi dijagrama iz [19].

5.7 Radiogalaksija 10904

Radiogalaksija 10904 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 1.206$. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR II izvor, gdje je južni oblak sjajniji od sjevernog zbog efekta projekcije na ravninu neba (slika 5.19). To znači da južni oblak ima zakrivljenost i u smjeru duž doglednice, a ne samo u ravnini neba.

Analiziramo li mapu spektralnog indeksa radiogalaksije 10904 (slika 5.20, gore lijevo), vidimo da ravni spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) postoji jedino uz rubove sjevernog oblaka te sjeverni i desni rub južnog oblaka, gdje je radiogalaksija bila najsajjnija. Ostatak područja oblaka ima relativno strm spektar zračenja $\alpha > 0.6$, gdje vidimo da najstrmiji spektar ($\alpha > 0.8$) ima južna polovica južnog oblaka radiogalaksije.



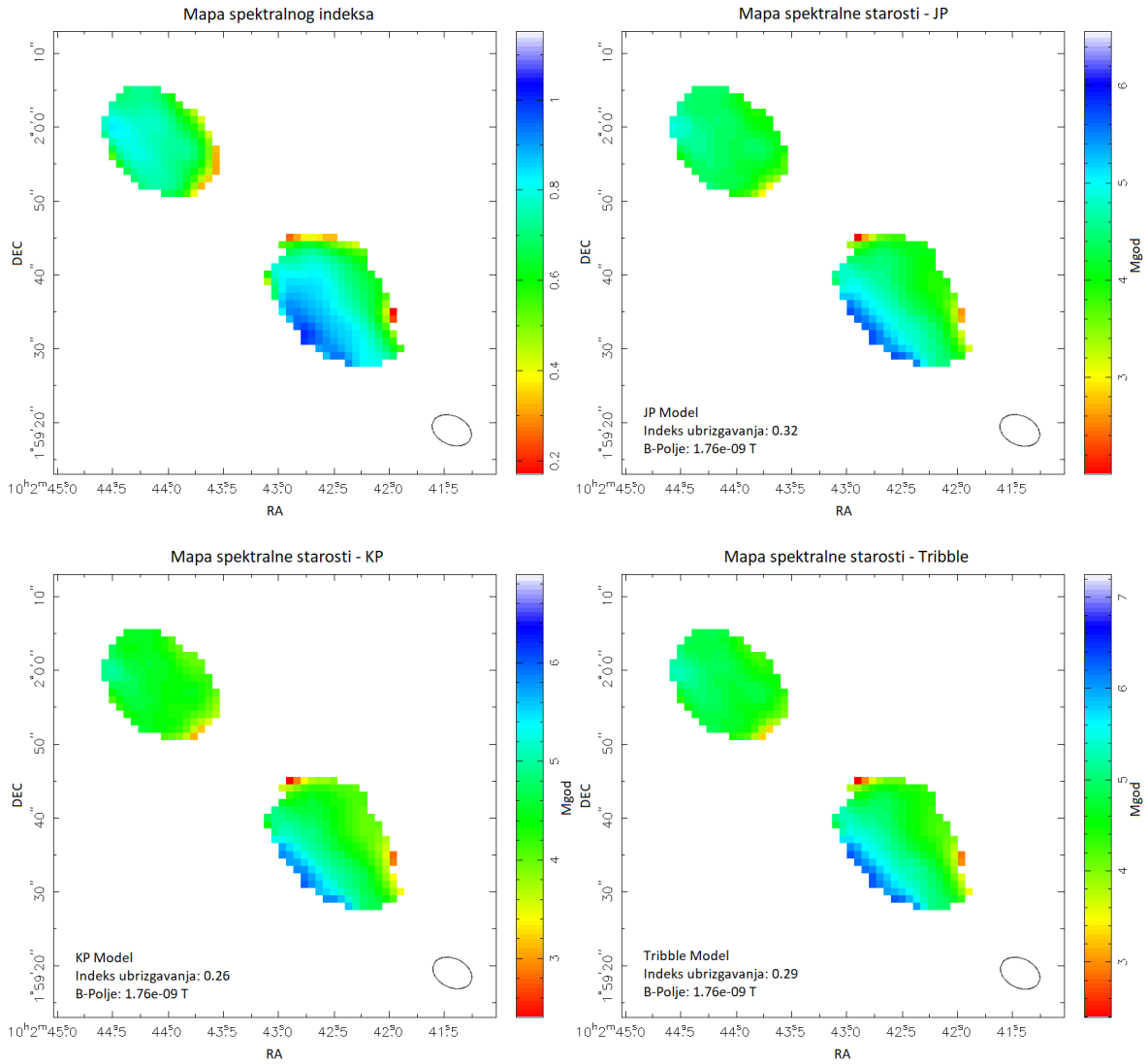
Slika 5.19: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10904 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Minimum spektralnog indeksa radiogalaksije 10904 iznosi $\alpha_{min} = 0.17 \pm 3.09$, dok maksimum iznosi $\alpha_{max} = 1.00 \pm 2.08$. Srednja vrijednost spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10904 iznosi $\bar{\alpha} = 0.72$, što odgovara strmom spektru zračenja oblaka.

Za radiogalaksiju 10904 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1.76 \text{ nT}$. Za dano magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.32$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.26$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.29$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti nalaze se u blizini minimuma spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem.

Prema mapama spektralne starosti JP, KP i Tribble modela (slika 5.20), vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralnog indeksa u oblacima, što je u skladu s očekivanjem. Na mapama spektralne starosti vidimo da sjeverni oblak ima spektralnu starost između 3 i 5 milijuna godina, gdje južno područje sjevernog oblaka ima manju spektralnu starost. S druge strane, spektralna starost južnog oblaka raste od desnog ruba, gdje je radiogalaksija bila najsjajnija i gdje je plazma imala najveću energiju, prema lijevom rubu oblaka, gdje spektralna starost prelazi 5 milijuna godina. Prema rezultatima tablice 5.7 minimum spektralne starosti oblaka iznosi oko 2 milijuna godina za JP model, a 2.4 milijuna godina za KP i Tribble model. S druge strane, maksimum spektralne starosti kreće se između 5.7 i 6.3 milijuna godina, ovisno o modelu. Uzimajući pogrešku spektralne starosti u obzir, maksimum spektralne starosti kreće se i do između 7.3 i 8.6 milijuna godina, ovisno o modelu.

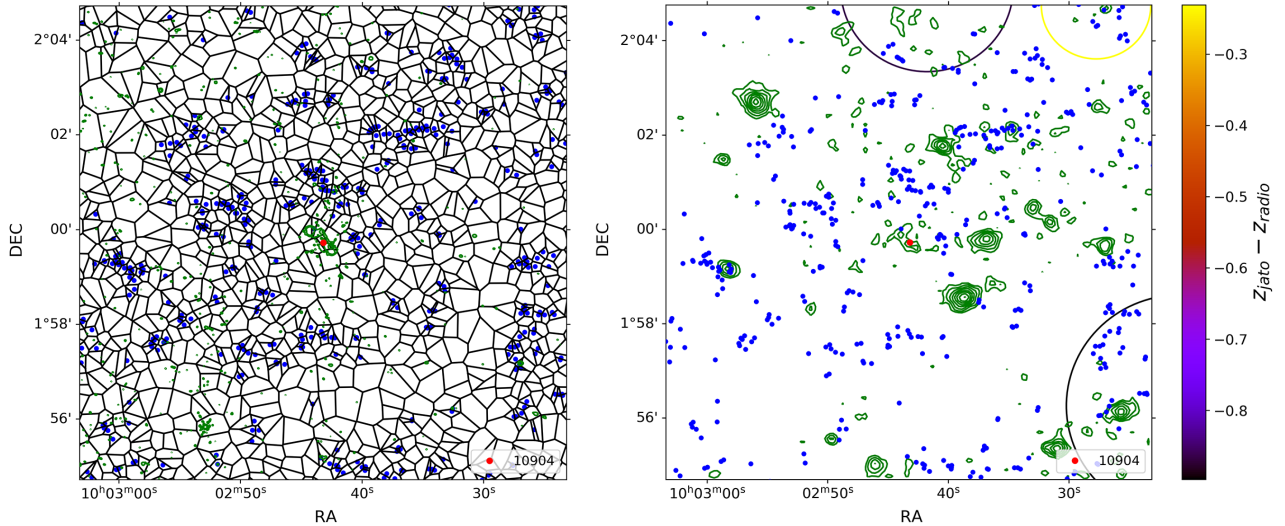
Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10904 (slika 5.21, lijevo)



Slika 5.20: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10904. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10904. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.76	0.32	$2.01^{+2.61}_{-2.01}$	$5.70^{+1.58}_{-1.12}$
KP		0.26	$2.40^{+2.27}_{-2.40}$	$6.00^{+2.57}_{-1.31}$
Tribble		0.29	$2.40^{+2.67}_{-2.40}$	$6.31^{+1.86}_{-1.37}$

Tablica 5.7: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10904, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



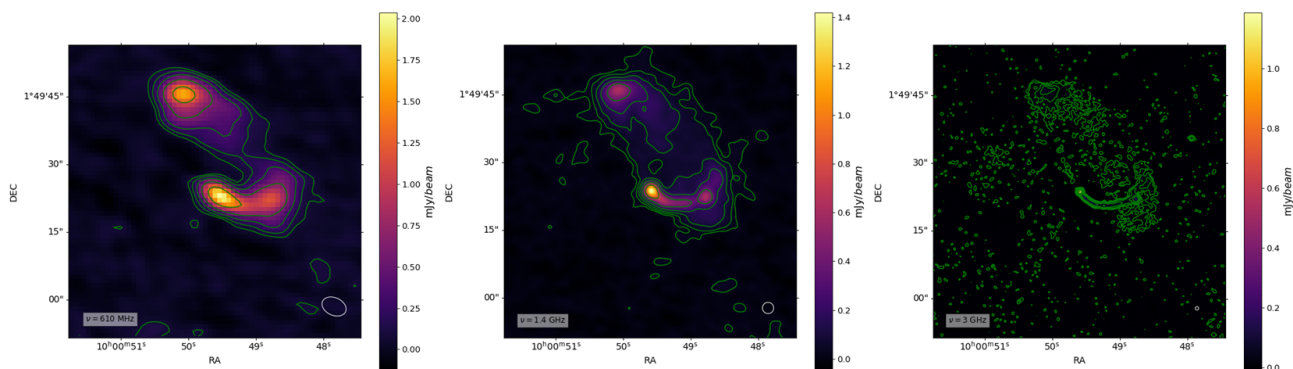
Slika 5.21: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10904 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.06 i 17.5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10904 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 25 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10904 (z_{radio}).

vidimo da postoje vrlo mala grupiranja galaksija u okolini radiogalaksije (crvena točka), ali neposredno oko same radiogalaksij ne vidimo da postoje grupiranja galaksija koja bi upućivala na postojanje jata u blizini radiogalaksije. Ovaj rezultat upućuje na to da se radiogalaksija nalazi u području male gustoće naseljenosti.

Pogledamo li dijagram iste okoline radiogalaksije 10904 (slika 5.21, desno) s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), vidimo da nema izraženog rendgenskog zračenja u okolini radiogalaksije osim određenog broja udaljenih maksimuma. Oko same radiogalaksije vidimo da postoji slabo rendgensko zračenje koje možda dolazi od mlazova, odnosno oblaka radiogalaksije koji emitiraju ovo zračenje. Analizirajući konture galaktičkih jata (krugovi), vidimo da oko radiogalaksije ne postoji galaktičko jato, što upućuje na to da je radiogalaksija 10904 vjerojatno izolirana galaksija.

5.8 Radiogalaksija 10910

Radiogalaksija 10910 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.53$. Prema katalogu iz [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao reliktni FR II izvor, gdje su južni mlaz i oblak izduženi i savijeni zbog interakcije s okolinom, što vidimo na slici 5.22.

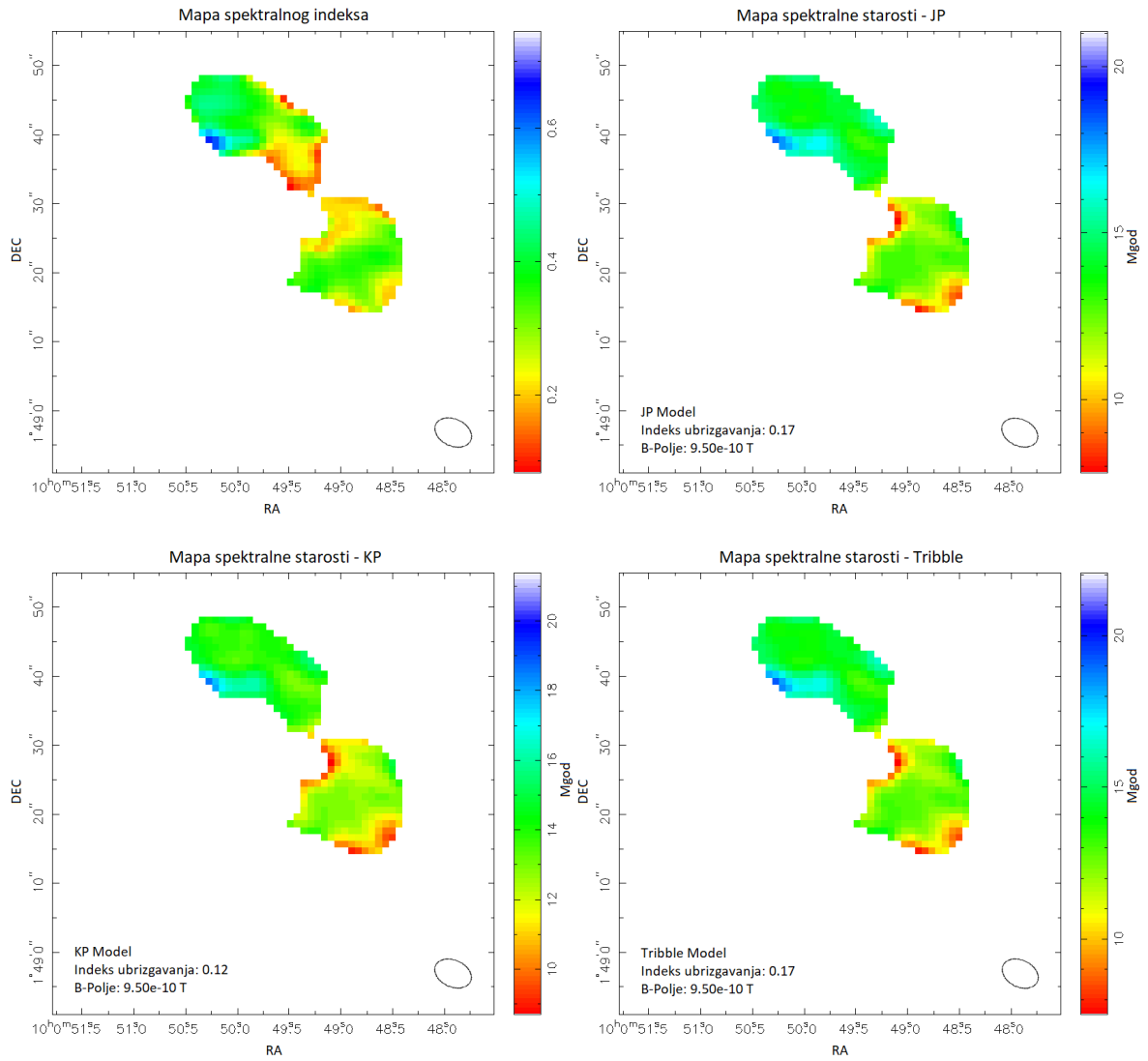


Slika 5.22: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10910 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Analizirajući mapu spektralnog indeksa radiogalaksije 10910 (slika 5.23, gore lijevo), vidimo da skoro cijelo područje oblaka radiogalaksije ima ravan spektar ($\alpha < 0.6$) zračenja. Ravniji spektar zračenja ($\alpha < 0.3$) pronalazimo na rubnim područjima oblaka radiogalaksija 10910, dok strmiji spektar ($\alpha > 0.4$) dominira lijevom polovicom sjevernog oblaka. Područje uz južni rub sjevernog oblaka, gdje očekujemo plazmu male energije i strmijeg spektra, ima neočekivano ravniji spektar ($\alpha < 0.3$) u odnosu na sjeverni dio oblaka gdje se nalazi plazma veće energije. Ovaj rezultat mogao bi biti posljedica konvolucije slika na lošu razlučivost ili korištenja nedovoljnog broja frekvencija za analizu. S druge strane, minimum spektralnog indeksa oblaka iznosi $\alpha_{min} = 0.08 \pm 6.12$, dok maksimum iznosi $\alpha_{max} = 0.65 \pm 3.79$, gdje ponovno vidimo veliku nepouzdanost minimuma i maksimuma. Srednji spektralni indeks oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.31$, što odgovara vrlo ravnom spektru zračenja.

Za radiogalaksiju 10910 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 0.95 \text{ nT}$. Za ovu vrijednost magnetskog polja dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.17$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.12$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.17$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se u blizini minimuma spektralnog indeksa, što je očekivan rezultat.

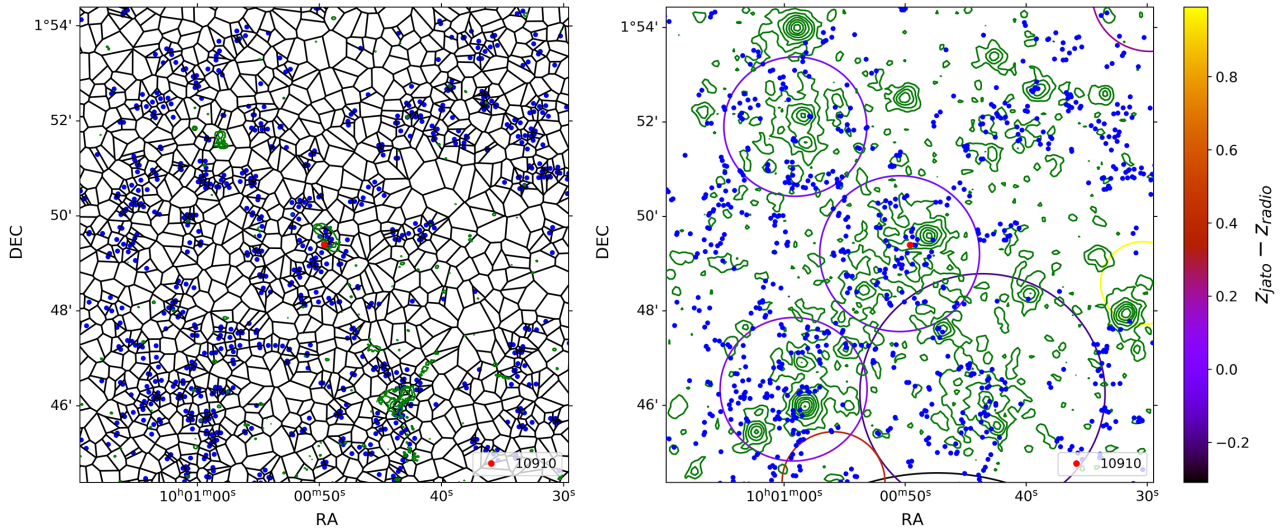
Prema mapama spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.23) vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralnog indeksa, osim u južnom području sjevernog oblaka, gdje smo imali neočekivano ravan spektar zračenja. Na mapama vidimo da najmanju spektralnu starost ima južni oblak, što smo mogli i



Slika 5.23: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10910. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10910. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	0.950	0.17	$7.80^{+6.20}_{-7.80}$	$18.31^{+4.39}_{-4.21}$
KP		0.12	$8.70^{+5.16}_{-8.70}$	$18.60^{+5.67}_{-4.46}$
Tribble		0.17	$7.51^{+6.69}_{-7.51}$	$19.19^{+5.18}_{-4.88}$

Tablica 5.8: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10910, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.24: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10910 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.05 i 8 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10910 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2.5 i 70 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10910 (z_{radio}).

očekivati budući da je to područje bilo i najsjanije. Rubni dijelovi južnog oblaka imaju spektralnu starost manju od 12 milijuna godina, a u ostatku južnog oblaka starost ne prelazi 14 milijuna godina. Sjeverni oblak ima najmanju spektralnu starost iznad 12 milijuna godina u unutrašnjem području dna i vrha oblaka, gdje plazma ima veću energiju. Spektralna starost sjevernog oblaka raste približavanjem rubovima, a u nekim područjima prelazi 16 milijuna godina. Prema rezultatima tablice 5.8 vidimo da se minimum spektralne starosti oblaka kreće između 7.5 i 8.7 milijuna godina, a maksimum između 18.3 i 19.2 milijuna godina, ovisno o modelu. Uzimajući i pogrešku u obzir, maksimalna spektralna starost oblaka može doseći i vrijednosti između 22.7 i 24.4 milijuna godina, ovisno o modelu.

Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10910 (slika 5.24, lijevo) vidimo da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području velike gustoće naseljenosti. Na dijagramu vidimo grupiranja galaksija u široj okolini i neposredno oko same radiogalaksije, gdje opažamo gusto grupirane galaksije oko radiogalaksije. Ovaj rezultat upućuje na to da oko radiogalaksije 10910 možda postoji galaktičko jato.

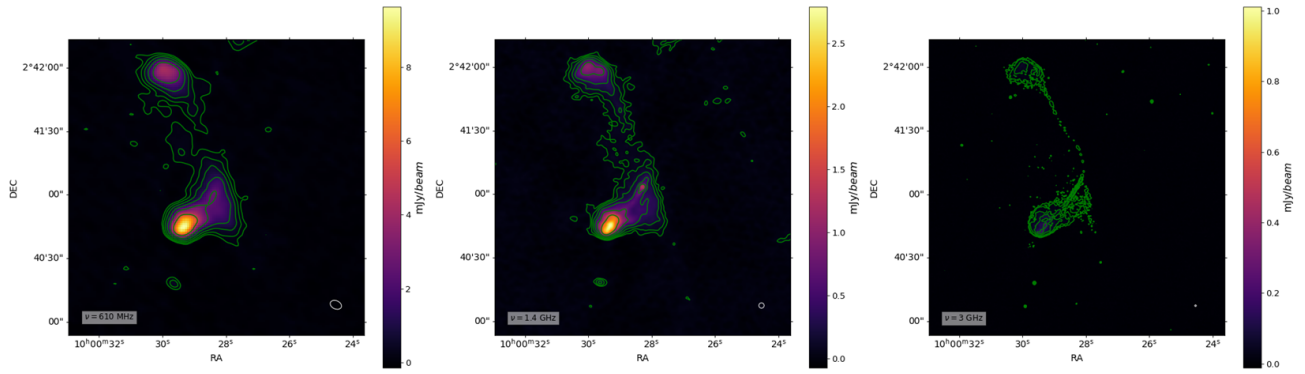
Promotrimo li dijagram iste okoline radiogalaksije 10910 s konturama rendgen-

skog zračenja (slika 5.24, desno), vidimo da u okolini radiogalaksije postoji izraženo rendgensko zračenje s velikim brojem maksimuma. Neposredno oko radiogalaksije vidimo izraženo rendgensko zračenje koje obuhvaća okolne galaksije grupirane oko radiogalaksije, a desno od položaja radiogalaksije nalazi se maksimum rendgenskog zračenja u tom području. Analizirajući konture jata galaksija (krugovi), vidimo da postoji jedno jato (centralni ljubičasti krug) koje okružuje radiogalaksiju 10910 i okolne galaksije s područjem rendgenskog zračenja. Ovo jato nalazi se na crvenom pomaku od $z_{jato} = 0.53$, što odgovara crvenom pomaku radiogalaksije 10910, a masa mu prema [21] iznosi $M_{200} = 4.71 \times 10^{13} M_{\odot}$, što odgovara masi grupe galaksija. Dakle, radiogalaksija 10910 pripada ovoj grupi galaksija, što je u skladu s rezultatima dobivenima za ovu radiogalaksiju u [24]. Također, gore lijevo u blizini ove grupe postoji druga grupa na sličnom crvenom pomaku od $z_{jato} = 0.529$ i mase $M_{200} = 3.34 \times 10^{13} M_{\odot}$, unutar koje vidimo izraženo rendgensko zračenje i grupirane galaksije. Donji maksimum rendgenskog zračenja unutar ove grupe pripada radiogalaksiji 177 ($z_{radio} = 1.687$), a ne grupi. Zbog blizine gornje grupe grupi galaksija kojem pripada radiogalaksija 10910, ove su dvije grupe možda gravitacijski vezane.

5.9 Radiogalaksija 10913

Radiogalaksija 10913 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.349$ i ujedno je najveća radiogalaksija u uzorku prema kutnoj veličini. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR II izvor koji pokazuje snažnu interakciju s okolinom zbog savijenosti mlazova i oblaka (slika 5.25).

