

Radiogalaksije u polju COSMOS

Filip Matković

Mentorica: prof. dr. sc. Vernesa Smolčić