Na mapi spektralnog indeksa radiogalaksije 10913 (slika 5.26, gore lijevo) vidimo ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) u velikom području vrha južnog oblaka, gdje najmanji nagib spektra zračenja ($\alpha < 0.3$) vidimo uz sam rub vrha. Udaljavanjem od vrha oblaka prema središnjoj jezgri nagib spektra zračenja raste i do vrijednosti iznad $\alpha = 0.8$. Za FR II izvor ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem budući da udaljavanjem od područja vrha oblaka energija plazme opada. Ravan spektar zračenja vidljiv je i u malom lokaliziranom području gore lijevo od položaja središnje jezgre. S druge strane, u području sjevernog oblaka vidimo ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) u području vrha sjevernog oblaka, gdje je oblak najsajjniji, te u području dna oblaka na mjestu mlaza, gdje očekujemo manji nagib spektra zračenja. Ostatak područja

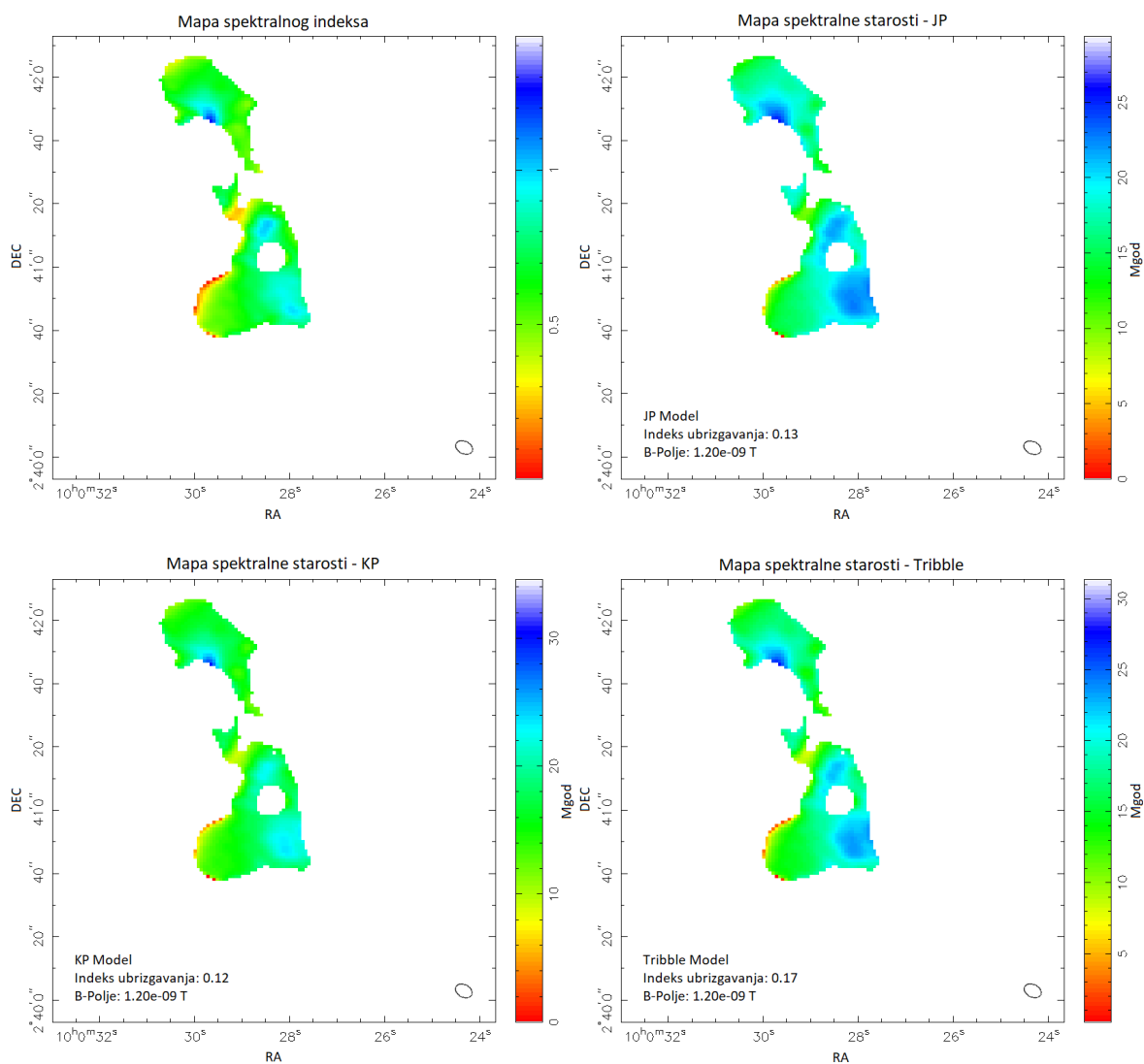


Slika 5.25: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10913 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

sjevernog oblaka ima strm spektar zračenja ($\alpha > 0.6$), gdje nagib spektra prelazi i $\alpha = 0.9$ uz donji lijevi rub oblaka. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose $\alpha_{\min} = 0.00 \pm 4.55$ i $\alpha_{\max} = 1.24 \pm 4.13$, gdje vidimo veliku nepouzdanost zbog blizine rubu oblaka. Srednji spektralni indeks radiogalaksije iznosi $\bar{\alpha} = 0.66$, što odgovara strmom spektru zračenja.

Za radiogalaksiju 10913 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1.2 \text{ nT}$. Za dano magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.13$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.12$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.17$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se u blizini minimuma spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem.

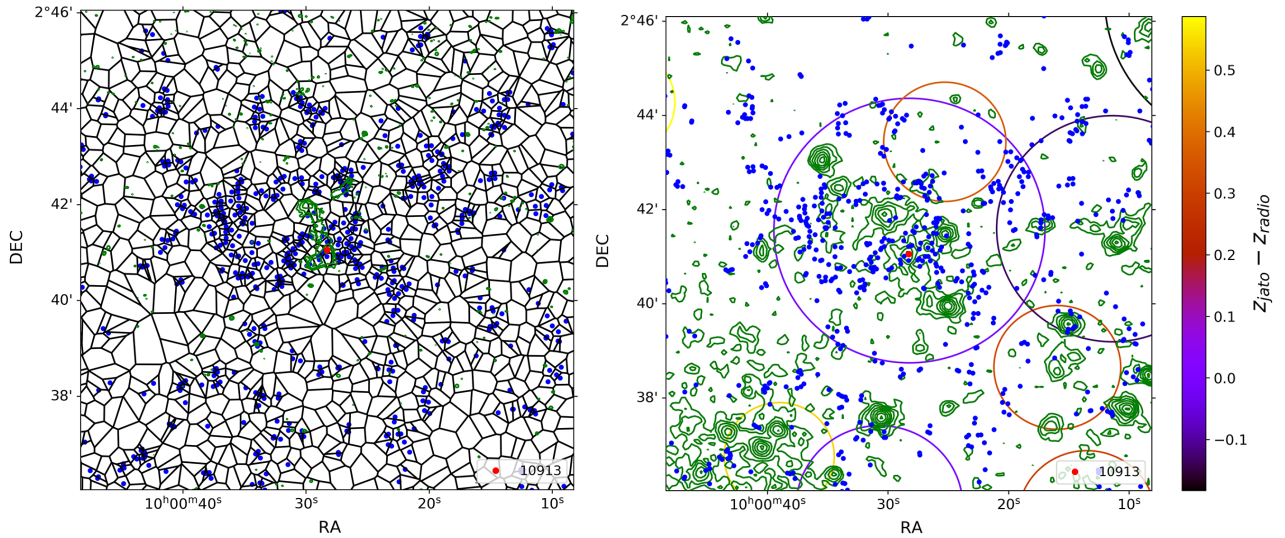
Analizirajući mape spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.26) vidimo da spektralna starost oblaka prati ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela spektralne starosti vidimo da južni oblak radiogalaksije ima spektralnu starost manju od 12 milijuna godina u području vrha oblaka, gdje je spektar zračenja imao najmanji nagib. Udaljavanjem od vrha oblaka spektralna starost vidljivo raste prema središnjoj jezgri i do vrijednosti iznad 20 milijuna godina. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer udaljavanjem od područja vrha oblaka FR II izvora opada energija plazme, a samim time raste njezina spektralna starost. U području vrha sjevernog oblaka i u području sjevernog mlaza također vidimo malu spektralnu starost manju od 12 milijuna godina. Ostalo područje sjevernog oblaka ima veću spektralnu starost, koja u nekim dijelovima prelazi vrijednost od



Slika 5.26: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10913. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10913. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.20	0.13	$0.00^{+13.15}_{-0.00}$	$25.57^{+4.26}_{-3.13}$
KP		0.12	$0.00^{+12.07}_{-0.00}$	$30.09^{+0.00}_{-6.69}$
Tribble		0.17	$0.18^{+11.97}_{-0.18}$	$27.28^{+5.26}_{-3.79}$

Tablica 5.9: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10913, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.27: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10913 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.05 i 2.5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10913 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 25 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10913 (z_{radio}).

20 milijuna godina. Prema rezultatima tablice 5.9 vidimo da je minimum spektralne starosti za JP i KP model jednak 0 milijuna godina, a za Tribble model 0.18 milijuna godina, dok se maksimum kreće između 25.5 i 30.1 milijuna godina, ovisno o modelu, što ovu radiogalaksiju čini spektralno najstarijom radiogalaksijom u uzorku. Ako uzmemo u obzir i pogrešku, maksimum može dosegnuti i vrijednosti oko 29.8 milijuna godina za JP model ili čak 32.5 milijuna godina za Tribble model. Ponovno imamo da je gornja pogreška maksimuma spektralne starosti za KP model jednaka 0 milijuna godina, što je bio isti slučaj i kod radiogalaksije 10901.

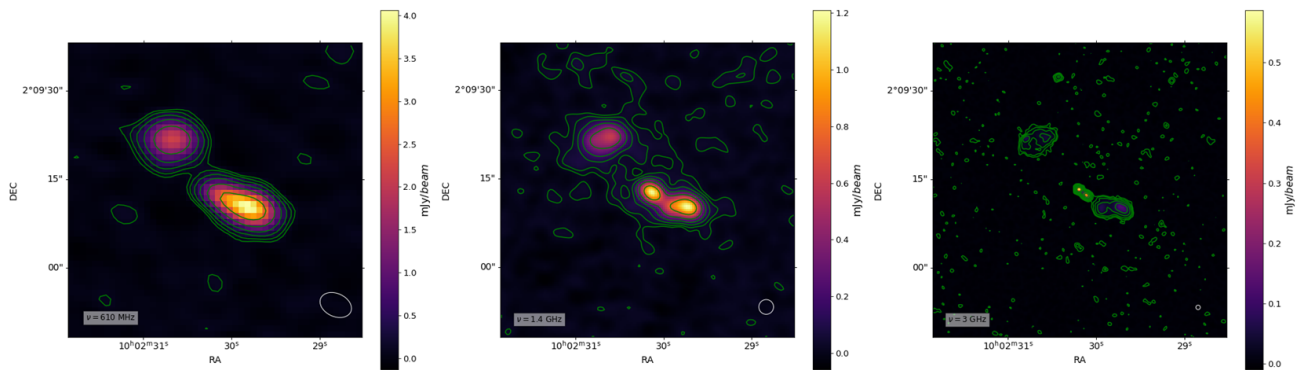
Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10913 (slika 5.27, lijevo) vidimo da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području vrlo velike gustoće naseljenosti. Promotrimo li konture radiozračenja (zeleno), gore desno od položaja radiogalaksije vidimo radiogalaksiju 44. S dijagrama je vidljivo da oko radiogalaksije 10913 postoji veliki broj gusto grupiranih galaksija, što upućuje na to da ova grupa čini galaktičko jato, što iz prethodne analize okoline radiogalaksije 44 znamo da je uistinu tako.

Promotrimo li rendgensko zračenje (zeleno) na dijagramu iste okoline radioga-

laksije 10913 (slika 5.27, desno), vidimo da se radiogalaksija nalazi u području izraženog rendgenskog zračenja s nekoliko maksimuma, a koje obuhvaća radiogalaksiju i grupu galaksija oko nje. Analizirajući konture galaktičkih jata (krugovi) vidimo da postoji jedno jato (ljubičasti krug) koje obuhvaća područje velikog broja grupiranih galaksija i područje rendgenskog zračenja. Uz to, iz analize radiogalaksije 44 znamo da je crveni pomak ovog jata jednak crvenom pomaku radiogalaksije 10913. Prema rezultatima dijagrama na slici 5.18 zaključujemo da se radiogalaksija 10913 nalazi u istom jatu galaksija kao i radiogalaksija 44 te da se vjerojatno radi o centralnoj galaksiji ovog jata. Također, budući da ovo jato obuhvaća tri manje odvojene grupe, gdje dvama grupama pripadaju radiogalaksije 44 i 10913, postoji mogućnost da je ovo jato moglo nastati sudarom tri manje grupe galaksija.

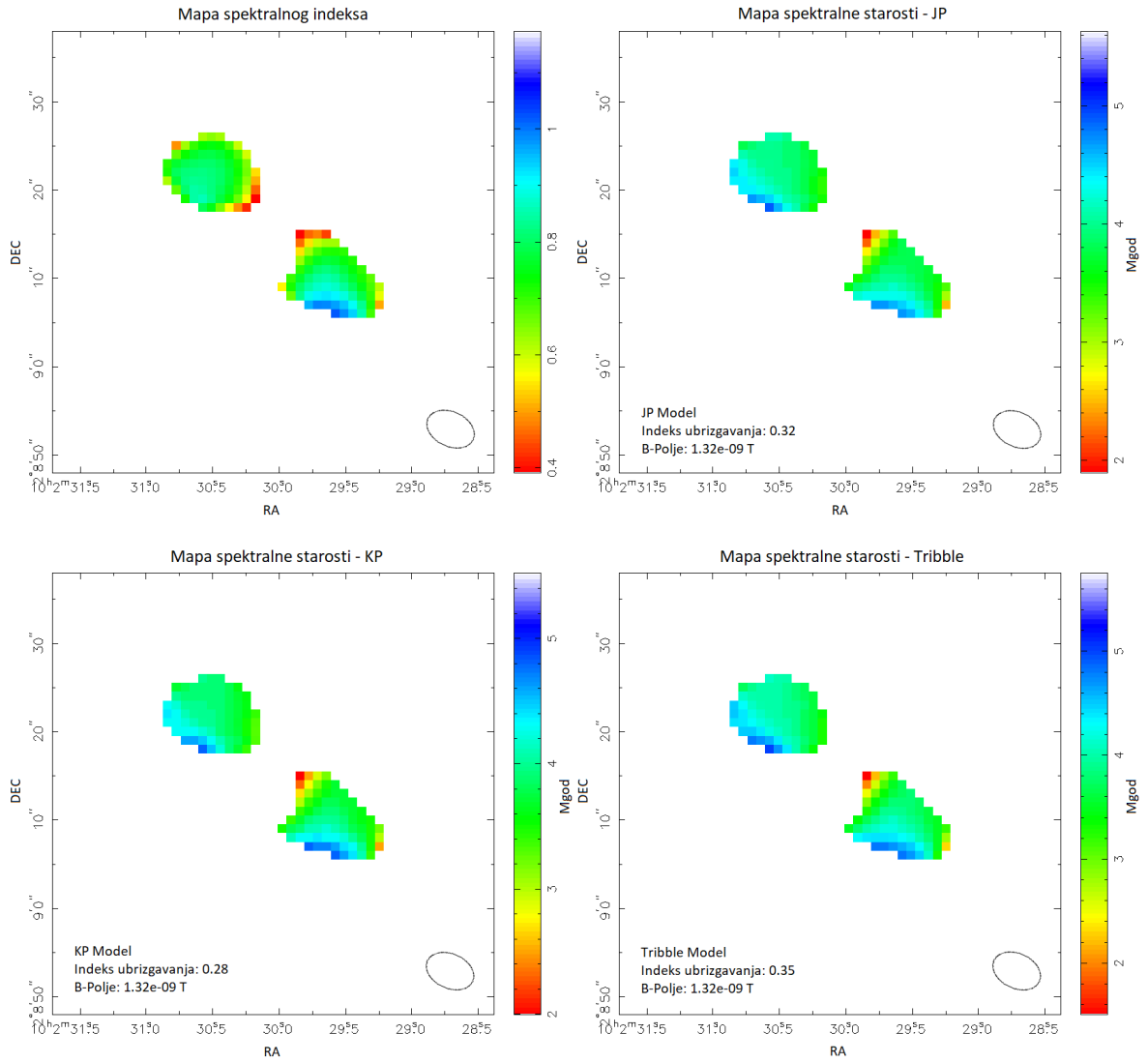
5.10 Radiogalaksija 10914

Radiogalaksija 10914 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 1.437$. Prema [36] radiogalaksija 10914 klasificirana je kao FR II izvor sa svinutom strukturom oblaka (slika 5.28) ili zbog efekta projekcije ili zbog interakcije s okolinom.



Slika 5.28: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10914 u jedinicama $mJy/beam$ na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610MHz} = 0.039 mJy/beam$, $\sigma_{1.4GHz} = 0.012 mJy/beam$ i $\sigma_{3GHz} = 0.0023 mJy/beam$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Prema mapi spektralnog indeksa u oblacima radiogalaksije 10914 (slika 5.29, gore lijevo) vidimo da je područje ravnog spektra ($\alpha < 0.6$) zračenja lokalizirano uz rub oblaka prema središnjoj jezgri. Ostatak područja oba oblaka ima strm spektar ($\alpha > 0.6$) zračenja, gdje je najstrmiji spektar ($\alpha > 0.9$) uz područje donjeg ruba južnog oblaka. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose



Slika 5.29: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10914. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10914. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.32	0.32	$1.89^{+0.65}_{-1.64}$	$4.90^{+0.90}_{-0.88}$
KP		0.28	$2.00^{+0.55}_{-0.73}$	$4.81^{+3.91}_{-1.64}$
Tribble		0.35	$1.50^{+0.69}_{-1.50}$	$5.01^{+1.11}_{-1.01}$

Tablica 5.10: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10914, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.

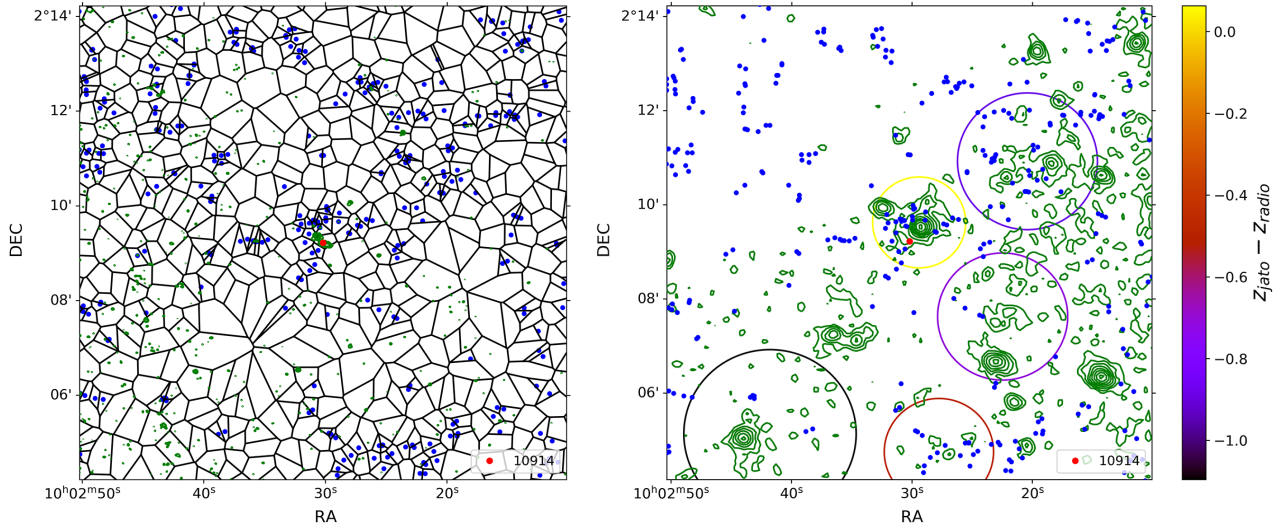
$\alpha_{min} = 0.39 \pm 5.56$ i $\alpha_{min} = 1.02 \pm 5.09$, gdje vidimo veliku nepouzdanost zbog blizine rubu oblaka. Srednji spektralni indeks oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.72$, što odgovara strmom spektru sinkrotronskog zračenja.

Za radiogalaksiju 10914 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1.32$ nT. Za ovu vrijednost magnetskog polja dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.32$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.28$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.35$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se ispod minimuma spektralnog indeksa, ali ipak blizu minimuma, što je očekivan rezultat.

Analizirajući mape spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.29), vidimo da spektralna starost prati slično ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Područje najmanje spektralne starosti ispod 3 milijuna godina lokalizirano je na rubnom dijelu južnog oblaka prema središnjoj jezgri. Također, na mapama spektralne starosti za sva tri modela vidimo da spektralna starost oblaka raste od desnog ruba prema donjem lijevom rubu, što je najvjerojatnije rezultat savijenosti oblaka vidljive na slici 3.5 desno. Prema tablici 5.10, minimum spektralne starosti kreće se između 1.5 i 2 milijuna godina, dok se maksimum spektralne starosti kreće između 4.8 i 5 milijuna godina, ovisno o modelu. Ako uzmemo u obzir i pogrešku spektralne starosti, maksimum spektralne starosti oblaka može biti i do oko 6 milijuna godina za JP i Tribble model ili do oko 8.8 milijuna godina za KP model.

Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10914 (slika 5.30, lijevo) vidimo da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području velike gustoće naseljenosti. Unutar šire okoline radiogalaksije nema izraženog grupiranja galaksija kao što je to slučaj neposredno oko same radiogalaksije, gdje vidimo manju grupu galaksija. Ovaj rezultat upućuje na to da oko radiogalaksije 10914 možda postoji jato.

Dijagram iste okoline radiogalaksije 10914 (slika 5.30, desno) s označenim konturama rendgenskog zračenja (zeleno) pokazuje da u području oko radiogalaksije, gdje je bilo vidljivo grupiranje galaksija, postoji izraženo rendgensko zračenje s dva vidljiva maksimuma. Analizirajući konture jata galaksija (krugovi) u tom području vidimo da postoji jedno jato (žuti krug) unutar kojeg je vizualno smještena grupa galaksija s radiogalaksijom 10914. Od dva maksimuma rendgenskog zračenja veći maksimum najviše odgovara ovom jatu, dok manji maksimum ne mora nužno biti dio jata, nego može biti od nekog drugog izvora. Crveni pomak ovog jata jednak je $z_{jato} = 1.5$, što je za razliku $\Delta z = 0.063$ dalje od crvenog pomaka radiogalaksije



Slika 5.30: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10914 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.05 i 1.2 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10914 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 35 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10914 (z_{radio}).

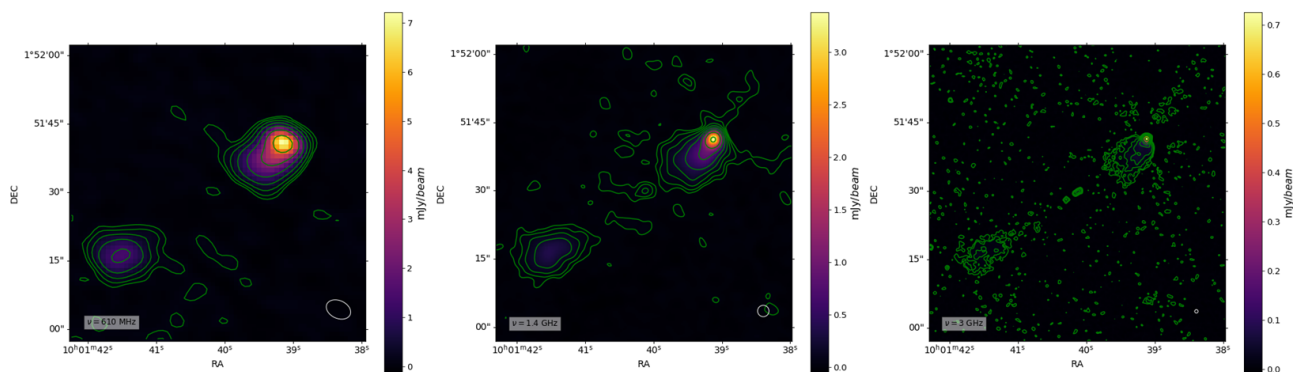
10914, a masa mu prema [21] iznosi $M_{200} = 6.52 \times 10^{13} M_{\odot}$, što odgovara masi grupe galaksija. Ovaj rezultat upućuje na to da se radiogalaksija 10914 vjerojatno nalazi na rubnom području grupe ili se radi o satelitskoj galaksiji.

5.11 Radiogalaksija 10916

Radiogalaksija 10916 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.459$. Prema [36] ova radiogalaksija klasificirana je kao simetrični FR II izvor (slika 5.31).

Na mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10916 (slika 5.32, gore lijevo) vidimo da ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) ima veće područje južnog oblaka, najviše u smjeru središnje jezgre, te veći dio rubnog područja uz vrh sjevernog oblaka. Najstrmiji spektar zračenja ($\alpha > 0.7$) vidimo u području sjevernog oblaka u smjeru središnje jezgre, gdje i očekujemo plazmu manje energije. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose $\alpha_{min} = 0.34 \pm 5.72$ i $\alpha_{max} = 0.82 \pm 1.56$, gdje vidimo veliku nepouzdanost minimuma zbog blizine rubu oblaka. Srednja vrijednost spektralnog indeksa oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.64$, što odgovara strmom spektru zračenja.

Za radiogalaksiju 10916 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u



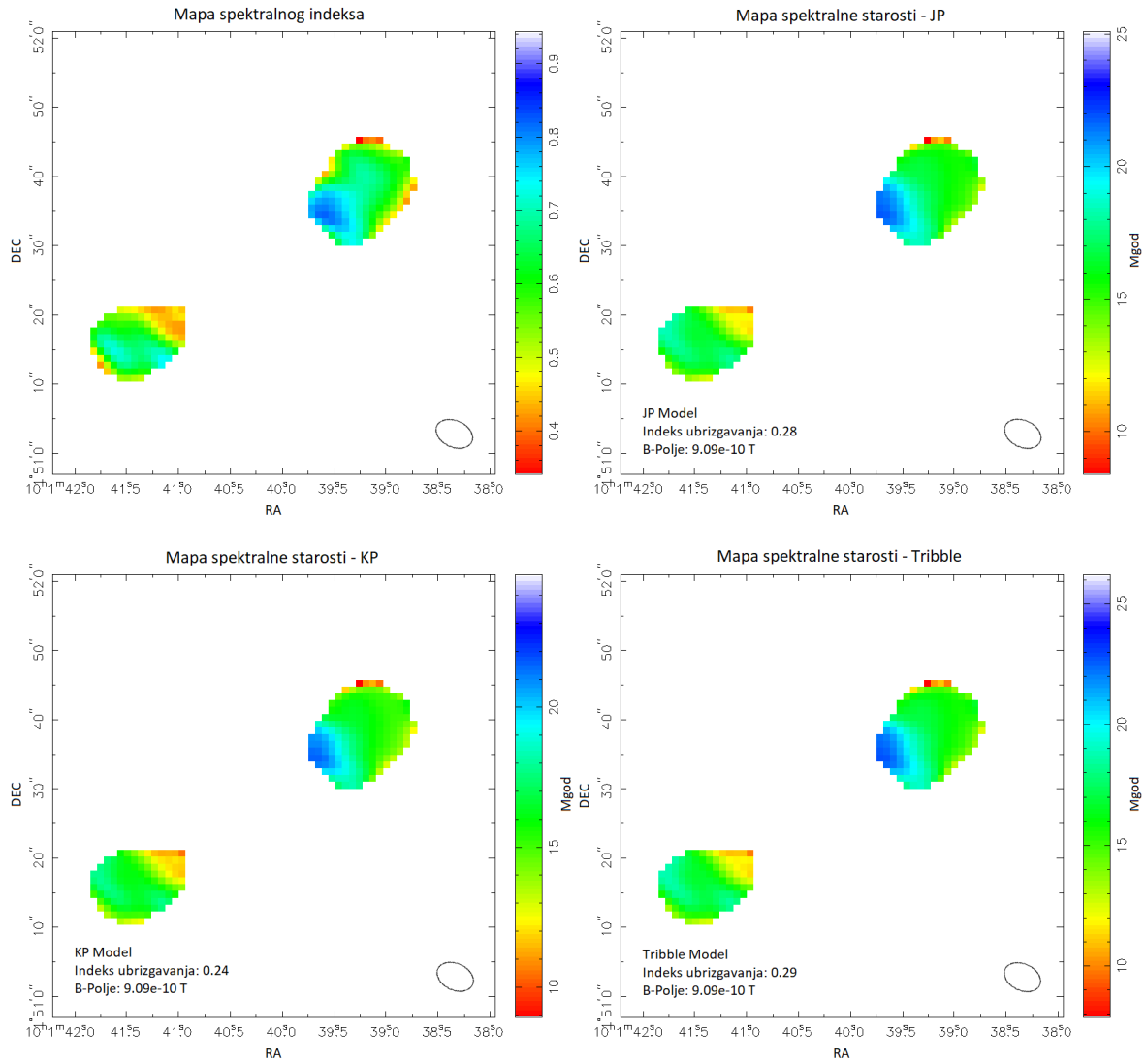
Slika 5.31: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10916 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

iznosu od $B = 0.909 \text{ nT}$. Za dano magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.28$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.24$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.29$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se ispod minimuma spektralnog indeksa, ali relativno blizu samom minimumu, što je u skladu s očekivanjem.

Prema mapama spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10916 za JP, KP i Tribble model (slika 5.32) vidimo da spektralna starost očekivano prati slično ponašanje spektralne starosti. Za sva tri modela spektralne starosti vidimo da spektralnu starost manju od 15 milijuna godina imaju uska rubna područja uz vrh sjevernog oblaka te rubna područja južnog oblaka, gdje najmanju spektralnu starost ima veće područje južnog oblaka u smjeru središnje jezgre. Najveću spektralnu starost, koja prelazi i 20 milijuna godina, ima područje sjevernog oblaka u smjeru središnje jezgre, koje odgovara području FR II izvora s plazmom manje energije. Prema rezultatima tablice 5.11 vidimo da se minimum spektralne starosti kreće između 7.9 i 8.9 milijuna godina, a maksimum između 21.5 i 22.8 milijuna godina, ovisno o modelu. Uzimajući pogrešku u obzir, maksimum spektralne starosti oblaka mogu doseći i vrijednosti između 25 milijuna godina za KP model i 27.3 milijuna godina za Tribble model.

Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10916 (slika 5.33, lijevo) vidimo da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području male gustoće naseljenosti. U okolini radiogalaksije 10916 vidimo da nema izražene grupiranosti galaksija, a neposredno uz samu radiogalaksiju vidimo tek mali broj galaksija.

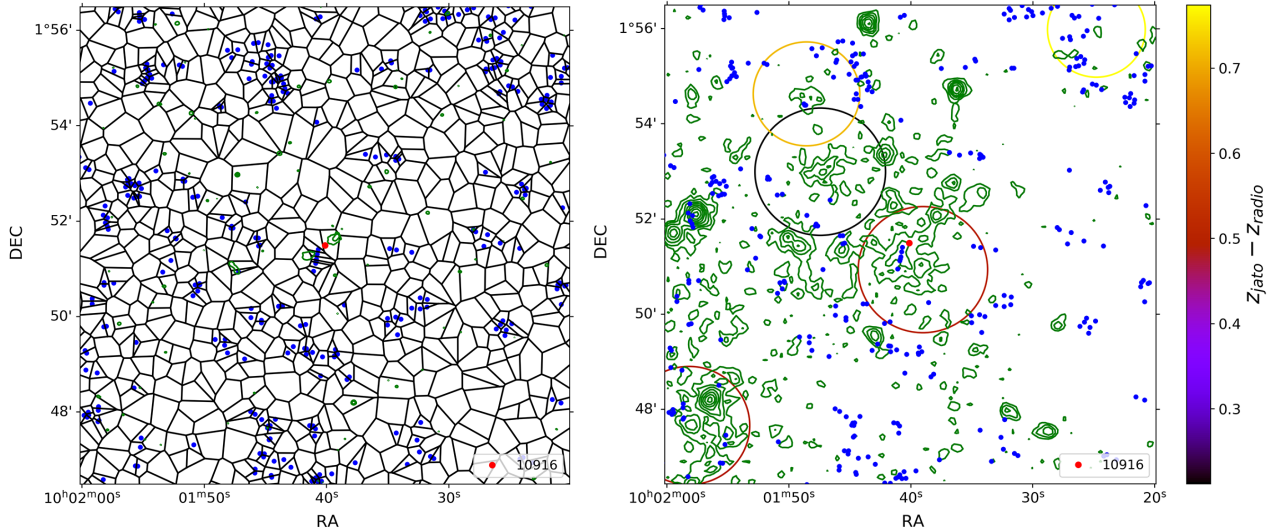
Analizirajući dijagram iste kozmičke okoline radiogalaksije 10916 (slika 5.33,



Slika 5.32: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10916. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10916. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	0.909	0.28	$8.40^{+8.39}_{-8.40}$	$21.83^{+3.83}_{-3.83}$
KP		0.24	$8.92^{+7.53}_{-8.92}$	$21.52^{+3.41}_{-3.02}$
Tribble		0.29	$7.88^{+9.19}_{-7.88}$	$22.80^{+4.46}_{-4.38}$

Tablica 5.11: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10916, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.

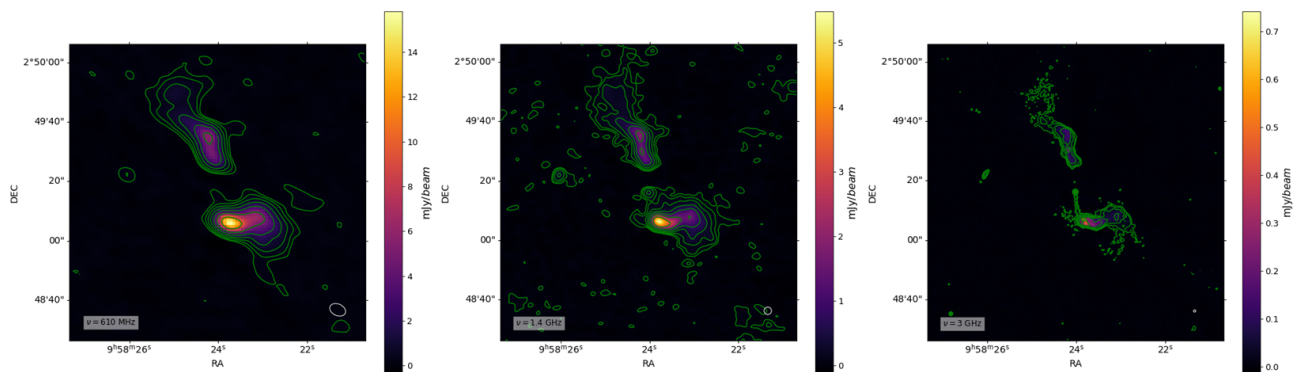


Slika 5.33: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10916 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.05 i 3 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10916 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2.5 i 30 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10916 (z_{radio}).

desno) s konturama rendgenskog zračenja (zeleno) vidimo da u široj okolini radiogalaksije postoje područja izraženog rendgenskog zračenja s određenim brojem maksimuma, a neposredno oko same radiogalaksije vidimo veće područje rendgenskog zračenja. Prema konturama galaktičkih jata (krugovi), područje rendgenskog zračenja, gdje se nalazi radiogalaksija 10916, obuhvaćeno je jednim jatom galaksija koje se nalazi na crvenom pomaku od $z_{jato} = 0.972$, a koje prema [21] ima masu $M_{200} = 8.23 \times 10^{13} M_{\odot}$. Budući da je razlika crvenih pomaka jata i radiogalaksije 10916 $|\Delta z| = 0.513$, što je velika razlika, ovo jato je pozadinsko jato kojem pripada rendgensko zračenje vidljivo unutar njega. Prema navedenim rezultatima radiogalaksija 10916 je vjerojatno izolirana galaksija.

5.12 Radiogalaksija 10918

Radiogalaksija 10918 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.345$, što je druga najbliža radiogalaksija u uzorku. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR II izvor sa svinutim oblacima, gdje je južni oblak svinut okomito na smjer mlaza, što upućuje na snažnu interakciju s okolinom (slika 5.34).

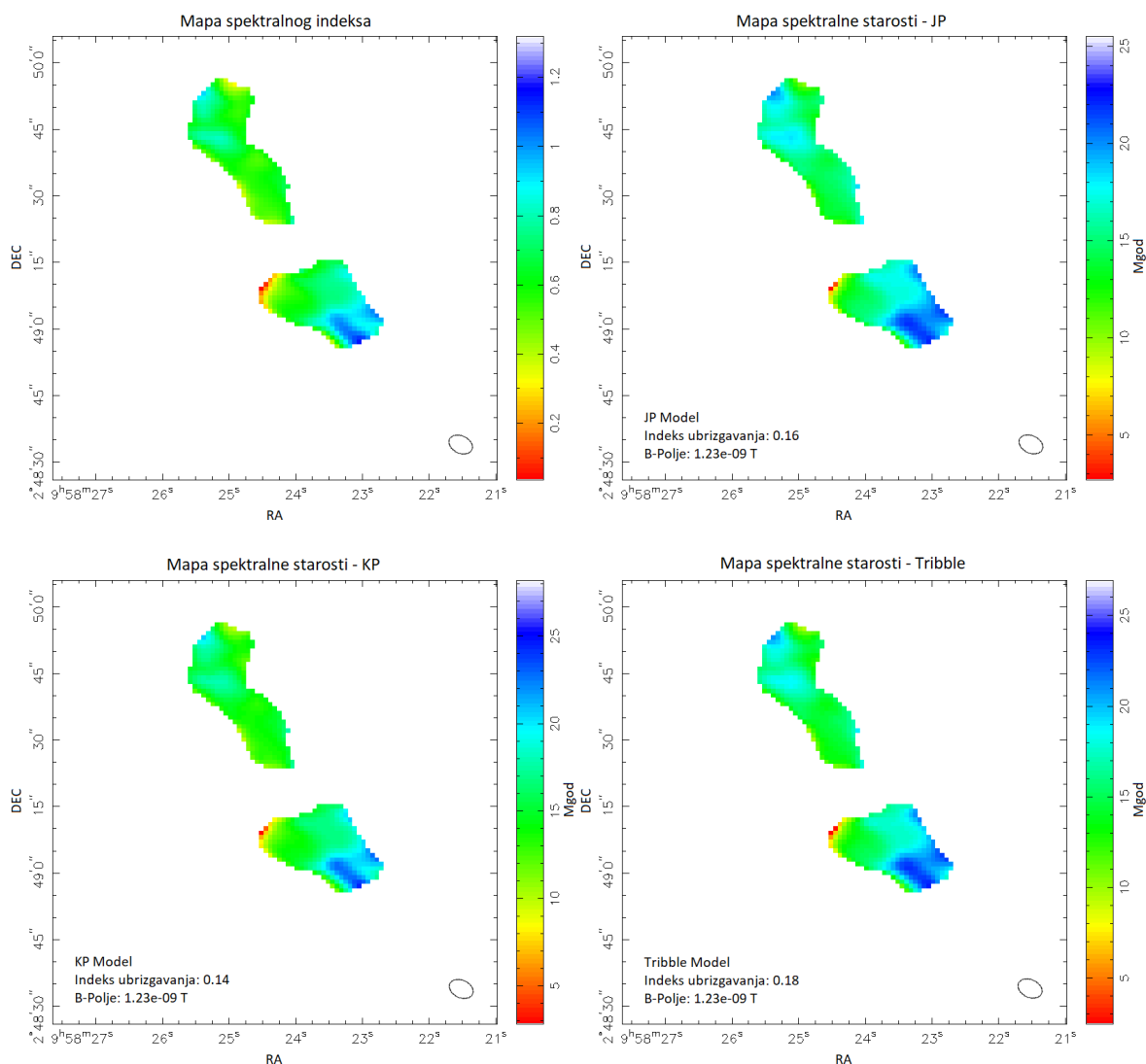


Slika 5.34: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10918 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Analizirajući mapu spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10918 (slika 5.35, gore lijevo) vidimo da lijeva polovica južnog oblaka ima ravan spektar ($\alpha < 0.6$) zračenja s najravnijim spektrom ($\alpha < 0.3$) uz lijevi rub oblaka. Lijevo područje južnog oblaka odgovara području oblaka najvećeg sjaja (slika 5.34), gdje očekujemo mali nagib spektra. Desna strana južnog oblaka ima strm spektar zračenja ($\alpha > 0.6$), gdje uz sam rub nagib prelazi vrijednost $\alpha = 1$. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer desno područje južnog oblaka sadrži plazmu manje energije, stoga očekujemo porast nagiba spektra prema desnom rubu oblaka. S druge strane, veći dio područja sjevernog oblaka ima relativno ravan spektar zračenja ($0.3 < \alpha < 0.6$), gdje na sjevernom dijelu oblaka vidimo dva područja strmog spektra ($\alpha > 0.6$). Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije iznose $\alpha_{min} = 0.04 \pm 3.57$ i $\alpha_{max} = 1.15 \pm 4.90$, gdje ponovno vidimo veliku nepouzdanost. Srednji spektralni indeks oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.66$, što odgovara strmom spektru sinkrotronskog zračenja.

Za radiogalaksiju 10918 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1.23 \text{ nT}$. Za ovaj iznos magnetskog polja dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.16$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.14$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.18$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se u blizini minimuma spektralnog indeksa, što i očekujemo.

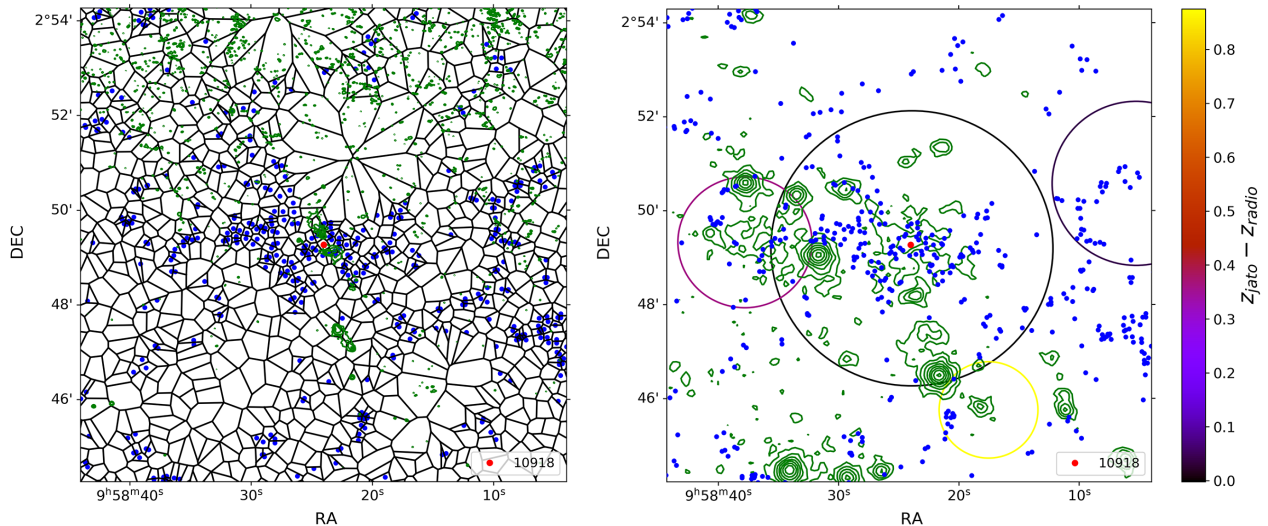
Na mapama spektralne starosti JP, KP i Tribble modela (slika 5.35) vidimo da spektralna starost oblaka prati očekivano ponašanje spektralne starosti. Lijevo dio područja južnog oblaka radiogalaksije ima spektralnu starost manju od 15 milijuna



Slika 5.35: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10918. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10918. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.23	0.16	$2.70^{+6.70}_{-2.70}$	$22.19^{+5.59}_{-4.56}$
KP		0.14	$2.82^{+5.78}_{-2.82}$	$24.52^{+0.00}_{-7.10}$
Tribble		0.18	$2.46^{+6.10}_{-2.46}$	$23.43^{+7.05}_{-5.29}$

Tablica 5.12: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10918, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.36: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10918 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10918 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 80 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10918 (z_{radio}).

godina, a uz sam rub vrha i manju od 5 milijuna godina. S druge strane, desna polovica južnog oblaka ima starost veću od 15 milijuna godina, a uz rub prelazi vrijednost iznad 20 milijuna godina. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer desna polovica južnog oblaka ima plazmu manje energije, a time i veću spektralnu starost. Nadalje, spektralna starost sjevernog oblaka ne prelazi ispod 10 milijuna godina, a većina područja ovog oblaka ima spektralnu starost do 15 milijuna godina. Na gornjoj polovici sjevernog oblaka postoji područje spektralne starosti veće od 15 milijuna godina, ali manje od 20 milijuna godina. Prema rezultatima tablice 5.12 vidimo da se minimum spektralne starosti kreće oko 2.5 milijuna godina za Tribble model do oko 2.8 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti kreće se oko 22.2 milijuna godina za JP model do 24.5 milijuna godina za KP model. Uzimajući u obzir pogrešku spektralne starosti, maksimum može doseći vrijednosti do oko 27.8 milijuna godina za JP model te oko 30.5 milijuna godina za Tribble model. Za KP model ponovno imamo da gornja pogreška maksimuma spektralne starosti iznosi 0 milijuna godina kao i kod radiogalaksija 10901 i 10913.

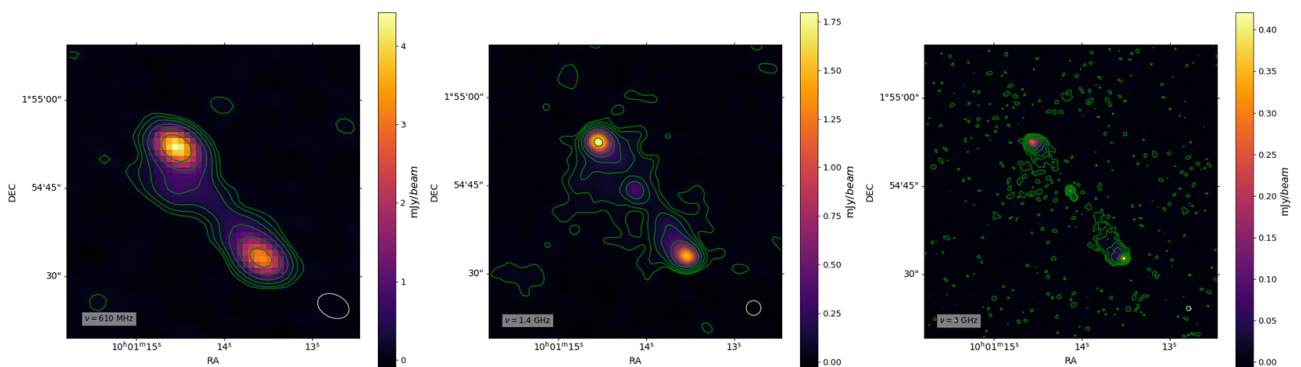
Voronoi dijagram kozmičke okoline radiogalaksije 10918 (slika 5.36, lijevo) po-

kazuje da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području izrazito velike gustoće naseljenosti. Oko same radiogalaksije vidljiv je veliki broj gusto grupiranih galaksija, što upućuje na to da ova grupa čini jato. Odmah iznad položaja radiogalaksije vidimo maskirano područje, vjerojatno zbog nekog sjajnog objekta u tom području neba. Također, prema konturama radiozračenja (zeleno) vidimo da se ispod radiogalaksije 10918 nalazi radiogalaksija 10928 ($z_{radio} = 0.878$), koju ćemo kasnije analizirati.

Prema konturama rendgenskog zračenja (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije 10918 (slika 5.36, desno) vidimo da u široj okolini radiogalaksije postoji više maksimuma rendgenskog zračenja. U području neposredno oko radiogalaksije vidimo rendgensko zračenje u području grupe galaksija oko radiogalaksije. Analizirajući konture galaktičkih jata (krugovi) vidimo da oko radiogalaksije 10918 postoji jato (crni krug) koje okružuje grupu galaksija oko radiogalaksije koja se vizualno nalazi blizu centra jata. Crveni pomak ovog jata iznosi $z_{jato} = 0.343$, što je za svega $\Delta z = 0.002$ bliže od crvenog pomaka radiogalaksije 10918, a masa mu prema [21] iznosi $M_{200} = 9.89 \times 10^{13} M_{\odot}$. Na temelju ovih rezultata možemo zaključiti da je radiogalaksija 10918 centralna galaksija ovog galaktičkog jata.

5.13 Radiogalaksija 10919

Radiogalaksija 10919 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 1.483$, što je treća najudaljenija radiogalaksija u uzorku. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao simetrični FR II izvor kojem se može vidjeti i središnja jezgra (slika 5.37).



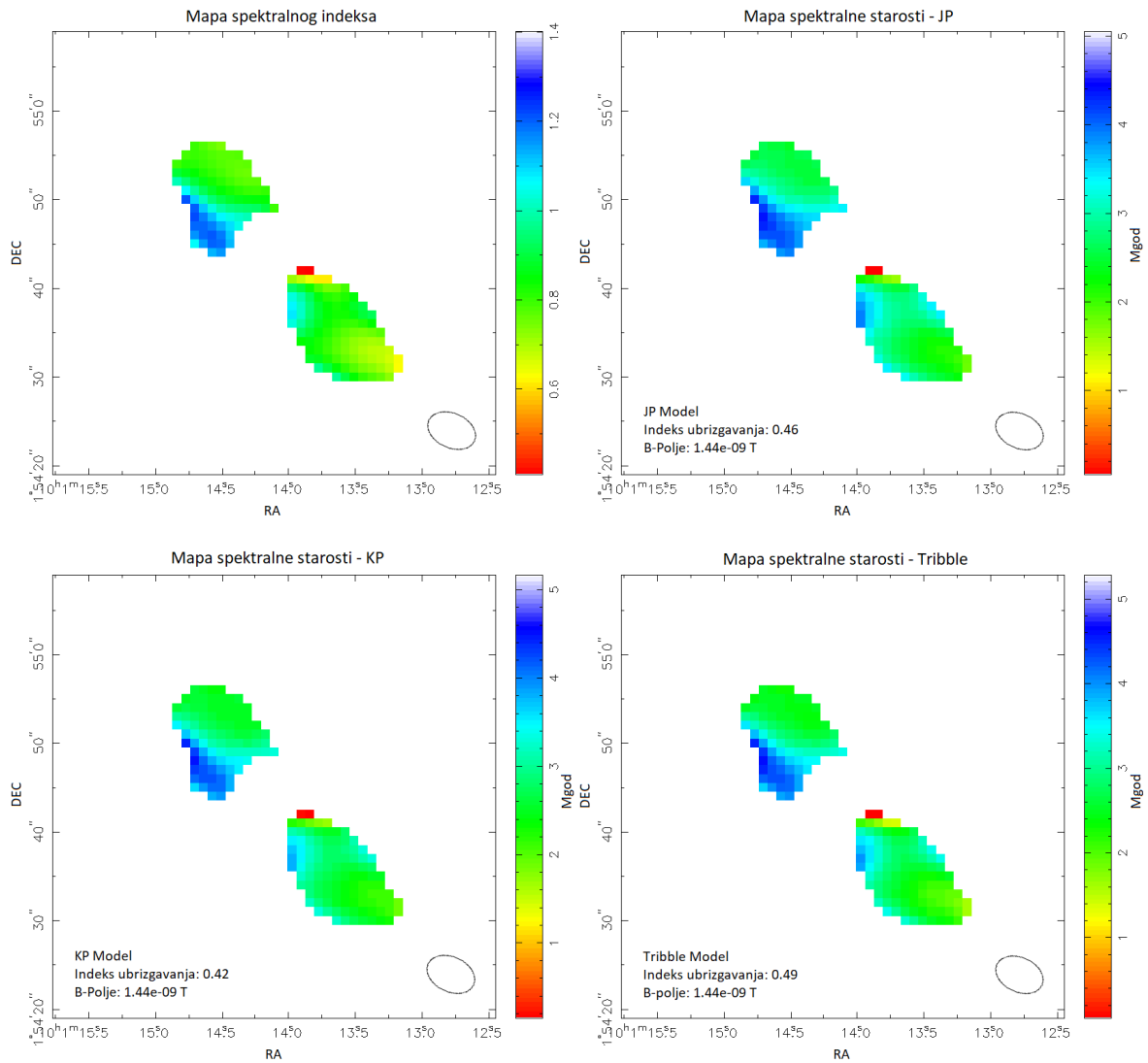
Slika 5.37: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10919 u jedinicama $mJy/beam$ na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610MHz} = 0.039 mJy/beam$, $\sigma_{1.4GHz} = 0.012 mJy/beam$ i $\sigma_{3GHz} = 0.0023 mJy/beam$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Na mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10919 (slika 5.38, gore lijevo) vidimo da gotovo cijelo područje izvora ima strm spektar ($\alpha > 0.6$) zračenja osim malog lokaliziranog područja na rubu južnog oblaka prema središnjoj jezgri. Veće područje južnog oblaka ima spektralni indeks između $\alpha = 0.6$ i $\alpha = 1$, gdje manji spektralni indeks ima unutrašnje područje uz donji vrh oblaka, gdje je na slici A.7 bila vidljiva vruća točka. Spektralni indeks sjevernog oblaka ne prelazi ispod $\alpha = 0.7$, a doseže i vrijednosti iznad $\alpha = 1$ uz donji lijevi rub oblaka, gdje plazma ima najmanju energiju. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose $\alpha_{min} = 0.41 \pm 4.23$ i $\alpha_{max} = 1.22 \pm 4.16$, gdje vidimo veliku nepouzdanost. Srednji spektralni indeks oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.84$, što odgovara vrlo strmom spektru zračenja.

Za radiogalaksiju 10919 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima od $B = 1.44$ nT. Ovo magnetsko polje rezultiralo je indeksima ubrizgavanja $\alpha_{inj}(JP) = 0.46$, $\alpha_{inj}(KP) = 0.42$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.49$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se u blizini minimuma spektralnog indeksa, što je očekivan rezultat.

Na mapama spektralne starosti za JP, KP i Tribble model (slika 5.38) vidimo da je spektralna starost oblaka u skladu s ponašanjem spektralnog indeksa. Najmanju spektralnu starost ima područje južnog oblaka, gdje spektralnu starost manju od 1.5 milijuna godina ima lokalizirano područje uz rub oblaka prema središnjoj jezgri, gdje se nalazi minimum. Također, područje uz vrh južnog oblaka na mjestu vruće točke ima spektralnu starost između 1.5 i 2.5 milijuna godina za sva tri modela, dok spektralna starost ostatka područja oblaka prelazi i iznad 3 milijuna godina. S druge strane, najmanja spektralna starost sjevernog oblaka, koja se kreće između 2 i 3 milijuna godina, nalazi se u području vrha oblaka, gdje je bila vidljiva druga vruća točka. Najveću spektralnu starost ima područje donjeg lijevog ruba sjevernog oblaka, gdje starost prelazi i 4 milijuna godina, što je u skladu s očekivanjem budući da to područje sadrži plazmu najmanje energije. Prema tablici 5.13 minimum spektralne starosti kreće se između 0.05 milijuna godina za JP i Tribble model te 0.15 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti kreće se između 4.4 milijuna godina za JP model i 4.6 milijuna godina za Tribble model. Ako uzmemo u obzir i pogrešku, maksimum spektralne starosti može doseći i vrijednosti oko 5.4 milijuna godina za JP model ili čak oko 6.6 milijuna godina za KP model.

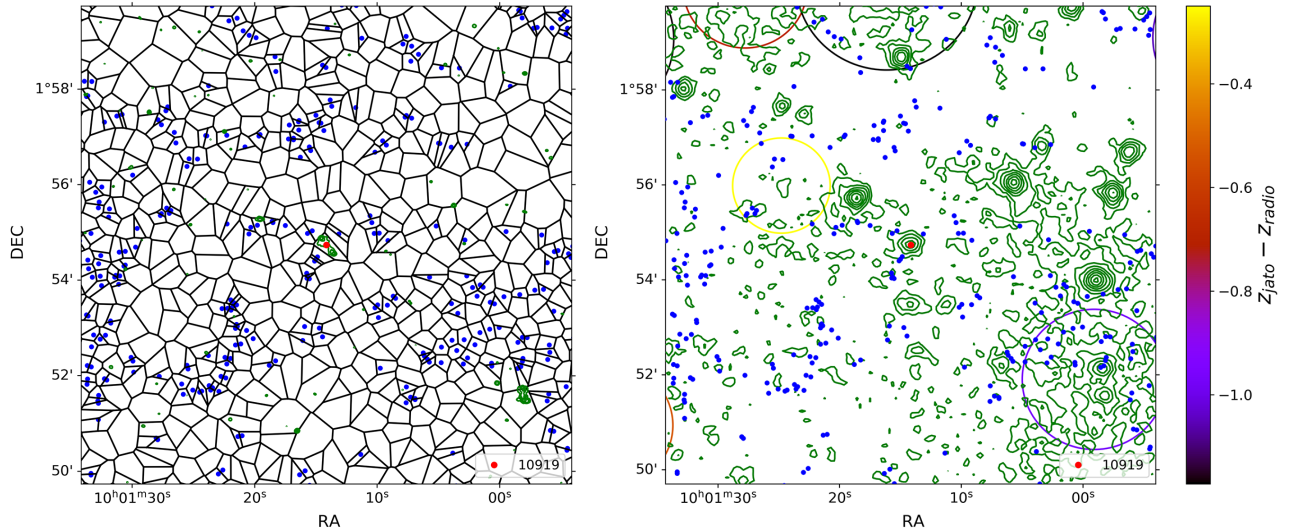
Voronoi dijagram kozmičke okoline radiogalaksije 10919 (slika 5.39. lijevo) po-



Slika 5.38: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10919. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10919. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.44	0.46	$0.05^{+1.56}_{-0.05}$	$4.39^{+1.02}_{-0.96}$
KP		0.42	$0.15^{+1.78}_{-0.15}$	$4.49^{+2.14}_{-1.01}$
Tribble		0.49	$0.05^{+1.40}_{-0.05}$	$4.59^{+1.32}_{-1.05}$

Tablica 5.13: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10919, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.39: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10919 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.05 i 3.5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10919 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2 i 50 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10919 (z_{radio}).

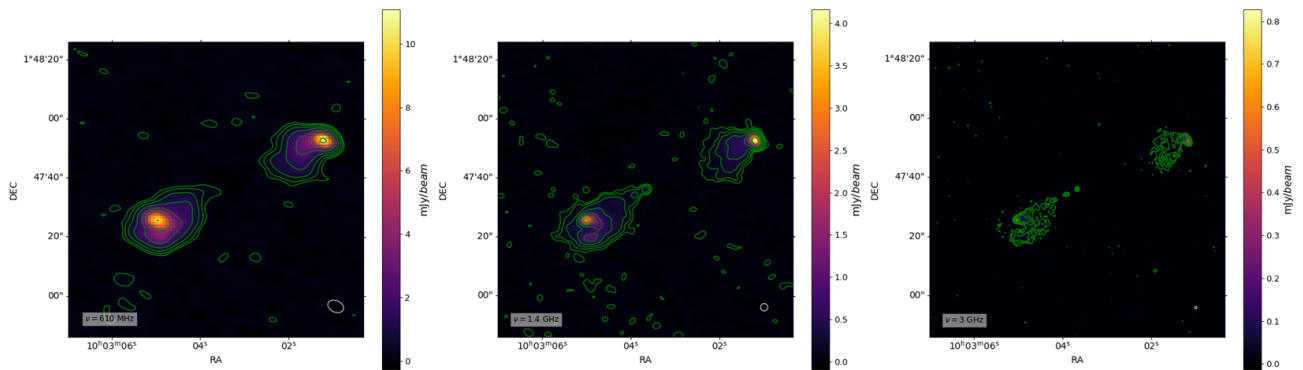
kazuje da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području male gustoće naseljenosti. U okolini nema izraženog grupiranja galaksija koje bi upućivalo na postojanje galaktičkog jata, a neposredno oko radiogalaksije postoji tek mali broj galaksija.

Ako pogledamo rendgensko zračenje (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije 10919 (slika 5.39, desno), vidimo da u okolini radiogalaksije postoji izraženo rendgensko zračenje s mnogim maksimumima. Oko radiogalaksije 10919 vidimo snažno rendgensko zračenje čiji se maksimum poklapa s položajem optičkog središta radiogalaksije. Prema katalogu iz [32] ova radiogalaksija je ujedno i točkasti izvor rendgenskog zračenja, što se vidi iz kontura rendgenskog zračenja. Promotrimo li konture galaktičkih jata (krugovi) u ovom području neba, vidimo da nema jata u blizini radiogalaksije 10919. Prema ovim rezultatima možemo zaključiti da je radiogalaksija 10919 vjerojatno izolirana galaksija.

5.14 Radiogalaksija 10923

Radiogalaksija 10923 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 1.203$. Prema [36] radiogalaksija 10923 klasificirana je kao simetrični FR II izvor kod kojeg postoji mogući

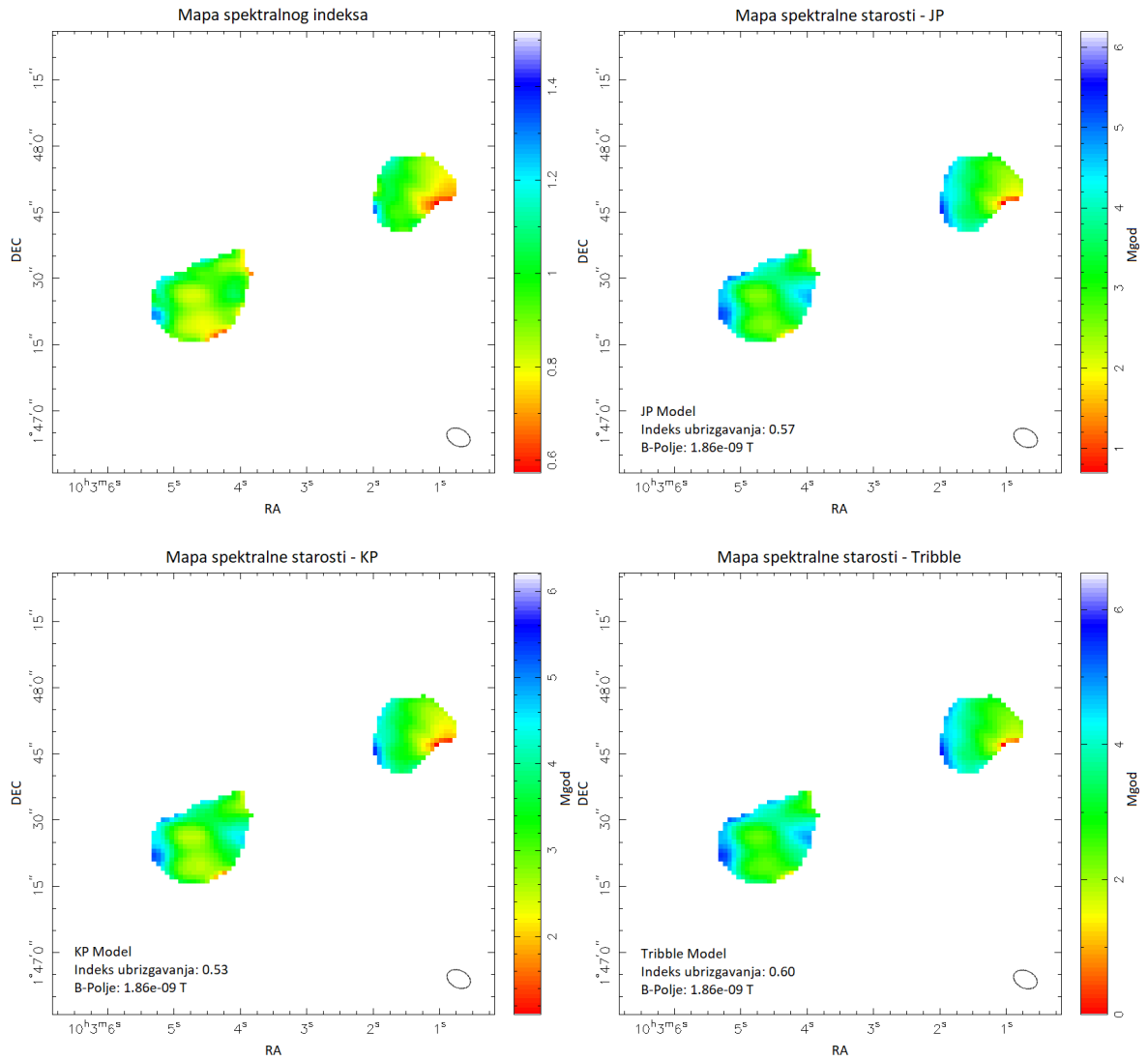
efekt projekcije na ravninu neba kod južnog oblaka (slika 5.40).



Slika 5.40: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10923 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Na mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10923 (slika 5.41, gore lijevo) vidimo da oba oblaka imaju strm spektar zračenja ($\alpha > 0.6$) u gotovo cijelom području. U području sjevernog oblaka manje strmiji spektar ($\alpha < 0.8$) nalazi se uz vrh oblaka, gdje je na slici A.7 vidljiva vruća točka. Od vrha sjevernog oblaka prema središnjoj jezgri nagib spektra raste i do vrijednosti iznad $\alpha = 1$, što je u skladu s očekivanjem budući da energija plazme opada udaljavanjem od vruće točke. U području južnog oblaka manje strmiji spektar ($\alpha < 0.8$) nalazi se na tri različita mjesta. Jedno mjesto odgovara području blizu središnje jezgre, gdje započinje mlaz, drugo mjesto nalazi se u unutrašnjosti oblaka u području vruće točke i treće mjesto u području ispod vruće točke, gdje je oblak bio sjajniji, vjerojatno zbog efekta projekcije. Udaljavanjem od ova tri područja nagib spektra zračenja raste i do vrijednosti iznad $\alpha = 1$, što je u skladu s očekivanjem. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10923 iznose $\alpha_{\min} = 0.57 \pm 5.97$ i $\alpha_{\max} = 1.32 \pm 3.72$, gdje ponovno vidimo veliku nepouzdanost. Srednji spektralni indeks oblaka radiogalaksije iznosi $\bar{\alpha} = 0.92$, što odgovara vrlo strmom spektru zračenja.

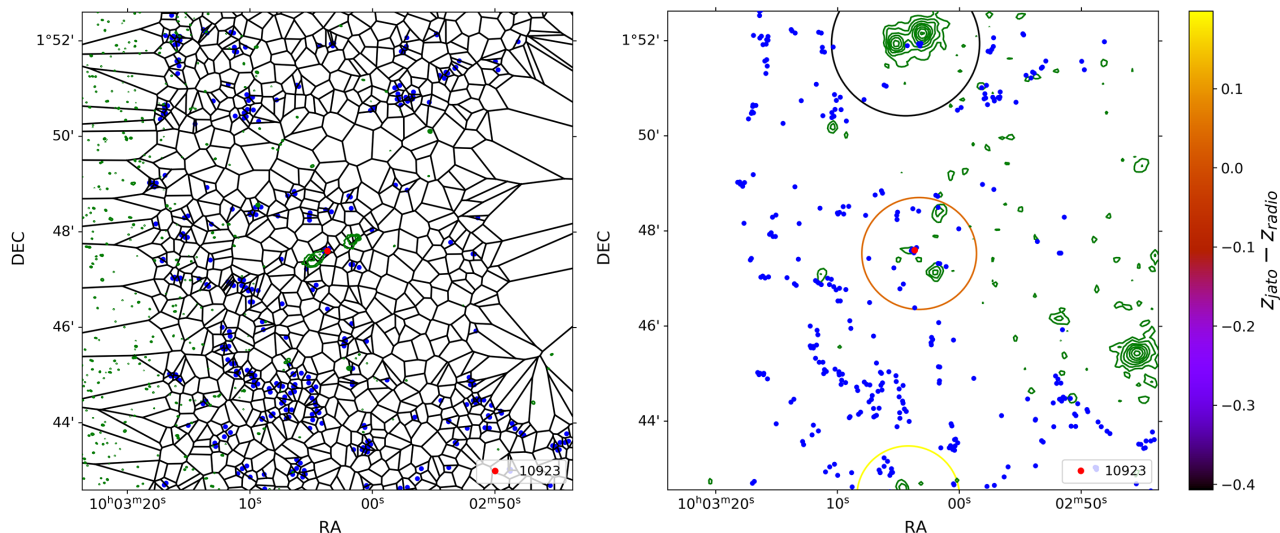
Za radiogalaksiju 10923 procijenili smo iznos prosječnog magnetskog polja u oblacima od $B = 1.86 \text{ nT}$. Za dano magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.57$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.53$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.60$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se oko minimuma spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem.



Slika 5.41: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10923. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10923. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.86	0.57	$0.70^{+3.00}_{-0.70}$	$5.39^{+1.31}_{-1.16}$
KP		0.53	$1.10^{+2.52}_{-1.10}$	$5.41^{+2.24}_{-1.27}$
Tribble		0.60	$0.00^{+3.71}_{-0.00}$	$5.69^{+1.61}_{-1.32}$

Tablica 5.14: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10923, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.42: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10923 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 4 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10923 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 35 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10923 (z_{radio}).

Analizirajući mape spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10923 za JP, KP i Tribble model (slika 5.41) vidimo da je ponašanje spektralne starosti u skladu s ponašanjem spektralnog indeksa. Za sva tri modela spektralne starosti vidimo da sjeverni oblak ima spektralnu starost manju od 3 milijuna godina u području vrha oblaka na mjestu vruće točke. Udaljavanjem od vruće točke u smjeru središnje jezgre spektralna starost raste i do vrijednosti iznad 4 milijuna godina, što i očekujemo za plazmu manje energije. Spektralnu starost manju od 3 milijuna godina imaju i tri područja južnog oblaka, gdje smo imali manje strmiji spektar zračenja ($\alpha < 0.8$), dok udaljavanjem od ova tri područja spektralna starost raste iznad 4 milijuna godina kako se približavamo rubovima oblaka. Prema tablici 5.14 minimum spektralne starosti kreće se između 0 milijuna godina za Tribble model i 1.1 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti kreće se oko 5.4 milijuna godina za JP i KP model i oko 5.7 milijuna godina za Tribble model. Uzimajući pogrešku u obzir, maksimum spektralne starosti može doseći vrijednosti oko 6.7 milijuna godina za JP model do 7.7 milijuna godina za KP model.

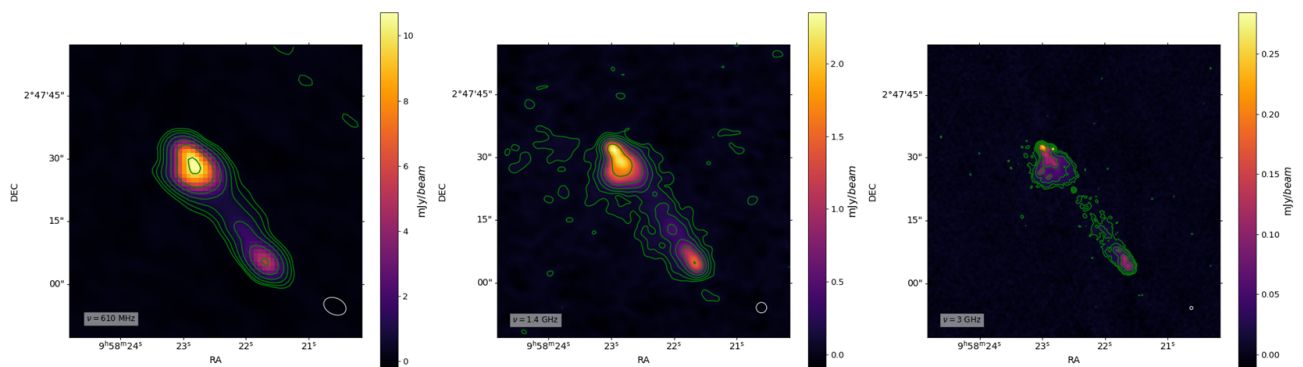
Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10923 (slika 5.42, lijevo)

vidimo da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području male gustoće naseljenosti. Također, vidimo da se radiogalaksija nalazi uz lijevi rub polja COSMOS zbog nedostatka galaksija na lijevom rubu dijagrama i velikog šuma radiozračenja (zeleno) u tom području. Neposredno oko radiogalaksije vidljiv je tek neznatan broj galaksija pa ne možemo sa sigurnošću zaključiti postoji li jato u blizini ili ne.

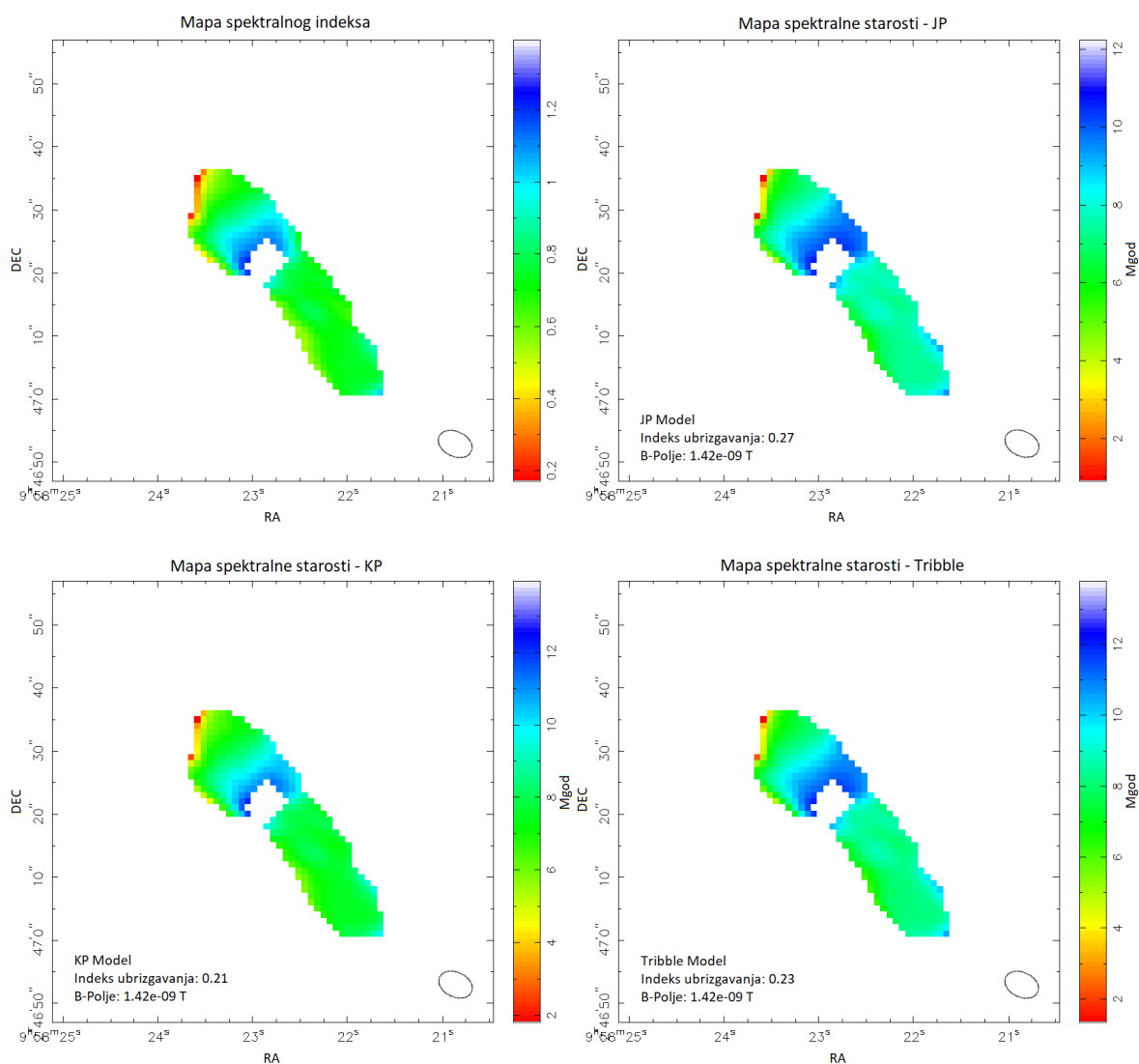
Promotrimo li rendgensko zračenje (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije 10923 (slika 5.42, desno), vidimo da nema izraženog rendgenskog zračenja u tom području neba, osim nekoliko snažnih maksimuma kao što je jedan u maskiranom području te dva bliska maksimuma na gornjem rubu dijagrama. Oko same radiogalaksije postoji tek malo rendgensko zračenje iz kojeg ne možemo donijeti kvalitetan zaključak. Međutim, analizirajući konture galaktičkih jata vidimo da postoji jedno jato (narančasti krug) koji okružuje radiogalaksiju 10923 i rendgensko zračenje vidljivo oko nje. Crveni pomak ovog jata iznosi $z_{jato} = 1.258$, što je za $\Delta z = 0.055$ dalje od crvenog pomaka radiogalaksije, a masa mu prema [21] iznosi $M_{200} = 9.25 \times 10^{13} M_{\odot}$. Ovaj rezultat upućuje na to da bi radiogalaksija 10923 mogla biti u rubnom području ovog jata ili se radi o satelitskoj galaksiji.

5.15 Radiogalaksija 10928

Radiogalaksija 10928 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.878$. Prema [36] ova radiogalaksija klasificirana je kao FR II izvor, što vidimo na slici 5.43 prema sjajnim oblacima i vrućim točkama u sjevernom oblaku na 3 GHz.



Slika 5.43: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10928 u jedinicama $mJy/beam$ na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610MHz} = 0.039 mJy/beam$, $\sigma_{1.4GHz} = 0.012 mJy/beam$ i $\sigma_{3GHz} = 0.0023 mJy/beam$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.



Slika 5.44: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10928. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10928. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.42	0.27	$0.91^{+4.40}_{-0.91}$	$10.65^{+0.63}_{-0.61}$
KP		0.21	$1.81^{+3.75}_{-1.81}$	$12.14^{+1.48}_{-1.10}$
Tribble		0.23	$1.34^{+4.73}_{-1.34}$	$11.99^{+0.74}_{-0.76}$

Tablica 5.15: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10928, indeks ubrzigavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.

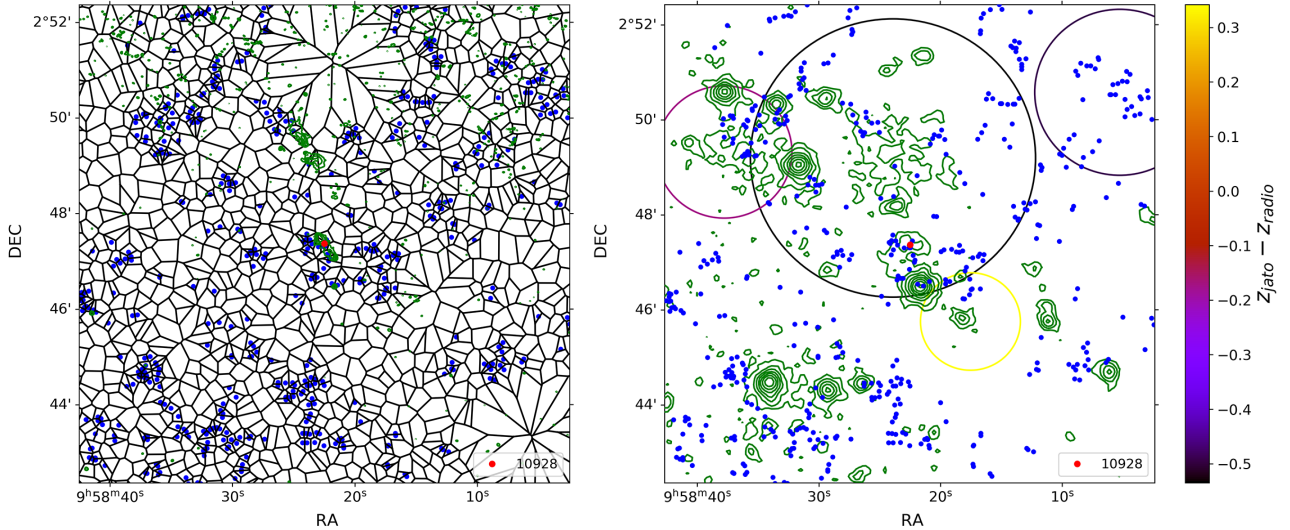
Na mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10928 (slika 5.44, gore lijevo) vidimo da uz vrh sjevernog oblaka, gdje se nalazi vruća točka, postoji malo područje ravnog spektra zračenja ($\alpha < 0.6$). Udaljavanjem od vrha sjevernog oblaka nagib spektra raste u smjeru središnje jezgre i do vrijednosti iznad $\alpha = 1$. Ovaj rezultat u skladu je s rastom nagiba spektra udaljavanjem od vrućih točaka. U južnom oblaku u gotovo cijelom području imamo strm spektar zračenja ($\alpha > 0.6$), gdje nagib ne prelazi $\alpha = 1$. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose $\alpha_{min} = 0.17 \pm 4.62$, gdje vidimo veliku nepouzdanost minimuma, i $\alpha_{max} = 1.21 \pm 1.14$. Srednja vrijednost spektralnog indeksa oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.76$, što odgovara strmom spektru zračenja.

Za radiogalaksiju 10928 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1.42$ nT. Ova vrijednost magnetskog polja rezultirala je indeksima ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.27$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.21$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.23$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se u blizini minimuma spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem.

Prema mapama spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10928 za JP, KP i Tribble model (slika 5.44) vidimo da spektralna starost prati ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela područje vrha sjevernog oblaka ima najmanju spektralnu starost manju od 6 milijuna godina, što je očekivano budući da se ovdje nalazi vruća točka. Udaljavanjem od vrha sjevernog oblaka ovog FR II izvora spektralna starost raste i do vrijednosti iznad 9 milijuna godina u smjeru središnje jezgre, gdje oblak sadrži plazmu manje energije. S druge strane, spektralna starost područja južnog oblaka iznosi između 6 i 9 milijuna godina za sva tri modela. Prema tablici 5.15 minimum spektralne starosti kreće se između 0.91 milijuna godina za JP model i 1.81 milijuna godina za KP model. Maksimum se kreće između 10.65 milijuna godina za JP model i 12.14 milijuna godina za KP model. Uzimajući i pogrešku u obzir, maksimum spektralne starosti može doseći vrijednosti između 11.3 milijuna godina za JP model i 13.6 milijuna godina za KP model.

Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10928 (slika 5.45, lijevo) vidimo da u široj okolini radiogalaksije (crvena točka) postoje određena grupiranja manjeg broja galaksija. Neposredno oko radiogalaksije 10928 vidimo da postoji manji broj galaksija grupiranih oko nje. Nažalost, na temelju samo Voronoi dijagrama ne možemo sa sigurnošću zaključiti da oko radiogalaksije postoji jato galaksija.

Ako promotrimo konture rendgenskog zračenja (zeleno) na dijagramu iste oko-

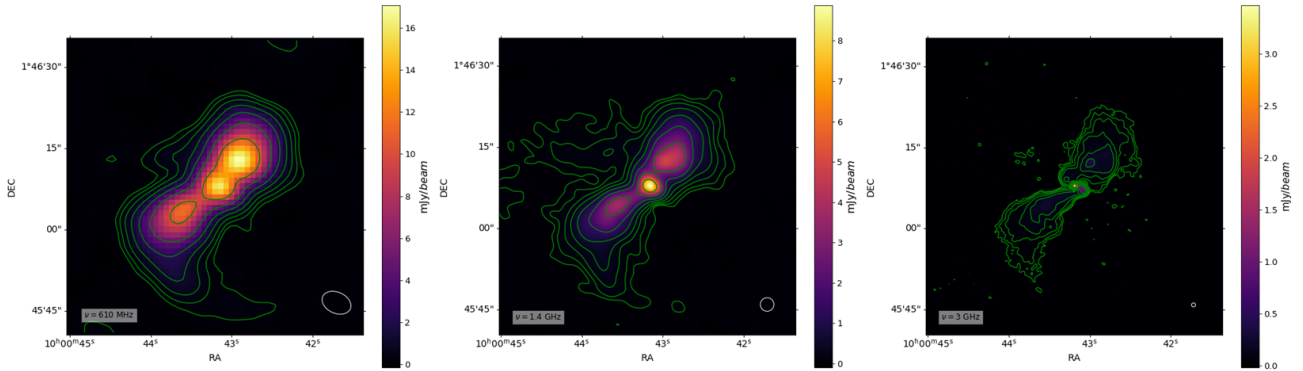


Slika 5.45: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10928 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.08 i 5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10928 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 80 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10928 (z_{radio}).

line radiogalaksije 10928 (slika 5.45, desno), vidimo da postoji nekoliko snažnih maksimuma rendgenskog zračenja u ovom području neba. Neposredno oko radiogalaksije vidljivo je malo područje slabog rendgenskog zračenja te snažan maksimum južno od položaja radiogalaksije. Prema [32] radiogalaksija 10928 nije točkasti izvor rendgenskog zračenja, no to ne znači da oko nje ne može postojati područje rendgenskog zračenja. Na položaju maksimuma južno radiogalaksije 10928 na Voronoi dijagramu postoji prostorno malen, ali snažan točkasti izvor radiozračenja (zeleno). Ovaj rezultat upućuje na to da se na položaju maksimuma rendgenskog zračenja južno od radiogalaksije možda nalazi AGN. S druge strane, analizirajući konture galaktičkih jata (krugovi) vidimo da postoji jedno jato (crni krug) mase $M_{200} = 9.89 \times 10^{13} M_{\odot}$ [21] koje okružuje radiogalaksiju, ali njegov je crveni pomak za $\Delta z = 0.535$ manji od crvenog pomaka radiogalaksije. Također, malo jato (žuti krug) mase $M_{200} = 5.76 \times 10^{13} M_{\odot}$ [21] južnije od radiogalaksije 10928 ima crveni pomak za $\Delta z = 0.342$ veći od crvenog pomaka radiogalaksije. Prema ovim rezultatima, radiogalaksija 10928 ne pripada niti jednom poznatom jatu galaksija.

5.16 Radiogalaksija 10933

Radiogalaksija 10933 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.346$, što je treća najbliža radiogalaksija u uzorku. Prema [36] ova radiogalaksija klasificirana je kao FR I izvor kod kojeg je na 3 GHz (slika 5.46) vidljiva rotacija u emisiji radiozračenja, koja je vjerojatno posljedica ili projekcijskog efekta na ravninu neba ili ponovnog pokretanja aktivnosti AGN-a.

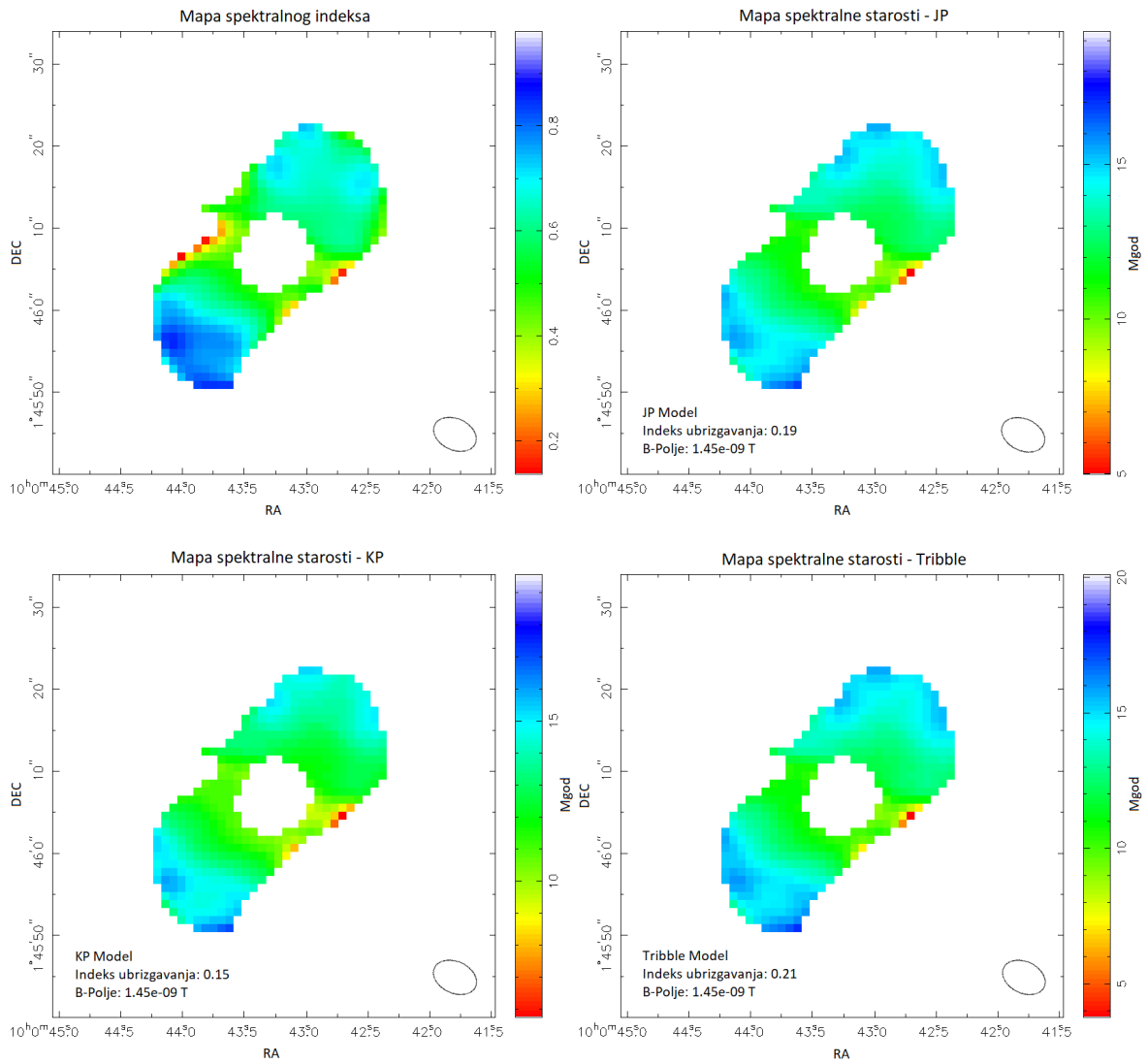


Slika 5.46: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10933 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Prema mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10933 (slika 5.47, gore lijevo) vidimo da se ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) nalazi uglavnom u području oko središnje jezgre. Udaljavanjem od središnje jezgre spektar zračenja oblaka postaje strmiji, gdje poprima vrijednosti i iznad $\alpha > 0.7$, ali i iznad $\alpha > 0.8$ u južnom oblaku. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem nagiba spektra u oblacima FR I izvora, kod kojeg energija plazme opada od područja središnje jezgre prema krajevima oblaka. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose $\alpha_{min} = 0.14 \pm 3.41$ i $\alpha_{max} = 0.85 \pm 1.92$. Srednja vrijednost spektralnog indeksa ovog izvora iznosi oko $\bar{\alpha} = 0.61$, što je na granici ravnog i strmog spektra zračenja.

Za radiogalaksiju 10933 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1.45 \text{ nT}$. Za ovaj iznos magnetskog polja dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.19$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.15$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.21$ za tri modela spektralne starosti. Vidimo da su sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja u blizini minimuma spektralnog indeksa, što je očekivan rezultat.

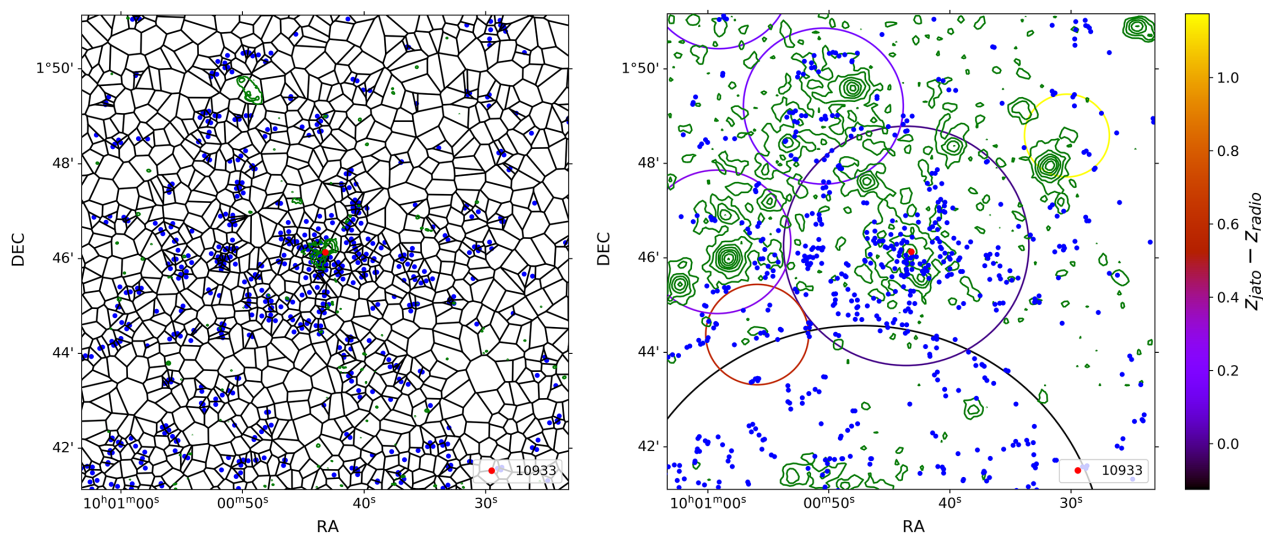
Na mapama spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10933 za JP, KP i Tribble



Slika 5.47: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10933. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10933. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.45	0.19	$4.99^{+7.15}_{-4.99}$	$16.79^{+2.68}_{-2.38}$
KP		0.15	$5.76^{+6.15}_{-5.76}$	$17.01^{+4.33}_{-2.55}$
Tribble		0.21	$3.76^{+8.26}_{-3.76}$	$17.49^{+3.18}_{-2.78}$

Tablica 5.16: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10933, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.48: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10933 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.06 i 7 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10933 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2.5 i 70 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10933 (z_{radio}).

model (slika 5.47) vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela vidimo da je spektralna starost najmanja u području oko središnje jezgre, gdje iznosi manje od 12 milijuna godina, a na nekim mjestima i manje od 10 milijuna godina. Udaljavanjem od središnje jezgre spektralna starost raste kako se približavamo vrhovima oba oblaka, gdje spektralna starost prelazi 14 milijuna godina. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem spektralne starosti oblaka FR I izvora, gdje vrhovi oblaka sadrže plazmu manje energije, a time i veće spektralne starosti. Prema tablici 5.16 minimum spektralne starosti kreće se od vrijednosti oko 3.8 milijuna godina za Tribble model do oko 5.8 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti kreće se između 16.8 milijuna godina za JP model i 17.5 milijuna godina za Tribble model. Uzmemo li i pogrešku u obzir, maksimum spektralne starosti može doseći vrijednosti i oko 19.5 milijuna godina za JP model ili čak 21.4 milijuna godina za KP model.

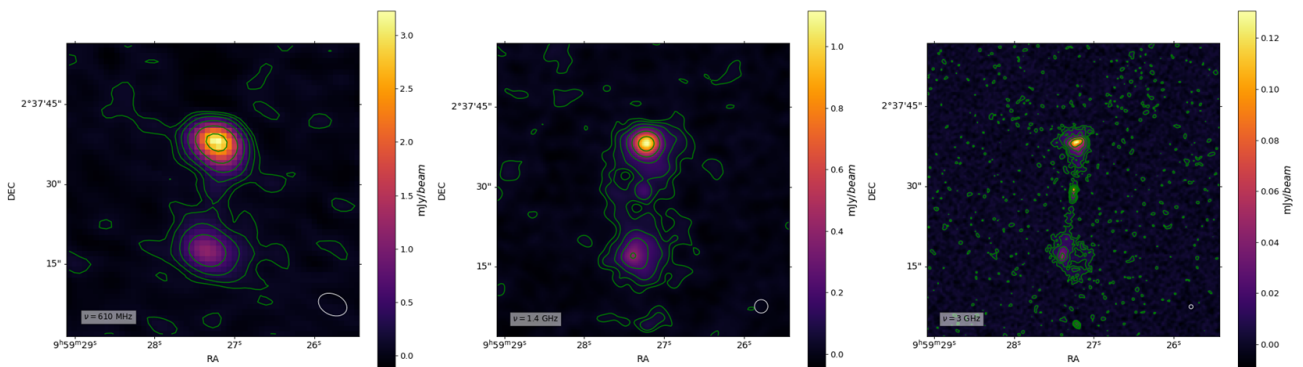
Analizirajući Voronoi dijagram kozmičke okoline radiogalaksije 10933 (slika 5.48, lijevo) vidimo da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području velike gustoće naseljenosti. U području neposredno oko radiogalaksije vidimo veliki broj gusto gru-

piranih galaksija, što upućuje na postojanje galaktičkog jata oko radiogalaksije.

Pogledamo li konture rendgenskog zračenja (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije 10933 (slika 5.48, desno), vidimo da u gornjoj polovici dijagrama postoji nekoliko snažnih maksimuma rendgenskog zračenja. Neposredno oko radiogalaksije postoji područje rendgenskog zračenja koje obuhvaća grupu galaksija oko radiogalaksije, što već potvrđuje postojanje jata. Analizirajući konture galaktičkih jata (krugovi), vidimo da oko radiogalaksije 10933 stvarno postoji jedno galaktičko jato (ljubičasti krug) s centrom blizu položaja radiogalaksije, koje obuhvaća veliki broj galaksija grupiranih oko radiogalaksije te područje rendgenskog zračenja. Crveni pomak ovog jata jednak je $z_{jato} = 0.346$, što je upravo jednako crvenom pomaku radiogalaksije 10933, a masa mu prema [21] iznosi $M_{200} = 6.45 \times 10^{13} M_{\odot}$, što odgovara masi grupe galaksija. Dakle, prema dobivenim rezultatima dijagrama kozmičke okoline radiogalaksije 10933 na slici 5.48, radiogalaksija 10933 je vjerojatno centralna galaksija galaktičke grupe.

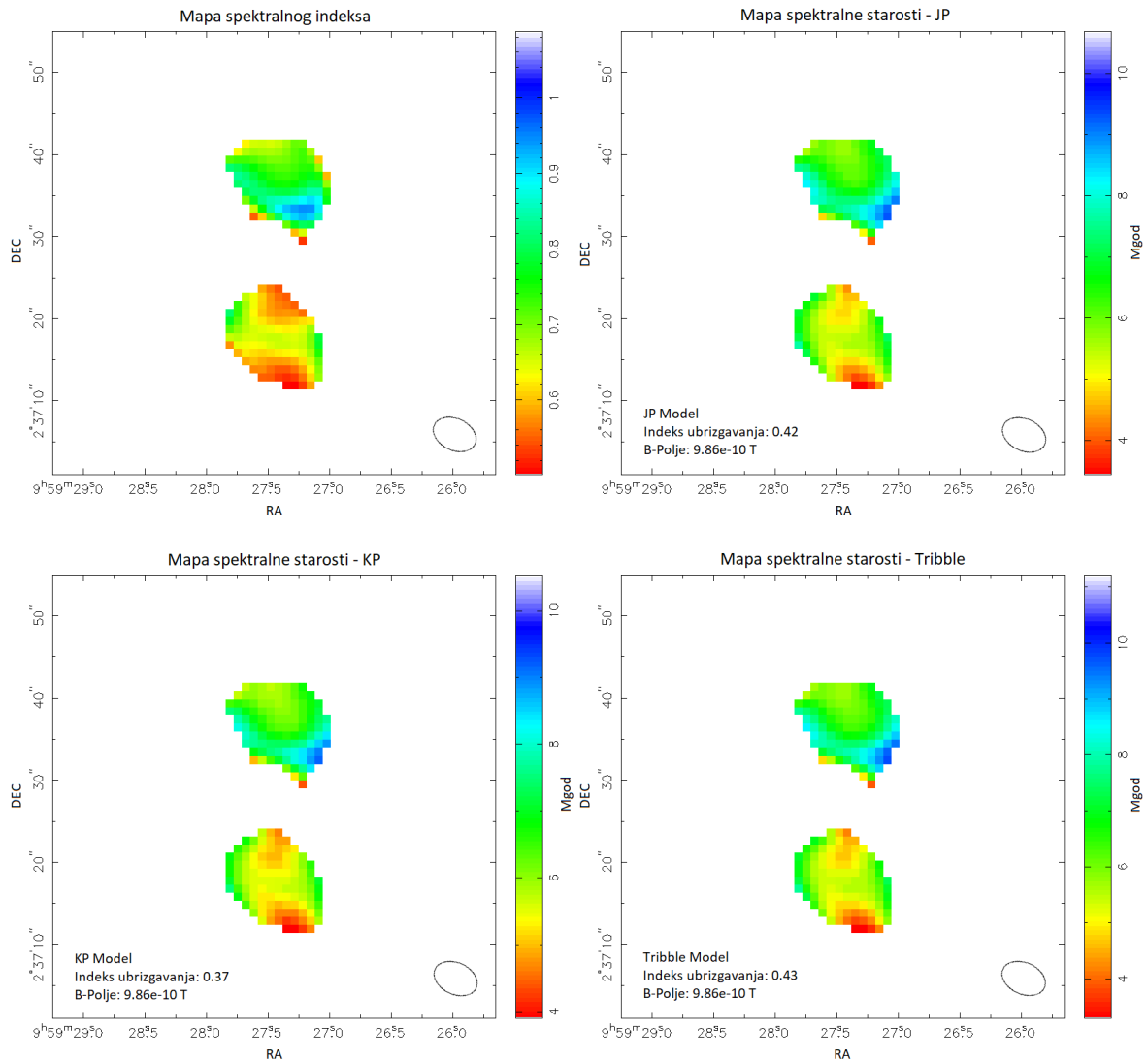
5.17 Radiogalaksija 10935

Radiogalaksija 10935 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.954$. Prema katalogu iz [36] radiogalaksija 10935 klasificirana je kao FR II izvor kod kojeg možemo vidjeti i središnju jezgru na frekvenciji od 3 GHz, ali i 1.4 GHz (slika 5.49).



Slika 5.49: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10935 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Na mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10935 (slika 5.50, gore lijevo) vidimo da južni oblak ima ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) u području donjeg vrha,



Slika 5.50: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10935. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10935. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	0.986	0.42	$3.44^{+4.35}_{-3.44}$	$9.29^{+2.06}_{-2.08}$
KP		0.37	$3.90^{+3.89}_{-3.90}$	$9.16^{+2.68}_{-2.05}$
Tribble		0.43	$3.29^{+4.76}_{-3.29}$	$9.75^{+2.51}_{-2.42}$

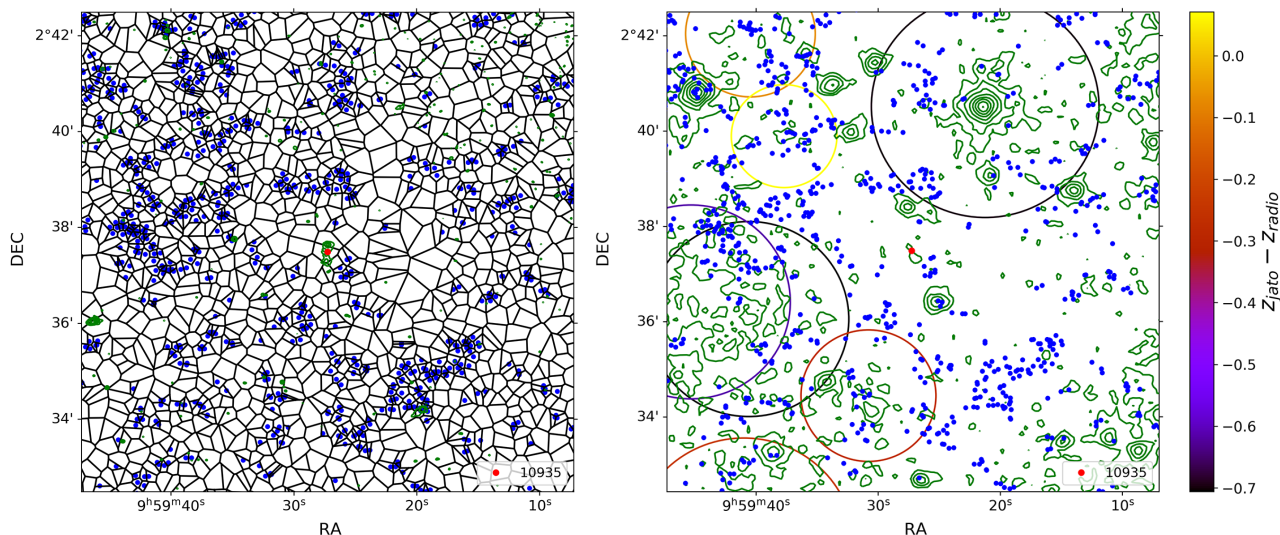
Tablica 5.17: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10935, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.

gdje se nalazi vruća točka, i u području gornjeg vrha, gdje se nalazi mlaz. Ostatak područja južnog oblaka ima strm spektar zračenja s nagibom do $\alpha = 0.8$. S druge strane, gotovo cijelo područje sjevernog oblaka ima strm spektar zračenja ($\alpha > 0.6$), osim uz dno oblaka prema središnjoj jezgri. Manje strmi spektar zračenja ($\alpha < 0.8$) ima područje gornjeg vrha sjevernog oblaka, gdje se nalazi vruća točka. Udaljavanjem od ove vruće točke nagib spektra raste i iznad $\alpha > 0.8$, što je uskladu s očekivanjem. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose $\alpha_{min} = 0.50 \pm 5.85$, gdje vidimo veliku nepouzdanost minimuma, i $\alpha_{max} = 0.95 \pm 1.37$. Srednja vrijednost spektralnog indeksa oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.72$, što odgovara strmom spektru zračenja.

Za radiogalaksiju 10935 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 0.986$ nT. Za dano magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.42$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.37$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.43$ za tri modela spektralne starosti. Dobivene vrijednosti indeksa ubrizgavanja nalaze se ispod minimuma spektralnog indeksa, ali ipak dovoljno blizu minimuma, što i očekujemo.

Analizirajući mape spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10935 za JP, KP i Tribble model (slika 5.50) vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela južni oblak ima najmanju spektralnu starost. Područje uz donji vrh južnog oblaka, gdje se nalazi vruća točka, i uz gornji vrh oblaka, gdje se nalazi mlaz, ima spektralnu starost manju od 5 milijuna godina. Udaljavanjem od ova dva područja spektralna starost raste do vrijednosti između 7 i 8 milijuna godina. S druge strane, osim uz dno, manju spektralnu starost sjevernog oblaka oko 6 milijuna godina vidimo u području gornjeg vrha, gdje se nalazi vruća točka. Područja dalje od gornjeg vrha sjevernog oblaka imaju veću spektralnu starost, koja prelazi i iznad 8 milijuna godina na nekim mjestima. Rezultati su u skladu s očekivanim porastom spektralne starosti udaljavanjem od vruće točke FR II izvora. Prema rezultatima tablice 5.17 minimum spektralne starosti kreće se od oko 3.3 milijuna godina za Tribble model do oko 3.9 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti kreće se između vrijednosti oko 9.2 milijuna godina za KP model do oko 9.8 milijuna godina za Tribble model.

Voronoi dijagram kozmičke okoline radiogalaksije 10935 (slika 5.51, lijevo) pokazuje da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području male gustoće naseljenosti budući da neposredno oko same radiogalaksije nema grupiranja galaksija. Tek unutar šire okoline vidimo određena grupiranja galaksija. Na temelju samo Voronoi



Slika 5.51: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10935 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.05 i 3 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10935 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2 i 140 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10935 (z_{radio}).

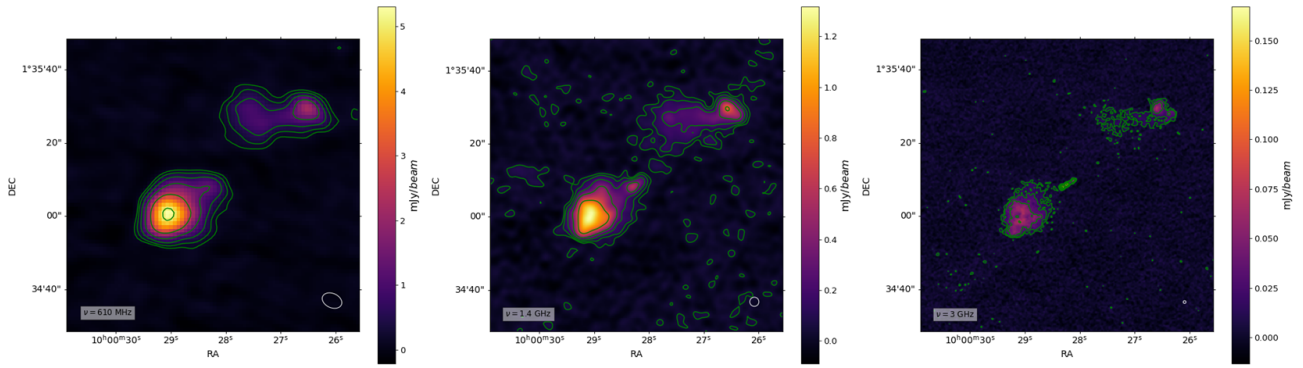
dijagrama mogli bismo zaključiti da radiogalaksija 10935 ne pripada jatu.

S druge strane, promotrimo li rendgensko zračenje (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije 10935 (slika 5.51, desno), vidimo da neposredno oko radiogalaksije nema vidljivo izraženog rendgenskog zračenja, dok u široj okolini vidimo veći broj maksimuma i široka područja rendgenskog zračenja. Na temelju kontura galaktičkih jata (krugovi) vidimo da oko radiogalaksije 10935 nema galaktičkog jata, dok su ona vidljiva u široj okolini i obuhvaćaju neka od područja rendgenskog zračenja vidljiva na dijagramu. Na temelju dijagrama na slici 5.34 možemo zaključiti da je radiogalaksija 10935 vjerojatno izolirana galaksija.

5.18 Radiogalaksija 10936

Radiogalaksija 10936 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.839$. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR II izvor koji zbog efekta projekcije oblaka na ravninu neba ima različite oblike dvaju oblaka, što je vidljivo na slici 5.52, gdje možemo vidjeti i središnju jezgru radiogalaksije.

Na mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10936 (slika 5.53, gore lijevo)

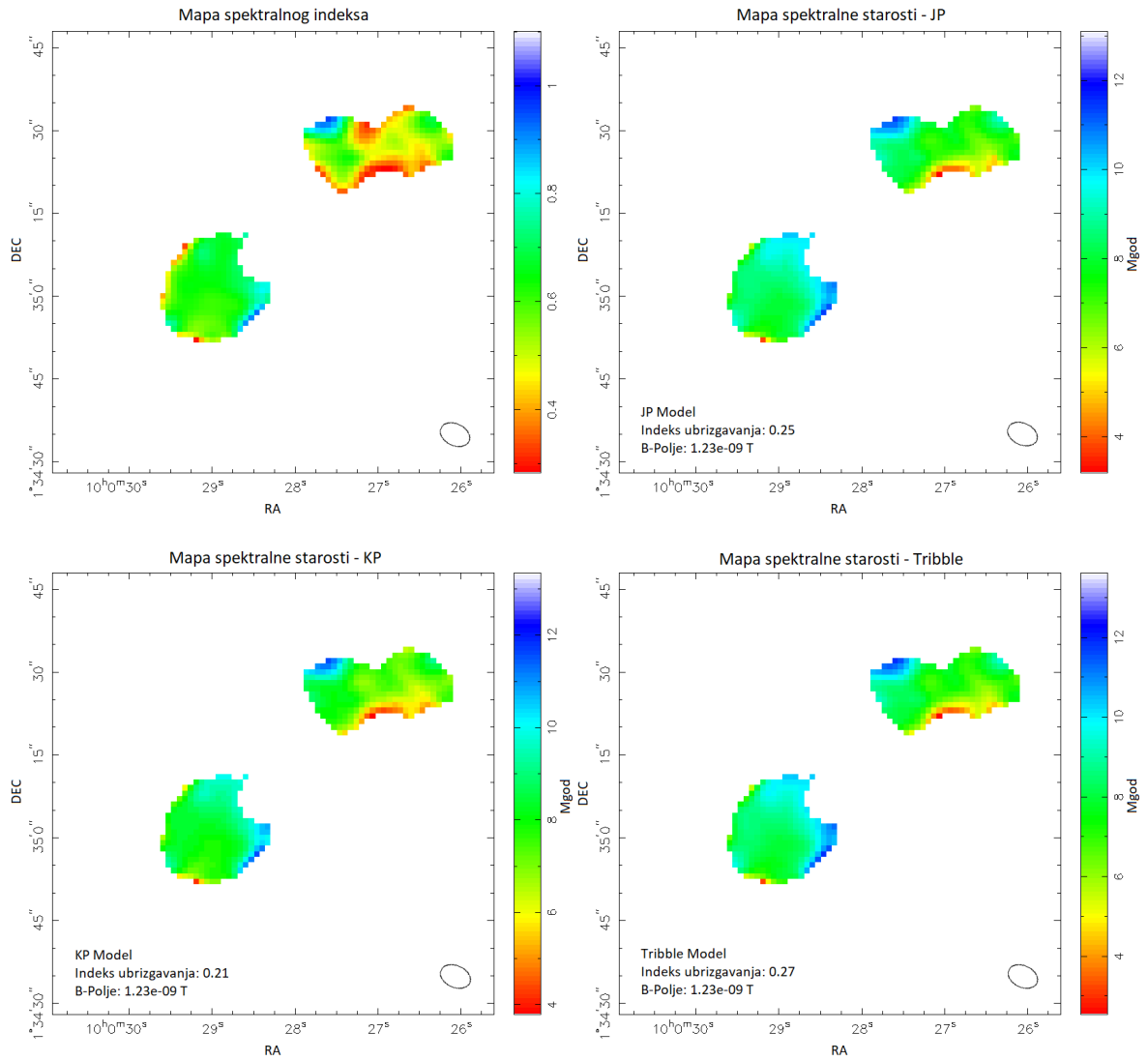


Slika 5.52: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10936 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 2, 3, 4, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

veliki dio područja sjevernog oblaka ima ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$). Najravniji spektar zračenja ($\alpha < 0.5$) vidimo uz rubne dijelove sjevernog oblaka i dijelove unutrašnjosti poput područja blizu vrha oblaka gdje se možda nalaze vruće točke. Strm spektar zračenja vidljiv je tek u lokaliziranom rubnom području pri dnu sjevernog oblaka. S druge strane, u području južnog oblaka ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) vidljiv je na rubnim dijelovima oblaka i u području vrha oblaka gdje je oblak bio najsjajniji. Udaljavanjem od područja vrha južnog oblaka nagib spektra zračenja raste i do vrijednosti veće od $\alpha > 0.7$ uz desni rub. Minimum i maksimum spektralnog indeksa iznose $\alpha_{\min} = 0.28 \pm 4.49$ i $\alpha_{\max} = 0.96 \pm 4.10$, gdje ponovno vidimo veliku nepouzdanost. Srednja vrijednost spektralnog indeksa oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.58$, što je na granici između ravnog i strmog spektra zračenja.

Za radiogalaksiju 10936 procijenili smo prosječni iznos magnetskog polja u oblacima od $B = 1.23 \text{ nT}$. Za dano magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.25$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.21$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.27$ za tri modela spektralne starosti. Vidimo da su sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja ispod minimuma spektralnog indeksa, ali ipak blizu minimuma, što je očekivan rezultat.

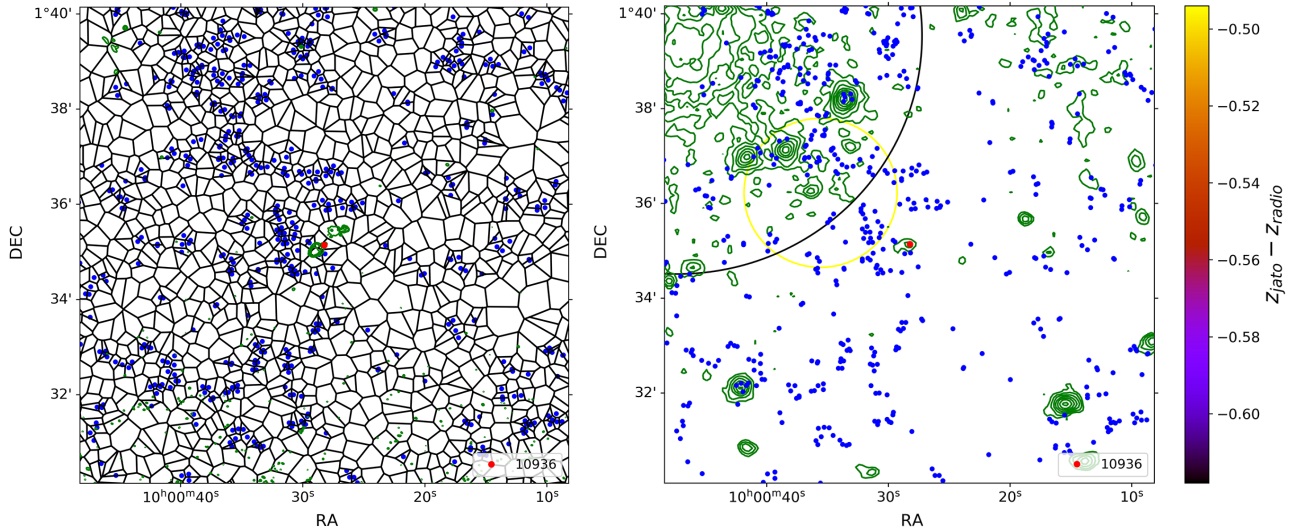
Prema mapama spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10936 za JP, KP i Tribble model (slika 5.53) vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela najmanju spektralnu starost ima sjeverni oblak, koji je imao i najmanji nagib spektra zračenja. U područjima sjevernog oblaka gdje smo imali ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) vidimo spektralnu



Slika 5.53: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10936. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10936. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.23	0.25	$3.19^{+4.08}_{-3.19}$	$11.40^{+2.04}_{-1.75}$
KP		0.21	$3.79^{+3.31}_{-3.79}$	$11.61^{+5.32}_{-2.74}$
Tribble		0.27	$2.54^{+4.64}_{-2.54}$	$11.85^{+2.41}_{-2.09}$

Tablica 5.18: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10936, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 5.54: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10936 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.1 i 1.5 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10936 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 40 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10936 (z_{radio}).

starost manju od 7 milijuna godina, gdje uz donji rub iznosi i ispod 5 milijuna godina. U području dna sjevernog oblaka prema središnjoj jezgri vidimo mnogo veću spektralnu starost koja prelazi i 9 milijuna godina na samom rubu. U području južnog oblaka malu spektralnu starost manju od 7 milijuna godina ima tek uz područje vrha oblaka. Udaljavanjem od vrha spektralna starost raste prema rubovima, ali i u smjeru središnje jezgre, gdje plazma ovog FR II izvora ima manju energiju. Prema rezultatima tablice 5.18 minimum spektralne starosti iznosi između 2.5 milijuna godina za Tribble model i 3.8 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti kreće se između 11.4 milijuna godina za JP model i oko 11.9 milijuna godina za Tribble model. Ako uzmemo pogrešku u obzir, maksimum može dosegnuti i vrijednosti do oko 13.4 milijuna godina za JP model ili čak 16.9 milijuna godina za KP model.

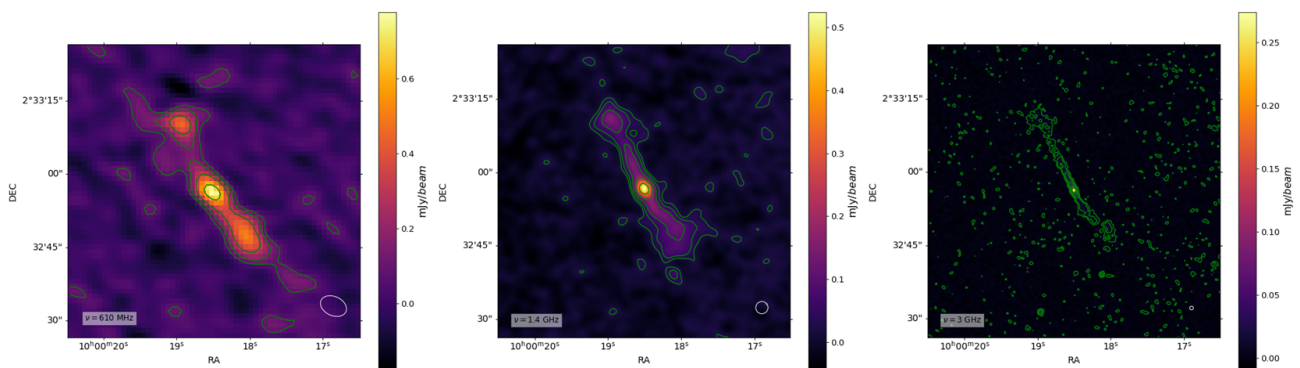
Voronoi dijagram kozmičke okoline radiogalaksije 10936 (slika 5.54, lijevo) pokazuje da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u područje male gustoće naseljenosti. Međutim, s lijeve strane radiogalaksije postoji moguće grupiranje većeg broja galaksija koje upućuju na to da možda u blizini radiogalaksije postoji manja grupa galaksija. Nažalost, samo na temelju Voronoi dijagrama ne možemo sa sigurnošću

potvrditi da u blizini radiogalaksije 10936 stvarno postoji jato, odnosno grupa.

Analizirajući konture rendgenskog zračenja (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije 10936 (slika 5.54, desno), vidimo da izraženo rendgensko zračenje postoji tek u široj okolini radiogalaksije, gdje je najšire područje rendgenskog zračenja vidljivo u gornjem lijevom kutu dijagrama. Neposredno oko radiogalaksije postoji tek neznatno rendgensko zračenje koje dolazi od same radiogalaksije, koja je prema [32] točkasti izvor rendgenskog zračenja. Promotrimo li konture galaktičkih jata (kružgovi), vidimo da široko područje rendgenskog zračenja u gornjem lijevom kutu dijagrama obuhvaća veliko jato galaksija (crni krug), a bliže položaju radiogalaksije i drugo manje jato (žuti krug). Oba jata ne obuhvaćaju radiogalaksiju 10936 i nalaze se na mnogo bližim crvenim pomacima od radiogalaksije. Prema navedenim rezultatima, radiogalaksija 10936 je vjerojatno izolirana galaksija.

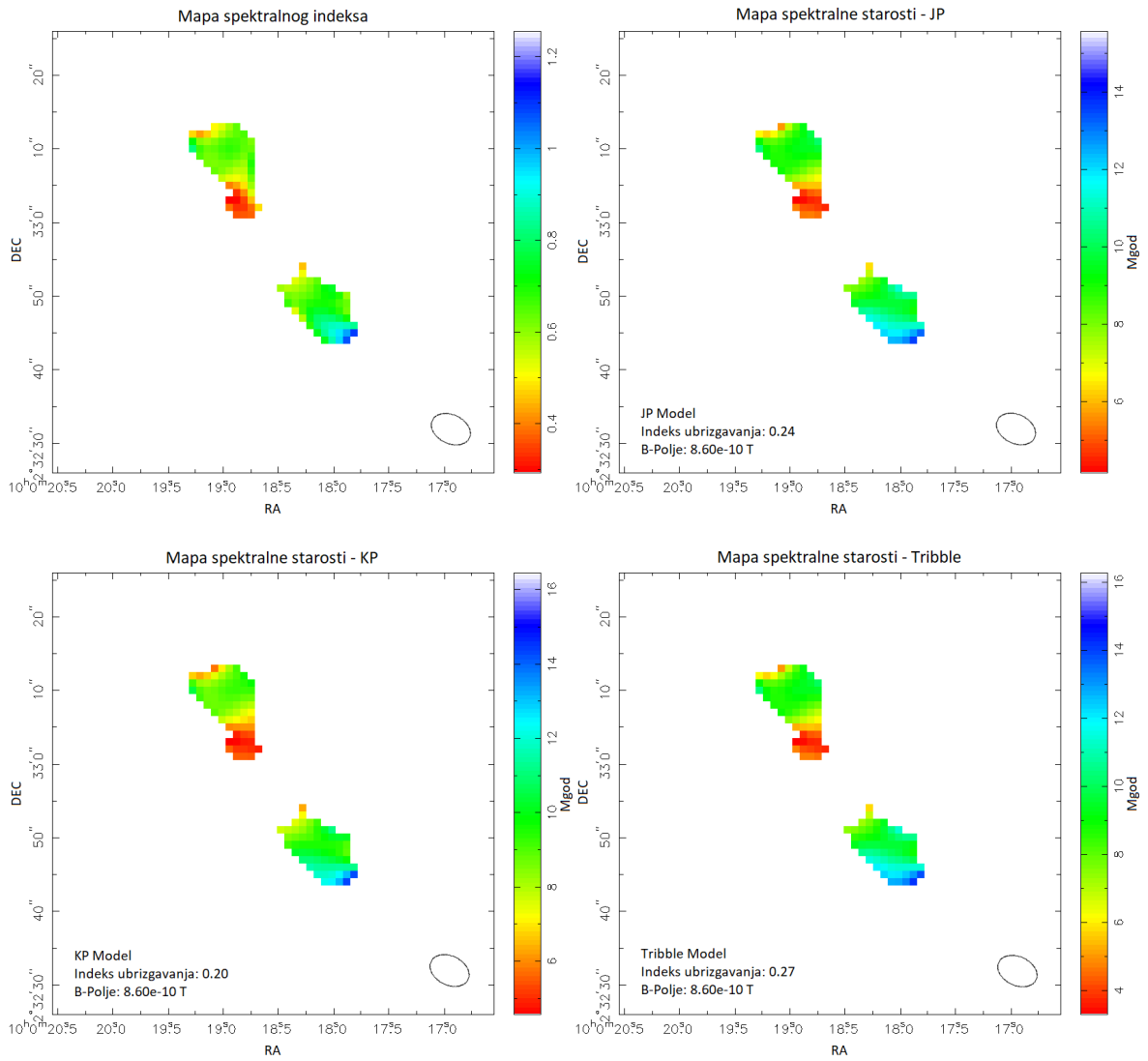
5.19 Radiogalaksija 10953

Radiogalaksija 10953 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.89$. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR I izvor s dva vidljiva mlaza, gdje južni mlaz ima blagu zakrivljenost, što vidimo na slici 5.55.



Slika 5.55: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10953 u jedinicama mJy/beam na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610\text{MHz}} = 0.039 \text{ mJy}/\text{beam}$, $\sigma_{1.4\text{GHz}} = 0.012 \text{ mJy}/\text{beam}$ i $\sigma_{3\text{GHz}} = 0.0023 \text{ mJy}/\text{beam}$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Analizirajući mapu spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10953 (slika 5.56, gore lijevo) vidimo da ravan spektar zračenja ($\alpha < 0.6$) zauzima veći dio sjevernog oblaka, gdje najmanji nagib spektra ($\alpha < 0.4$) vidimo u području dna oblaka prema središnjoj jezgri, gdje se nalazi mlaz. Rezultat je u skladu s očekivanjem jer mlaz ima



Slika 5.56: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10953. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10953. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	0.860	0.24	$4.15^{+4.87}_{-4.15}$	$13.55^{+2.96}_{-2.77}$
KP		0.20	$4.57^{+4.32}_{-4.57}$	$14.31^{+6.74}_{-3.58}$
Tribble		0.27	$3.30^{+5.58}_{-3.30}$	$14.15^{+3.60}_{-3.28}$

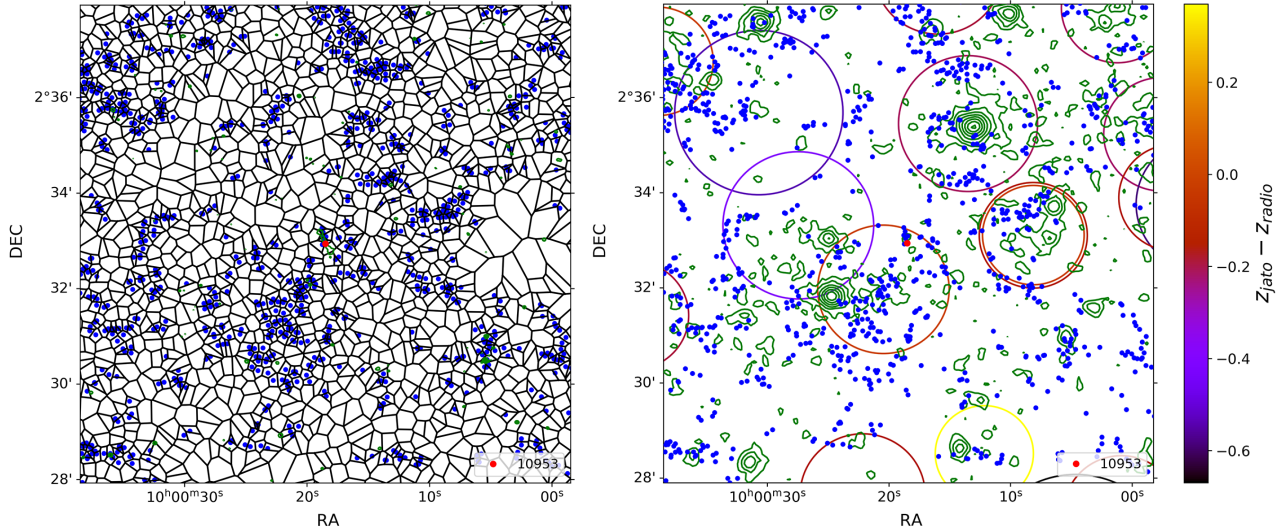
Tablica 5.19: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10953, indeks ubrizgavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.

plazmu velike energije, a time i manje spektralne starosti. Područje južnog oblaka ima strmiji spektar zračenja od sjevernog oblaka, ali ipak vidimo područje ravnog spektra ($\alpha < 0.6$) prema središnjoj jezgri, gdje se nalazi mlaz. Donji rub južnog oblaka ima strm spektar zračenja s nagibom većim i od $\alpha = 0.8$. Rezultati su u skladu s očekivanjem jer za FR I izvore nagib spektra zračenja raste udaljavanjem od središnje jezgre. Minimum i maksimum spektralnog indeksa iznose $\alpha_{min} = 0.29 \pm 5.61$ i $\alpha_{max} = 1.09 \pm 5.31$, gdje vidimo veliku nepouzdanost minimuma i maksimum zbog blizine rubu oblaka, ali i zbog male širine oblaka. Srednja vrijednost spektralnog indeksa oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 0.63$, što odgovara relativno strmom spektru zračenja.

Za radiogalaksiju 10953 procijenili smo iznos prosječnog magnetskog polja u oblacima od $B = 0.86$ nT, što je najmanje magnetsko polje određeno za radiogalaksiju u uzorku. Za ovaj iznos magnetskog polja dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.24$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.20$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.27$ za tri modela spektralne starosti. Sve tri vrijednosti nalaze se ispod minimuma spektralnog indeksa, ali relativno blizu minimumu, što je u skladu s očekivanjem.

Na mapama spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10953 za JP, KP i Tribble model (slika 5.56) vidimo da spektralna starost prati slično ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela najmanju spektralnu starost ima sjeverni oblak, gdje u području dna oblaka na mjestu mlaza spektralna starost iznosi i manje od 6 milijuna godina. Gornja polovica sjevernog oblaka ima veću spektralnu starost koja ne prelazi 10 milijuna godina. Područje južnog oblaka prema središnjoj jezgri ima manju spektralnu starost od ostatka oblaka i to manju od 8 milijuna godina. Približavanjem vrhu južnog oblaka spektralna starost raste i do vrijednosti iznad 11 milijuna godina na rubnim dijelovima. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer energija plazme FR I izvora opada udaljavanjem od središnje jezgre. Prema tablici 5.19 vidimo da se minimum spektralne starosti oblaka kreće između 3.3 milijuna godina za Tribble model i 4.6 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti kreće se između 13.5 milijuna godina za JP model i 14.3 milijuna godina za KP model. Uzevši pogrešku u obzir, maksimum spektralne starosti može doseći vrijednosti do 16.5 ili 21.1 milijuna godina, ovisno o modelu.

Na Voronoi dijagramu kozmičke okoline radiogalaksije 10953 (slika 5.57, lijevo) vidimo da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području velike gustoće naseljenosti. Lijevo ispod položaja radiogalaksije 10953 postoji grupiranje većeg broja ga-



Slika 5.57: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10953 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.05 i 3 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10953 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 2 i 110 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10953 (z_{radio}).

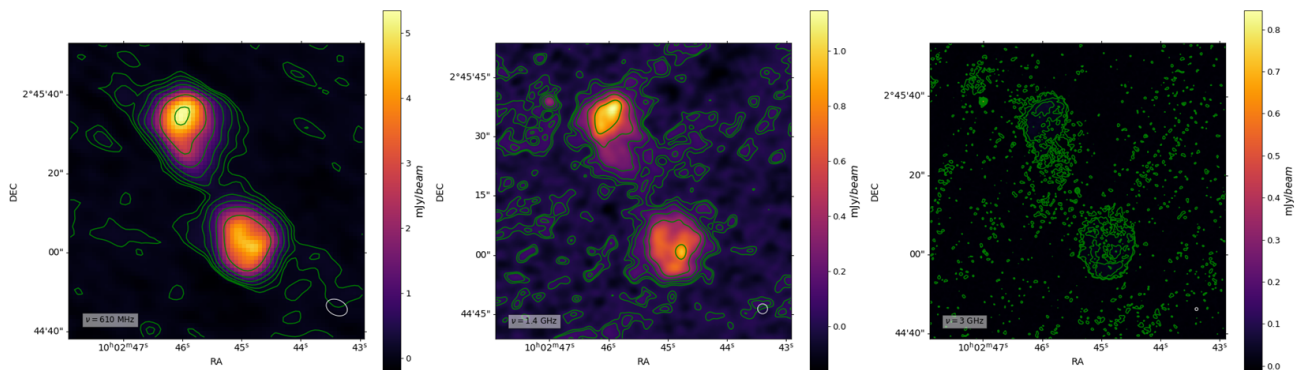
laksija, što upućuje na to da u blizini radiogalaksije postoji galaktičko jato. Također, u široj okolini radiogalaksije na Voronoi dijagramu vidimo grupiranja galaksija koja mogu, ali ne nužno, činiti drugo jato.

Promotrimo li rendgensko zračenje (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije (slika 5.57, desno), u ovom području neba postoji više snažnih maksimuma rendgenskog zračenja. U području grupe galaksija ispod radiogalaksije 10953 vidljivo je područje rendgenskog zračenja koje obuhvaća dio grupiranih galaksija, a vidljiv je i snažan maksimum lijevo od ove grupe koji ne mora nužno biti povezan s ovom grupom. Analizirajući konture galaktičkih jata (krugovi), vidimo da postoji veliki broj galaktičkih jata u ovom području neba koji obuhvaćaju većinu vidljivog rendgenskog zračenja. Također, vidimo da postoji i jedno jato (centralni narančasti krug) koje obuhvaća ne samo grupu galaksija ispod radiogalaksije 10953, nego i samu radiogalaksiju. Crveni pomak ovog jata iznosi $z_{jato} = 0.889$, što je za samo $\Delta z = 0.001$ bliže od crvenog pomaka radiogalaksije 10953, a masa mu prema [21] iznosi $M_{200} = 7.4 \times 10^{13} M_{\odot}$, što odgovara masi grupe galaksija. Na temelju dijagrama na slici 5.38 možemo zaključiti da je radiogalaksija 10953 dio galaktičke grupe, no zbog vizualnog položaja

u odnosu na centar grupe, vjerojatno se radi o rubnoj galaksiji. Prethodno navedeni rezultati kozmičke okoline radiogalaksije 10953 u skladu su s rezultatima kozmičke okoline ove radiogalaksije dobivenima u [24].

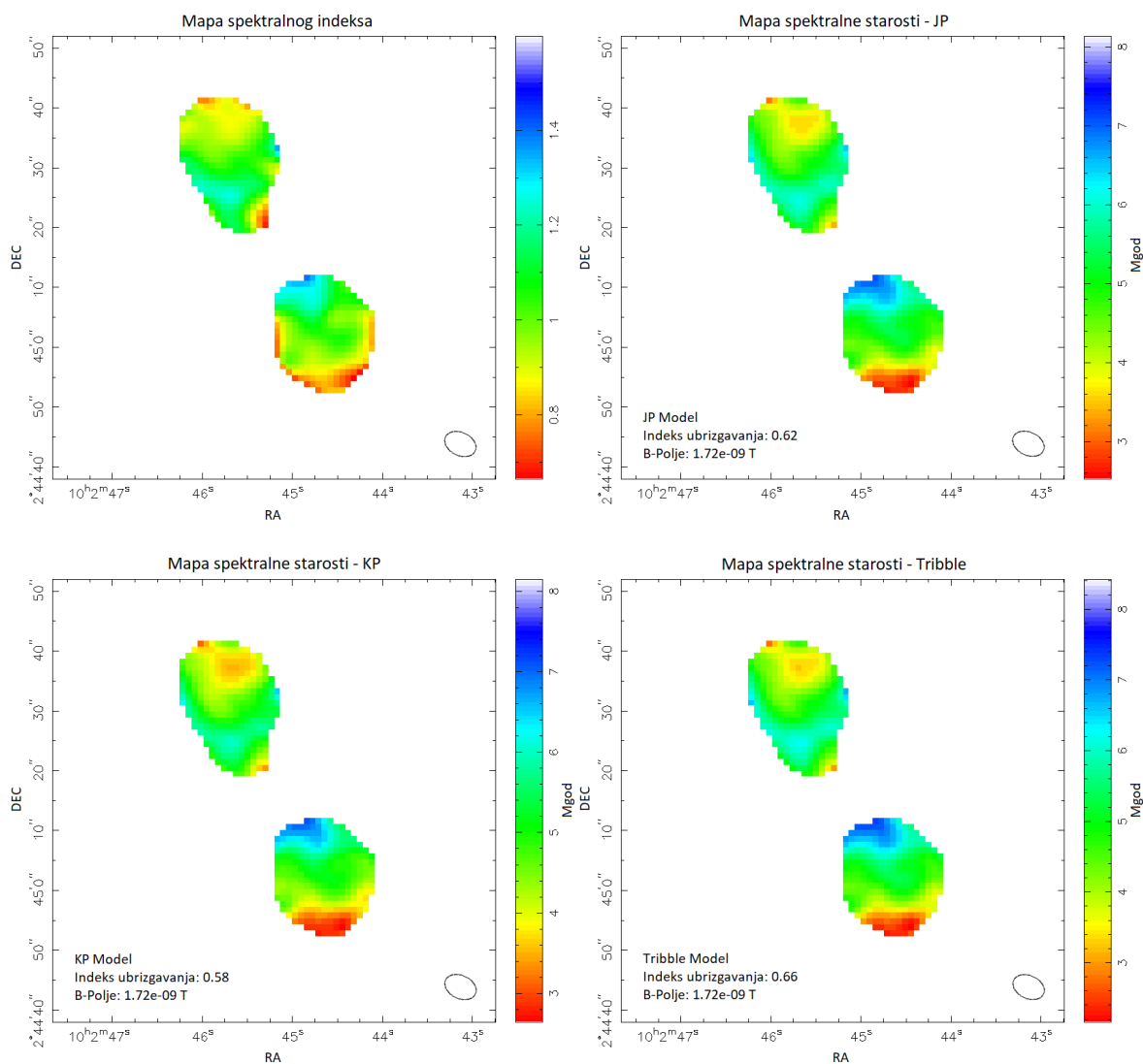
5.20 Radiogalaksija 10959

Radiogalaksija 10959 nalazi se na crvenom pomaku od $z_{radio} = 0.986$. Prema [36] ova je radiogalaksija klasificirana kao FR II izvor kojem se vidi i središnja jezgra na 3GHz. Lijevo od sjevernog oblaka postoji snažan točkasti izvor radiozračenja koji dominira na 3 GHz u usporedbi s radiozračenjem radiogalaksije, pa zbog kontrasta u sjaju na 3 GHz slabije vidimo oblake, kao i središnju jezgru (slika 5.58).



Slika 5.58: Gustoća toka zračenja radiogalaksije 10959 u jedinicama $mJy/beam$ na frekvencijama od 610 MHz (lijevo), 1.4 GHz (sredina) i 3 GHz (desno) s označenim konturama radiozračenja (zeleno) vrijednosti $2^n \times \sigma_\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$, pri čemu su $\sigma_{610MHz} = 0.039 mJy/beam$, $\sigma_{1.4GHz} = 0.012 mJy/beam$ i $\sigma_{3GHz} = 0.0023 mJy/beam$ osjetljivosti promatranja na danim frekvencijama. Bijeli kružić/elipsa u donjem desnom kutu slike odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

Na mapi spektralnog indeksa oblaka radiogalaksije 10959 (slika 5.59, gore lijevo) vidimo da cijelo područje oba oblaka ima strm spektar zračenja ($\alpha > 0.6$). Manje strmiji spektar zračenja ($\alpha < 0.9$) vidimo u području vrha južnog oblaka, gdje je oblak bio najsjajniji. Približavanjem dnu južnog oblaka u smjeru središnje jezgre nagib spektra raste do velikih vrijednosti i iznad $\alpha = 1.2$ na samom rubu. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem budući da kod FR II izvora energija plazme oblaka opada od vrha oblaka prema središnjoj jezgri. Sličnu situaciju imamo i kod sjevernog oblaka radiogalaksije. Područje vrha sjevernog oblaka, gdje je oblak najsjajniji (slika A.10, desno), najvjerojatnije zbog vrućih točaka, ima manje strmi spektar zračenja ($\alpha < 0.9$) od područja prema središnjoj jezgri. Na dnu sjevernog oblaka blizu položaja središnje jezgre vidimo tek malo lokalizirano područje koje također ima manje strmi



Slika 5.59: Gornji red: mapa spektralnog indeksa (lijevo) dobivena korištenjem izraza (4.1) uzimajući tri frekvencije i mapa spektralne starosti za JP model (desno) radiogalaksije 10953. Donji red: Mapa spektralne starosti za KP model (lijevo) i mapa spektralne starosti za Tribble model (desno) radiogalaksije 10953. Elipsa u donjem desnom kutu mapa odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

model	B [nT]	α_{inj}	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
JP	1.72	0.62	$2.53^{+1.72}_{-2.53}$	$7.07^{+1.80}_{-1.40}$
KP		0.58	$2.64^{+1.50}_{-2.19}$	$7.09^{+3.15}_{-1.50}$
Tribble		0.66	$2.16^{+1.96}_{-2.16}$	$7.33^{+2.33}_{-1.62}$

Tablica 5.20: Prosječno magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije 10959, indeks ubrzigavanja α_{inj} te minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost u milijunima godina (Mgod) za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.

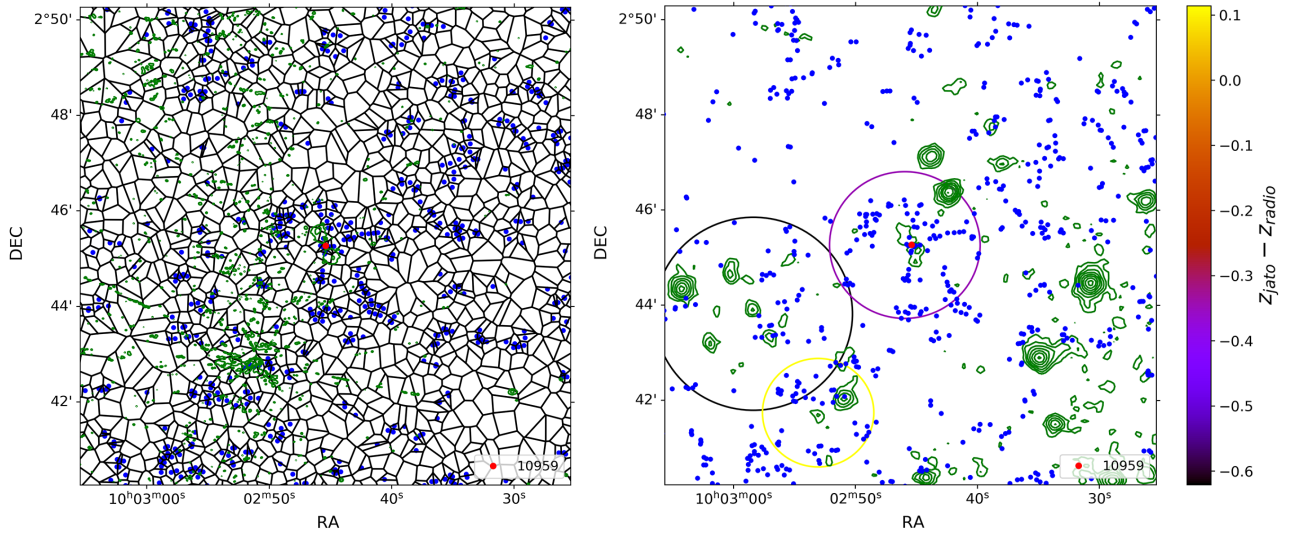
spektar. Minimum i maksimum spektralnog indeksa oblaka iznose $\alpha_{min} = 0.67 \pm 3.19$ i $\alpha_{max} = 1.39 \pm 3.77$. Srednji spektralni indeks oblaka iznosi $\bar{\alpha} = 1.01$, što odgovara najstrmijem spektru zračenja oblaka radiogalaksije u uzorku.

Za radiogalaksiju 10959 procijenili smo prosječno magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B_{1.72}$ nT. Za dano magnetsko polje dobili smo indekse ubrizgavanja $\alpha_{inj}(\text{JP}) = 0.62$, $\alpha_{inj}(\text{KP}) = 0.58$ i $\alpha_{inj}(\text{Tribble}) = 0.66$ za tri modela spektralne starosti. Vidimo da su sve tri vrijednosti indeksa ubrizgavanja manje od minimuma spektralnog indeksa, ali blizu samom minimumu, što i očekujemo.

Analizirajući mape spektralne starosti oblaka radiogalaksije 10959 (slika 5.59) vidimo da spektralna starost približno prati ponašanje spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem. Za sva tri modela južni oblak ima najmanju spektralnu starost manju od 4 milijuna godina uz područje vrha oblaka. Udaljavanjem od vrha južnog oblaka spektralna starost raste u smjeru središnje jezgre i do vrijednosti iznad 6 milijuna godina blizu ruba oblaka. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanim porastom spektralne starosti udaljavanjem od vrha oblaka FR II izvora. U području sjevernog oblaka vidimo slično ponašanje spektralne starosti. Područje vrha sjevernog oblaka, gdje se možda nalazi vruća točka, ima spektralnu starost manju od 4 milijuna godina za sva tri modela, a na dnu oblaka u blizini središnje jezgre vidljivo je malo lokalizirano područje gdje spektralna starost također iznosi manje od 4 milijuna godina. Udaljavanjem od vrha sjevernog oblaka spektralna starost raste, što je bio slučaj i kod južnog oblaka. Prema tablici 5.20 minimum spektralne starosti kreće se između 2.16 milijuna godina za Tribble model i 2.64 milijuna godina za KP model. Maksimum spektralne starosti oblaka kreće se između 7.07 milijuna godina za JP model i 7.33 milijuna godina za Tribble model. Uzevši pogrešku u obzir, maksimum spektralne starosti može doseći vrijednosti do 8.9 ili 10.2 milijuna godina, ovisno o modelu.

Voronoi dijagram kozmičke okoline radiogalaksije 10959 (slika 5.60, lijevo) pokazuje da se radiogalaksija (crvena točka) nalazi u području velike gustoće naseljenosti. U široj okolini radiogalaksije nema izraženog grupiranja galaksija kao u slučaju neposredno oko radiogalaksije. Nažalost, na temelju samo Voronoi dijagrama ne možemo sa sigurnošću potvrditi da grupa galaksija oko radiogalaksije stvarno čini jato.

Promotrimo li rendgensko zračenje (zeleno) na dijagramu iste okoline radiogalaksije 10959 (slika 5.60, desno), vidimo da u okolini radiogalaksije postoji veliki broj maksimuma rendgenskog zračenja. Neposredno oko radiogalaksije postoji malo po-



Slika 5.60: Lijevo: Voronoi dijagram okoline radiogalaksije 10959 (crvena točka) s označenim položajima galaksija (plave točke), čija je gustoća veća od $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$, i konturama radiozračenja (zeleno) na 1.4 GHz u logaritamskoj skali između 0.1 i 40 mJy/beam. Desno: dijagram iste okoline radiogalaksije 10959 s konturama rendgenskog zračenja (zeleno), konvoluiranog Gausovim kernelom širine 8", u logaritamskoj skali između 1.8 i 50 cnt/s. Na istom dijagramu označene su veličine jata galaksija (krugovi) radijusa R_{200} , gdje boja konture jata označava razliku crvenih pomaka jata (z_{jato}) i radiogalaksije 10959 (z_{radio}).

druče rendgenskog zračenja, gdje dio tog zračenja možda pripada oblacima radiogalaksije ako usporedimo položaj rendgenskog zračenja i konture radiozračenja (zeleno) radiogalaksije na Voronoi dijagramu. Analiziramo li konture galaktičkih jata (krugovi), vidimo da postoji jedna grupa (ljubičasti krug) mase $M_{200} = 5.74 \times 10^{13} M_{\odot}$ [21] koja okružuje radiogalaksiju 10959. Crveni pomak ove grupe iznosi $z_{jato} = 0.64$, što je za $\Delta z = 0.346$ bliže od crvenog pomaka radiogalaksije 10959, a što je velika razlika da bi mogli reći da radiogalaksija 10959 pripada toj grupi. Prema navedenim rezultatima radiogalaksija 10959 je vjerojatno izolirana galaksija.

6 Rasprava

Odabrani uzorak radiogalaksija u polju COSMOS sadrži dvadeset radiogalaksija, što je dovoljno veliki uzorak za provođenje statističke analize. Međutim, na izbor radiogalaksija u našem uzorku veliki utjecaj imala je loša razlučivost podataka na frekvenciji od 610 MHz. Zbog loše razlučivosti morali smo se ograničiti na radiogalaksije veće kutne veličine, kod kojih barem malo prepoznamo strukturu. Također, zbog loše razlučivosti podataka na ostalim dostupnim frekvencijama (npr. 325 MHz) i zbog nedostatka mjerenja na frekvencijama različitim od onih u ovom radu bili smo prisiljeni koristiti samo tri frekvencije za analizu radiozračenja, gdje je najveća frekvencija iznosila 3 GHz.

6.1 Spektralni indeks

U poglavlju 5 vidjeli smo ponašanje spektralnog indeksa u oblacima pojedinih FR I i FR II radiogalaksija. Kod četiri FR I radiogalaksija od ukupno pet u našem uzorku spektar zračenja ima manji nagib u području oblaka blizu središnje jezgre, dok je prema kraju oblaka spektar strmiji. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer kod FR I izvora imamo lošu efikasnost prijenosa energije mlazovima do vrha oblaka pa energija plazme opada od područja uz središnju jezgru prema završetku oblaka. Odstupanje od ovog trenda za FR I radiogalaksije opazili smo kod radiogalaksije 187, kod koje je ravniji spektar zračenja bio u području vrhova oblaka. Na frekvenciji od 3 GHz (slika 5.7) radiogalaksija 187 najsjajnije je uz središnju jezgru, međutim na frekvencijama od 610 MHz i 1.4 GHz najsjajnije područje bilo je uz vrhove oblaka, što upućuje na to da je odstupanje možda rezultat loše razlučivosti slika.

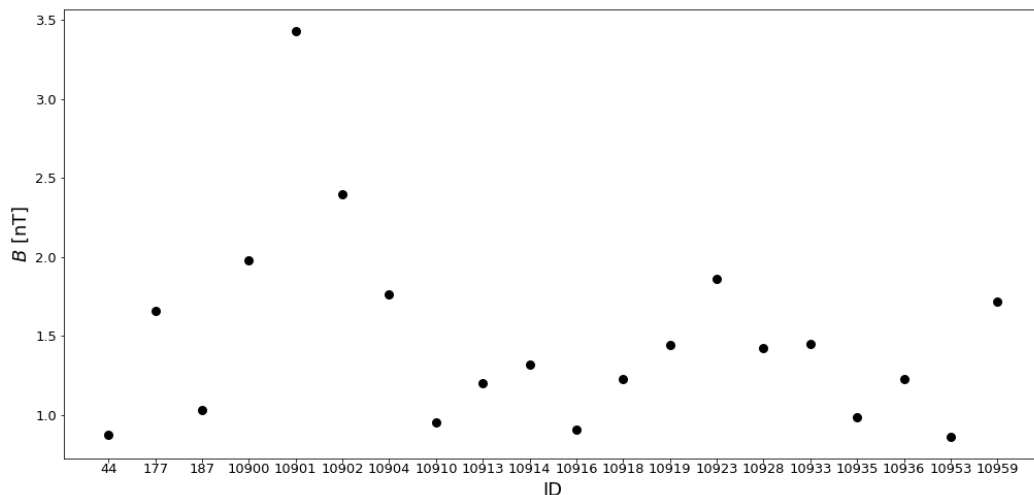
Kod FR II radiogalaksija općenito smo imali da spektar zračenja oblaka ima manji nagib pri vrhu oblaka, ali i u područjima gdje je oblak bio sjajniji, pogotovo u području mlazova i vrućih točaka. Udaljavanjem od ovih područja imali smo povećanje nagiba spektra zračenja. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer se kod FR II izvora područja plazme najveće energije nalaze u područjima pri vrhu oblaka, pogotovo u vrućim točkama, ali i u području mlazova. Kako plazma napušta područje vrha oblaka, tj. kraj mlazova, njezina energija opada i spektar sinkrotronskog zračenja plazme postaje strmiji. Vidljivo veće odstupanje od očekivanja bio je spektralni indeks sjevernog oblaka radiogalaksije 10910, gdje je područje desnog dna oblaka, koje

sadrži plazmu manje energije, imalo mnogo ravniji spektar zračenja od područja gdje je završavao mlaz. Ovaj rezultat najvjerojatnije je posljedica loše razlučivosti slika, ali i činjenice da smo koristili samo tri frekvencije za spektralnu analizu.

U rezultatima smo dobili izrazito veliku nepouzdanost minimuma i maksimuma spektralnog indeksa. Područja minimuma i maksimuma nalazila su se blizu ruba oblaka pa je softver BRATS tim područjima pridjelio manju statističku težinu, što je prema relaciji (4.2) rezultiralo većom pogreškom. Međutim, to ne mora biti jedini razlog. Uz blizinu ruba oblaka, uzrok velike pogreške je najvjerojatnije i činjenica da koristimo samo tri frekvencije za spektralnu analizu, što je nedovoljno veliki broj frekvencija da bi dobili pouzdaniji rezultat spektralnog indeksa.

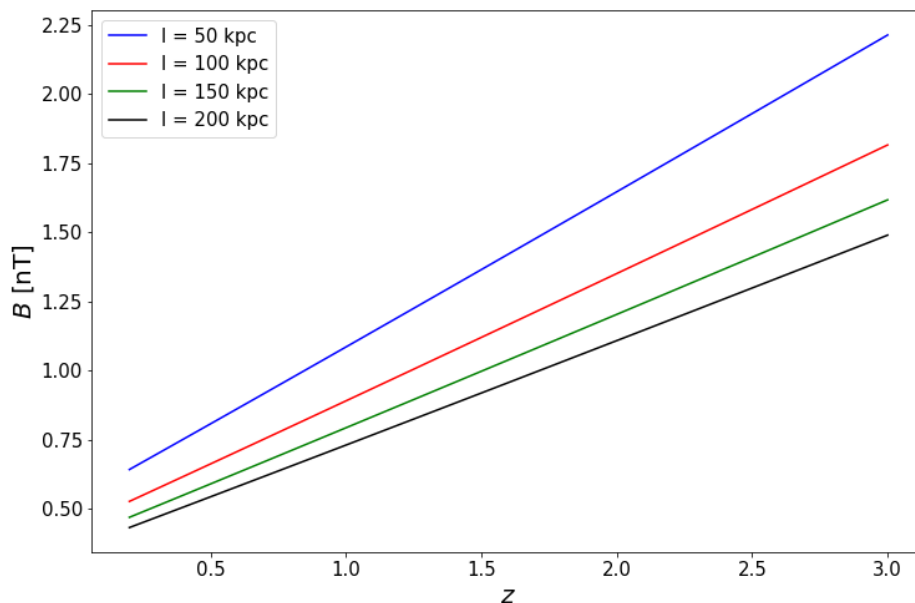
6.2 Magnetsko polje u oblacima radiogalaksije

Kod procjene magnetskog polja u oblacima radiogalaksije dobili smo da je prosječno magnetsko polje u oblacima većine radiogalaksija u odabranom uzorku bilo između 0.86 i 1.46 nT, što je u skladu s tipičnom pretpostavljenom vrijednošću magnetskog polja od 1 nT [17]. Na rezultat magnetskog polje (slika 6.1) veliki su utjecaj imali



Slika 6.1: Prosječno magnetsko polje B u oblacima odabranog uzorka radiogalaksija (ID) dobiveno korištenjem relacije (4.3).

crveni pomak radiogalaksije z i širina njegovog oblaka l , gdje prema relaciji (4.3) radiogalaksije s uskim oblacima i vrlo velikim crvenim pomakom imaju jače magnetsko polje. Na slici 6.2 vidimo kako se magnetsko polje B u oblacima radiogalaksije, koja ima gustoću toka zračenja $F_0 = 5$ mJy, ponaša za različite crvene pomake z i različite širine oblaka l prema relaciji (4.3), držeći pritom sve ostale parametre konstantnim.



Slika 6.2: Ovisnost magnetskog polja B [nT] u oblacima radiogalaksije o crvenom pomaku z između 0.2 i 3 dobivena relacijom (4.3) za širine oblaka l u iznosima od 50, 100, 150 i 200 kpc koristeći vrijednosti parametara $\alpha = 0.6$, $\Theta_x = \Theta_y = 2.5''$, $\nu_0 = 1.4\text{GHz}$, $F_0 = 5\text{ mJy}$, $\nu_1 = 10\text{ MHz}$ i $\nu_2 = 100\text{ GHz}$.

Na dijagramu opažamo da magnetsko polje raste porastom crvenog pomaka za istu širinu oblaka, ali raste i smanjenjem širine oblaka za isti crveni pomak. Najbolji primjer takve ovisnosti je radiogalaksija 10901. S druge strane, na iznos magnetskog polja utjecala je i vrijednost ukupne gustoće toka zračenja F_0 , gdje je veća vrijednost gustoće toka zračenja imala za posljedicu jače magnetsko polje, za što je najbolji primjer radiogalaksija 10902. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem jer jače magnetsko polje ubrzava plazmu do većih energija pa ona više zrači.

6.3 Indeks ubrizgavanja

Nadalje, sva tri korištena modela spektralne starosti dala su sličan rezultat indeksa ubrizgavanja za sve radiogalaksije u uzorku. Dobiveni indeksi ubrizgavanja imali su vrijednosti blizu minimuma spektralnog indeksa, što je u skladu s očekivanjem jer indeks ubrizgavanja opisuje nagib spektra zračenja u području plazme najveće energije, stoga očekujemo da indeks ubrizgavanja bude bliže minimumu spektralnog indeksa. Većina radiogalaksija imala je indeks ubrizgavanja unutar intervala ili oko minimuma spektralnog indeksa. Kod malog broja radiogalaksija dobili smo indeks ubrizgavanja manji od minimuma spektralnog indeksa, a ponegdje i za 0.1 ili više manji. Primjer je radiogalaksija 187, gdje su sva tri modela dala mnogo manji indeks

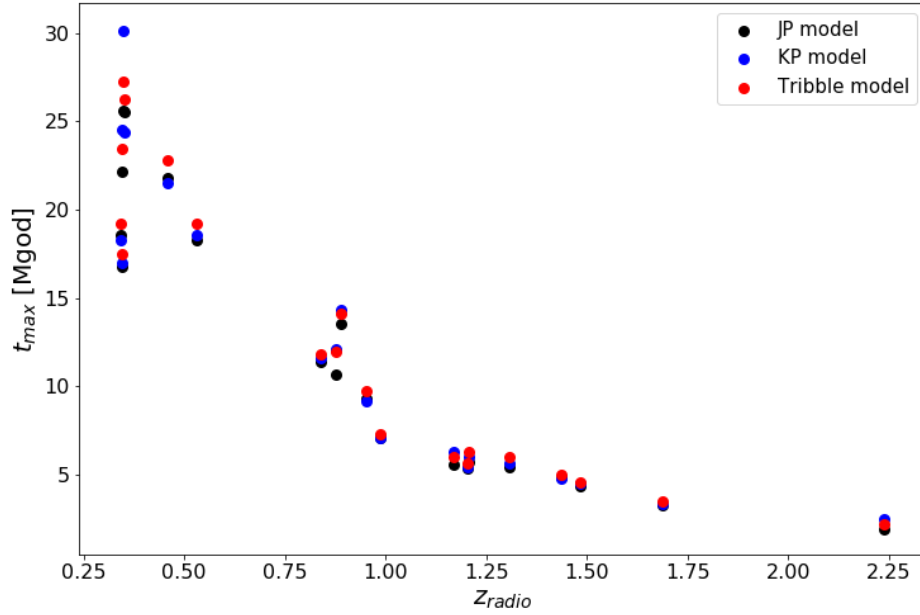
ubrizgavanja. Jedan od mogućih razloga ovog rezultata je možda konvolucija slika odlične razlučivosti na lošu razlučivost, što zamućuje područje izraženog zračenja i čini ga spektralno starijim. Drugi razlog može biti korištenje samo tri frekvencije, što može rezultirati velikim odstupanjem gustoće toka zračenja na danim frekvencijama od teorijske krivulje dobivene prilagodbom modela.

Prema rezultatima u literaturi, tipične vrijednosti indeksa ubrizgavanja iznose između 0.5 i 0.8 [2]. Ovaj trend indeksa ubrizgavanja prate radiogalaksije 10923 i 10959 te približno radiogalaksija 10919. Ostale radiogalaksije u uzorku imaju manji indeks ubrizgavanja. Razlozi takvom rezultatu mogu biti loša razlučivost i korištenje samo tri frekvencije za spektralnu analizu, no to ne mora nužno biti tako. Naime, u opažanjima snažnih radiogalaksija na niskim radiofrekvencijama opaženo je da indeks ubrizgavanja može poprimiti vrijednosti i manje od 0.5, npr. 0.38 [13].

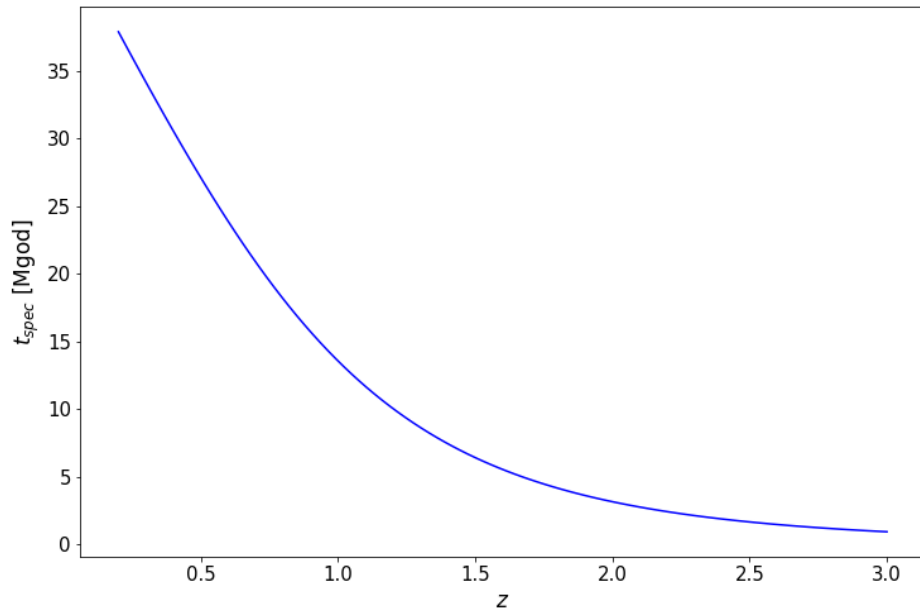
6.4 Spektralna starost radiogalaksije

Mape spektralne starosti za JP, KP i Tribble model pokazuju ponašanje spektralne starosti oblaka radiogalaksija koje u većini slučajeva dobro prati ponašanje spektralnog indeksa. Ovaj rezultat u skladu je s očekivanjem i teorijskim krivuljama na slici 4.1. Naime, područja oblaka koja imaju plazmu male energije manje zrače pa očekujemo da je spektralna starost takve plazme veća. Kod rezultata spektralnog indeksa vidjeli smo da u području plazme male energije imamo veći nagib spektra zračenja, što znači da područja većeg spektralnog indeksa imaju veću spektralnu starost i obrnuto, što smo i dobili kao rezultat.

Kod radiogalaksija u uzorku dobili smo da je maksimalna spektralna starost općenito manja za radiogalaksije na velikim crvenim pomacima. Takvo ponašanje možemo vidjeti na slici 6.3 koja prikazuje dijagram ovisnosti maksimuma spektralne starosti t_{max} radiogalaksija o crvenom pomaku z_{radio} za tri modela spektralne starosti. Ovaj rezultat u skladu je s teorijskom relacijom (1.13) za spektralnu starost, gdje je ovisnost crvenog pomaka u relaciji (1.13) osim u faktoru $(1+z)^{-1/2}$ dana i u magnetskom polju kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja B_{CMB} . Za veći crveni pomak z imamo jače magnetsko polje B_{CMB} , a time i manju spektralnu starost ako sve ostale parametre držimo konstantnim. Ovisnost spektralne starosti t_{spec} o crvenom pomaku z radiogalaksije najbolje vidimo na slici 6.4, gdje opažamo da po-



Slika 6.3: Ovisnost maksimuma spektralne starosti t_{max} radiogalaksija u milijunima godina (Mgod) o njihovom crvenom pomaku z_{radio} za JP, KP i Tribble model spektralne starosti.



Slika 6.4: Ovisnost spektralne starosti t_{spec} radiogalaksija u milijunima godina (Mgod) o crvenom pomaku z između 0.2 i 3 dobivena relacijom (1.13) za magnetsko polje u oblacima u iznosu od $B = 1$ nT i frekvenciju prekida u sustavu opažaća od $\nu_b = 1$ GHz.

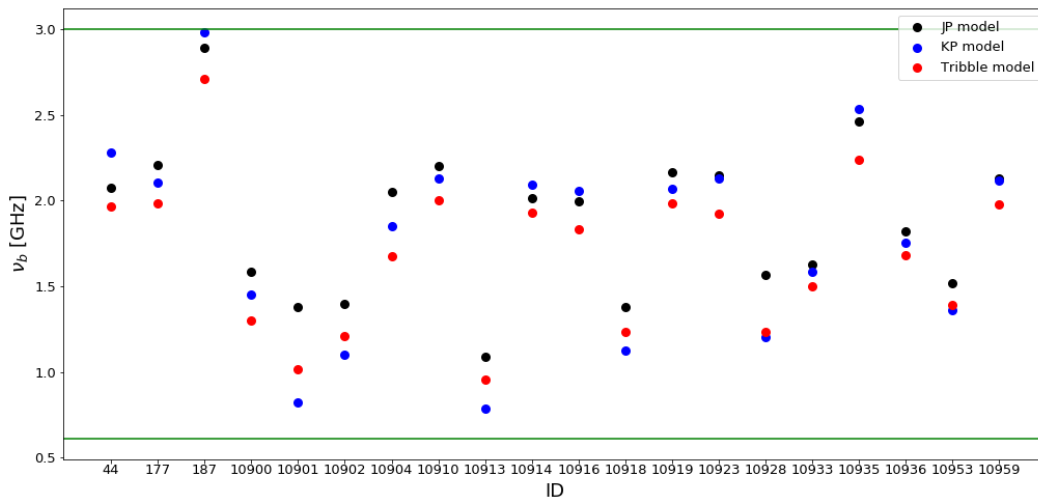
rastom crvenog pomaka opada spektralna starost radiogalaksije za dano magnetsko polje B i frekvenciju prekida ν_b (u sustavu opažača). Pad spektralne starosti dominantno dolazi od B_{CMB} , kojeg imamo u relaciji (4.3), jer na većim crvenim pomacima z dolazi do većih sinkrotronskih gubitaka zbog inverzno-Comptonskog zračenja zbog povećane gustoće energije kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja, koja je proporcionalna s B_{CMB}^2 , tj. s $(1+z)^4$ [12]. Naravno, uvijek postoje iznimke koje odstupaju od ovog pravila kao npr. radiogalaksija 10916 na crvenom pomaku $z_{radio} = 0.459$ koja ima veći maksimum spektralne starosti od radiogalaksije 10933 na crvenom pomaku $z_{radio} = 0.346$. Odstupanje od relacije (1.13) može biti rezultat različitih karakteristika radiogalaksija.

Četiri od pet FR I radiogalaksija u uzorku imaju veliku spektralnu starost između 14 i 26 milijuna godina. Rezultat je u skladu s očekivanjem jer FR I izvori imaju oblake plazme mnogo manje energije u odnosu na FR II izvore. Jedino radiogalaksija 177 ima spektralnu starost manju od 4 milijuna godina, no ona se nalazi na velikom crvenom pomaku od $z_{radio} = 1.687$, što je rezultiralo malom starošću. Kod FR II radiogalaksija dobili smo veliki raspon vrijednosti maksimuma spektralne starosti od 2 milijuna godina za najudaljeniju radiogalaksiju 10901 do čak 30 milijuna godina za bližu radiogalaskiju 10913. Naši rezultati pokazuju da najmanju spektralnu starost FR II radiogalaksije imaju u području vrha oblaka gdje završavaju mlazovi i u području mlazova, ako su vidljivi. Najveću spektralnu starost FR II radiogalaksije pokazuju u području dna oblaka prema središnjoj jezgri, gdje se nalazi plazma mnogo manje energije od one uz vrh oblaka, što je u skladu s očekivanjem.

Također, rezultati minimuma spektralne starosti za sva tri modela spektralne starosti za većinu radiogalaksija imali su vrlo veliku pogrešku usporedivu s vrijednošću minimuma. Razlog može biti ili nedovoljna razlučivost spektralne starosti u prilagodbi modela ili možda činjenica da koristimo samo tri frekvencije i slike loše razlučivosti. Budući da se minimum nalazio blizu ruba oblaka, mogli smo već *a priori* očekivati da ćemo dobiti veliku nepouzdanost minimuma spektralne starosti, kao što je bio slučaj kod spektralnog indeksa.

Koristeći relaciju (1.13) uz vrijednost magnetskog polja u oblacima radiogalaksija i vrijednost spektralne starosti dobiven prilagodbom JP, KP i Tribble modela možemo dobiti vrijednost frekvencije prekida ν_b u sustavu opažača za pojedinu radiogalaksiju u uzorku, što je prikazano na slici 6.5, gdje smo uzeli maksimum spektralne starosti u

izračun čime smo dobili minimalnu frekvenciju prekida unutar radioizvora. Na slici



Slika 6.5: Frekvencija prekida ν_b (GHz) u sutavu opažača pojedine radiogalaksije (ID) u uzorku dobivena relacijom (1.13) za maksimum spektralne starosti t_{max} dobiven prilagodbom JP, KP i Tribble modela spektralne starosti. Zelene horizontalne linije predstavljaju minimalnu frekvenciju od 610 MHz i maksimalnu frekvenciju od 3 GHz korištene u spektralnoj analizi.

6.5 opažamo da se sve frekvencije prekida ν_b za sva tri modela spektralne starosti nalaze unutar intervala frekvencija korištenih u ovom radu za spektralnu analizu. Također, možemo vidjeti da se većina dobivenih frekvencija prekida nalazi između 1.4 i 3 GHz, dok je manji dio ispod 1.4 GHz. Na slici 6.5 mogli bismo izdvojiti radiogalaksiju 187 kod koje vidimo da je frekvencija prekida za maksimum spektralne starosti, tj. minimalna frekvencija prekida, vrlo blizu maksimalne frekvencije od 3 GHz. Činjenica da u analizi nismo imali frekvencije veće od 3 GHz mogla je imati utjecaj na preciznost određivanja frekvencije prekida kod nekih radiogalaksija, kod kojih imamo minimalnu frekvenciju prekida bliže maksimalnoj frekvenciji od 3 GHz, kao što je to slučaj kod radiogalaksije 187, a samim time i spektralne starosti, koja je povezana s frekvencijom prekida relacijom (1.13). Stoga, za precizniju spektralnu analizu potrebno je napraviti opažanja i na frekvencijama iznad 3 GHz kako bismo obuhvatili frekvenciju prekida unutar intervala i mogli dobiti precizniji rezultat spektralne starosti nekog radioizvora.

6.5 Kozmička okolina radiogalaksije

Na temelju dijagrama kozmičke okoline radiogalaksija dobili smo da deset radiogalaksija pripada poznatom galaktičkom jatu ili grupi, kod kojih se radiogalaksije 10914

i 10923 nalaze na rubu grupe galaksija, a koje mogu biti i satelitske galaksije. Postoji mogućnost da su crveni pomaci ove dvije rubne radiogalaksije nedovoljno precizno određeni, budući da su fotometrijski, a ne spektroskopski crveni pomaci, koji su mnogo precizniji od fotometrijskih. To znači da bi radiogalaksije 10914 i 10923 mogle biti bliže unutrašnjosti grupe. Dobili smo da čak četiri od pet FR I radiogalaksija te šest od ukupno petnaest FR II radiogalaksija u uzorku pripada poznatom jatu ili grupi. Preostale radiogalaksije ne pripadaju niti jednom poznatom jatu te se vjerojatno radi o izoliranim galaksijama.

Osim što smo imali izraženo rendgensko zračenje oko radiogalaksija u jatu, odnosno grupi galaksija, za neke radiogalaksije koje se nisu nalazile u jatu ili grupi dobili smo da i oko njih postoji izraženo rendgensko zračenje. Položaj maksimuma takvog rendgenskog zračenja bio je na položaju optičkog središta radiogalaksija, stoga smo zaključili da ove radiogalaksije moraju biti točkasti izvori rendgenskog zračenja, što je bilo u skladu s katalogom [32]. Dva najbolja primjera su radiogalaksije 10900 i 10919, kod kojih se snažan maksimum rendgenskog zračenja nalazi na samom položaju radiogalaksija. Prema intenzitetu rendgenskog zračenja, radiogalaksija 10900 najjači je izvor rendgenskog zračenja od svih radiogalaksija u uzorku.

6.6 Radiogalaksije između $z = 0.34$ i $z = 0.53$

Na crvenim pomacima između 0.34 i 0.53 imamo sedam radiogalaksija u uzorku, gdje je čak šest radiogalaksija (tri FR I i tri FR II radiogalaksije) dio poznatog jata, odnosno grupe galaksija. Unutar ovog intervala crvenog pomaka radiogalaksije imaju najveće spektralne starosti od ostalih radiogalaksija u uzorku, gdje su dvije spektralno najstarije radiogalaksije 44 i 10913 dio istog jata. Za radiogalaksije na ovim crvenim pomacima kao rezultat smo dobili da spektralna starost ne pada strogo s povećanjem crvenog pomaka, već imamo da su i neke bliže radiogalaksij, npr. radiogalaksija 10933 ($z_{radio} = 0.346$), spektralno mlađe od nekih udaljenijih radiogalaksija, npr. radiogalaksija 10910 ($z_{radio} = 0.53$). Radiogalaksija 10916 ($z_{radio} = 0.459$) je posebno zanimljiva jer unutar ovog intervala crvenih pomaka jedina nije dio nekog poznatog jata, ali ima spektralnu starost mnogo veću od nekoliko bližih radiogalaksija u jatu ili grupi.

6.7 Radiogalaksije između $z = 0.83$ i $z = 0.99$

Na crvenim pomacima između 0.83 i 0.99 imamo pet radiogalaksija, gdje samo radiogalaksija 10953 ($z_{radio} = 0.89$) pripada poznatoj grupi galaksija. Ova radiogalaksija je jedina FR I radiogalaksija u našem uzorku unutar ovog intervala crvenih pomaka, ali i spektralno najstarija radiogalaksija sa starošću od oko 14 milijuna godina. Dvije udaljenije izolirane FR II radiogalaksije 10935 ($z_{radio} = 0.954$) i 10959 ($z_{radio} = 0.986$) imaju najmanje spektralne starosti redom oko 9 milijuna godina i oko 7 milijuna godina. Preostale dvije bliže izolirane FR II radiogalaksije 10928 ($z_{radio} = 0.878$) i 10936 ($z_{radio} = 0.839$) imaju veće spektralne starosti od prve dvije FR II radiogalaksije, ali slične vrijednosti oko 12 milijuna godina. Obje ove radiogalaksije zrače približno jednako s ukupnom gustoćom toka zračenja oko 30 mJy na frekvenciji od 1.4 GHz, no radiogalaksija 10928 je udaljenija i ima jače magnetsko polje pa bismo očekivali da bude spektralno mlađa od radiogalaksije 10936. Međutim, radiogalaksija 10928 ima strmiji spektar zračenja u oblacima nego radiogalaksija 10936, što je vjerojatno čini spektralno starijom pa zato dobivamo da obje radiogalaksije imaju sličnu spektralnu starost.

6.8 Radiogalaksije između $z = 1.16$ i $z = 1.49$

Na crvenim pomacima između 1.16 i 1.49 imamo šest radiogalaksija sve FR II tipa, među kojima imamo jednu radiogalaksiju 10902 koja pripada poznatoj grupi galaksija, i dvije rubne radiogalaksije 10914 i 10923. U odnosu na prethodne bliže radiogalaksije, ovih šest FR II radiogalaksija imaju mnogo manju spektralnu starost. Izolirane radiogalaksije 10900 ($z_{radio} = 1.308$) i 10904 ($z_{radio} = 1.206$) imaju spektralnu starost oko 6 milijuna godina, dok radiogalaksija 10919 ($z_{radio} = 1.483$) ima spektralnu starost oko 4.5 milijuna godina. Preostale tri FR II radiogalaksije 10902 ($z_{radio} = 1.168$), 10914 ($z_{radio} = 1.437$) i 10923 ($z_{radio} = 1.203$), koje se nalaze u području grupe galaksija, redom imaju spektralne starosti oko 6, 5 i 5.5 milijuna godina. Iako je radiogalaksija 10902 najbliža od ovih šest radiogalaksija i u centru galaktičke grupe, dobili smo da ima relativno malu spektralnu starost od 6 milijuna godina. Međutim, ova radiogalaksija najjače zrači od svih radiogalaksija u uzorku na 1.4 GHz, s ukupnom gustoćom toka zračenja od 116.5 mJy, što je čini vrlo snažnim FR II izvorom s jakim magnetskim poljem. Budući da radiogalaksija 10902 snažno zrači,

to znači da plazma u oblacima ima mnogo veću energiju od plazme u nekim drugim radiogalaksijama, što za posljedicu ima da je spektralna starost takve radiogalaksije malena. Ovaj rezultat bi mogao značiti da je aktivnost radiogalaksije 10902 započela tek nedavno te da je plazma u oblacima tek u početnoj fazi radijativnih gubitaka.

6.9 Radiogalaksije između $z = 1.6$ i $z = 2.24$

Od prethodno analiziranih radiogalaksija preostale su nam dvije najudaljenije radiogalaksije 177 ($z_{radio} = 1.687$) i 10901 ($z_{radio} = 2.239$), koje se nalaze na crvenim pomacima izvan intervala crvenog pomaka u katalogu jata galaksija [21]. Obje ove vjerojatno izolirane radiogalaksije imaju vrlo malu spektralnu starost, gdje FR I radiogalaksija 177 ima spektralnu starost oko 3.5 milijuna godina, a FR II radiogalaksija 10901 oko 2 milijuna godina. Rezultat spektralne starosti ovih radiogalaksija u skladu je s relacijom (1.13), gdje za vrlo veliku vrijednost crvenog pomaka izvor ima malu spektralnu starost. Također, radiogalaksija 10901 ima vrlo uske oblake s obje strane središnje jezgre, a od jednog do drugog vrha oblaka ima čak 100 lučnih sekundi, što čini ovu radiogalaksiju vrlo snažnim FR II izvorom s jakim magnetskim poljem, najjačim u našem uzorku. Prema strukturi radiogalaksije 10901 i rezultatu spektralne starosti, zaključujemo da je plazma ove radiogalaksije na samom početku radijativnih gubitaka, što bi moglo značiti da je ova radiogalaksija tek nedavno postala aktivna.

7 Zaključak

Tema ovog rada su radiogalaksije u polju COSMOS, za koje nam je cilj bio proučiti ponašanje spektralnog indeksa i spektralne starosti oblaka radiogalaksija te proučiti kozmičku okolinu u kojoj se te radiogalaksije nalaze. Odabirom uzorka radiogalaksija na širokom rasponu crvenih pomaka proučili smo ove karakteristike i kako se one mijenjaju na različitim crvenim pomacima.

Na temelju usporedbe rezultata mapa spektralnog indeksa i spektralne starosti zaključujemo da postoji povezanost između spektralnog indeksa i spektralne starosti, gdje veći spektralni indeks povlači veću spektralnu starost nekog područja unutar izvora. To se najbolje može vidjeti na slici 4.1 za tri modela spektralne starosti, gdje veći nagib ima onaj spektar zračenja koji odgovara većoj spektralnoj starosti. To je zato što spektar zračenja plazme manje energije, odnosno veće spektralne starosti, na višim frekvencijama ima veći nagib. Drugim riječima, kako plazma stari, tako visokofrekventni rep spektra radiozračenja postaje strmiji zbog preferiranog hlađenja visokoenergetske plazme.

Analizirajući ponašanje spektralne starosti oblaka FR I i FR II radiogalaksija zaključujemo da postoji razlika između ove dvije klase radiogalaksija. Naime, kod FR I radiogalaksija spektralna starost općenito raste kako se udaljavamo od područja blizu središnje jezgre, odnosno od unutrašnjih dijelova mlazova, jer mlazovi nemaju dovoljnu efikasnost prijenosa energije do krajeva oblaka. Stoga već u blizini središnje jezgre FR I radiogalaksije započinju radijativni gubitci energije plazme. Kod FR II radiogalaksija najmanju spektralnu starost općenito imaju područja vrhova oblaka, gdje završavaju mlazovi i gdje mogu postojati vruće točke, jer FR II izvori imaju veliku efikasnost prijenosa energije mlazovima do vrhova oblaka, stoga upravo takva područja imaju malu spektralnu starost. Udaljavanjem od područja vrha oblaka FR II izvora spektralna starost raste jer plazma gubi energiju zračenjem.

Uspoređujući spektralnu starost radiogalaksija i njihov crveni pomak, zaključujemo da s velikim porastom crvenog pomaka opada spektralna starost izvora zbog većeg utjecaja kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja, što je u skladu s relacijom (1.13). Naravno, spektralna starost može varirati ovisno o karakteristikama samog radioizvora neovisno o iznosu crvenog pomaka radioizvora.

Na temelju rezultata kozmičke okoline radiogalaksija u uzorku možemo zaključiti

da se radiogalaksije najčešće nalaze u području veće gustoće naseljenosti, uglavnom u području nekog jata ili grupe galaksija, gdje smo dobili da se čak polovica radiogalaksija u uzorku nalazi u poznatom jatu ili grupi. Prema položajima radiogalaksija u odnosu na središte jata ili grupe možemo zaključiti da radiogalaksije mogu biti centralne galaksije ili mogu biti rubne ili čak satelitske galaksije. Vidjeli smo da se ne samo FR I radiogalaksije mogu nalaziti u jatu ili grupi, nego i FR II radiogalaksije također. Na temelju samo dvadeset radiogalaksija teško je zaključiti koja klasa radiogalaksija se češće nalazi u jatu ili grupi, međutim unutar analiziranog uzorka 80 ± 40 % FR I i 40 ± 16 % FR II radiogalaksija dio je nekog jata ili grupe galaksija, što upućuje na to da unutar jata ili grupe češće pronalazimo FR I radiogalaksije.

Budući da se radiogalaksije često nalaze u području jata ili grupe, zaključujemo da one mogu poslužiti kao dobar alat za traženje nekog jata, odnosno grupe galaksija. Koristeći metodu Voronoi teselacije i podatak o rendgenskom zračenju u području neba oko radiogalaksije možemo istražiti postoji li neko grupiranje galaksija u okolini radiogalaksije i ako da, postoji li izraženo rendgensko zračenje u području takve grupe galaksija, što potvrđuje da je takvo rendgensko zračenje emitirano međugalaktičkim plinom koji prožima prostor između galaksija u jatu ili grupi. Međutim, moramo biti pažljivi u slučaju da ne vidimo grupiranje galaksija oko radiogalaksije, a ipak vidimo izraženo rendgensko zračenje. U tom slučaju nemamo jato ili grupu, već rendgensko zračenje emitira sama radiogalaksija.

Uspoređujući spektralne starosti i karakteristike kozmičke okoline radiogalaksija na temelju odabranog uzorka radiogalaksija ne možemo sa sigurnošću zaključiti postoji li utjecaj kozmičke okoline na spektralnu starost oblaka radiogalaksije te na koji način bi ona mogla utjecati na spektralnu starost. Potrebna je detaljnija analiza većeg broja radiogalaksija kako bi se s velikom sigurnošću moglo zaključiti postoji li mogući utjecaj okoline na spektralnu starost radiogalaksije. Pritom je potrebno napraviti spektralnu analizu radiogalaksija na manjim crvenim pomacima na kojima nema velikih sinkrotronskih gubitaka kao na velikim crvenim pomacima, gdje je utjecaj kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja izraženiji.

Na temelju spektralne analize za samo tri frekvencije i analize kozmičke okoline radiogalaksija zaključujemo da su rezultati općenito u skladu s našim očekivanjem i u skladu s rezultatima dobivenim u literaturi. Za dobivena nesleaganja određenih rezultata s literaturom pretpostavljamo da su dva glavna razloga vjerojatno loša

razlučivost podataka i korištenje samo tri frekvencije. Kako bismo smanjili odstupanja i moguće pogreške rezultata, potrebno je korištenje većeg broja frekvencija i podataka bolje razlučivosti. Također, zaključujemo da je na svim frekvencijama potrebno raditi opažanja s istom ili sličnom razlučivosti jer ako je razlika razlučivosti na različitim frekvencija velika, konvolucija na jednaku razlučivost uzrokuje veliki gubitak informacija o zračenju izvora.

Za nastavak ovog istraživanja potrebno je napraviti nova opažanja radiogalaksija u polju COSMOS za veći broj različitih frekvencija, pogotovo za frekvencije za koja još nisu rađena opažanja (npr. 5 ili 6 i 10 GHz), s visokom razlučivosti poput one na 3 GHz ili do razlučivosti opažanja na 1.4 GHz. Visoka razlučivost omogućila bi odabir uzorka mnogo većeg broja radiogalaksija, ali i odabir radiogalaksija male kutne veličine, što je bilo nemoguće u ovom radu. Također, ovom je istraživanju potrebna analiza većeg broja FR I radiogalaksija, stoga treba uzeti veliki uzorak i FR I i FR II radiogalaksija opaženih na velikom broju frekvencija s visokom razlučivosti kako bismo vidjeli ponašanje spektralne starosti ove dvije klase radiogalaksija i proučili mogućnost utjecaja okoline na njihovu spektralnu starost.

Literatura

- [1] Blandford, R.D. and Znajek, R.L., 1977, Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes, MNRAS, 179:433
- [2] Brienza, M. et al. 2020, arXiv:2003.13476v2
- [3] Cappelluti, N. et al. A&A 497, 635-648 (2009)
- [4] Carroll, B. W. & Ostlie, D. A., An Introduction to Modern Astrophysics, Addison-Wesley, 1996
- [5] COSMOS VLA Deep Catalogue, <https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-dd>
- [6] Fanaroff, B. L., & Riley, J. M. 1974, MNRAS, 167P, 31F
- [7] Galaktičko jato Abell 2597, <https://chandra.harvard.edu/photo/2015/a2597/>
- [8] Galaktičko jato Cl 0024+17, <https://esahubble.org/images/heic0709b/>
- [9] Galaktičko jato SDSS J0333+0651, <https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2018/hubbles-galaxy-cluster-cornucopia>
- [10] Galaxy cluster. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_cluster
- [11] Galaxy group. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_group
- [12] Ghisellini, G. et al., arXiv:1311.7147
- [13] Gopal-Krishna et al. 2012, ApJ 744, 31
- [14] Gozaliasl, G., Finoguenov, A., Tanaka, M. et al. 2019, MNRAS
- [15] Hardcastle, M. J., Croston, J. H. 2020, arXiv:2003.06137v1
- [16] Harwood, J. J. Broadband Radio Astronomy Tools (BRATS) Cookbook, <http://www.askanastronomer.co.uk/brats/downloads/bratscookbook.pdf>
- [17] Harwood et al., 2013, MNRAS, 435, 3353
- [18] Harwood et al., 2015, MNRAS, 454, 3403

- [19] Jelić, V. et al. 2012, arXiv:1204.2552
- [20] Katalog objekata unutar polja COSMOS za izradu Voronoi dijagrama, http://lapp.irb.hr/~vjelic/MAT/cosmos_katalog_voronoi.fits
- [21] Katalog jata galaksija, <https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-dd>
- [22] Laigle, C. et al. 2016 ApJS 224 24
- [23] Mahatma, V. Spectral ageing in the most powerful radio galaxies. University of Hertfordshire, 2016
- [24] Oklopčić, A. Radiogalaksije sa široko svinutim repovima detektirane u COSMOS nebeskom polju. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2011.
- [25] Paul, S. et al. 2017, arXiv:1706.01916
- [26] Radiogalaksija 3C353, <https://www.cv.nrao.edu/~abridle/3c353xhi.htm>
- [27] Radiogalaksija Cygnus A, <https://cass.ucsd.edu/hexte/people/pblanco/cyga.html>
- [28] Ramella, M., Boschin, W., Fadda, D., Nonino, M. Finding galaxy clusters using Voronoi tessellations, A&A 368, 776-786 (2001)
- [29] Scoville, N., Aussel, H., Brusa, M., Capak, P. et al., The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): Overview, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 172, Issue 1, pp. 1-8., 2007
- [30] Schinnerer, E. et al. 2010 ApJS 188 384
- [31] Smolčić, V., et al. 2007, ApJS 172, 295
- [32] Smolčić, V. et al. A&A 602, A2 (2017)
- [33] Šlaus, B. Sinkrotronsko zračenje galaksija u XXL-North polju. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2016.
- [34] Tisanić, K., Smolčić, V., Delhaize, J., et al. 2019, A&A, 621, A139
- [35] Tribble, P. C. 1993, MNRAS 261, 57-62

- [36] Vardoulaki, E. et al. FR-type radio sources at 3 GHz VLA-COSMOS: Relation to physical properties and large-scale environment, *A&A* 648, A102 (2021)
- [37] Williams, R.K., 2004, Collimated Escaping Vortical Polar e^-e^+ Jets Intrinsically Produced by Rotating Black Holes and Penrose Processes, *ApJ*, 611:952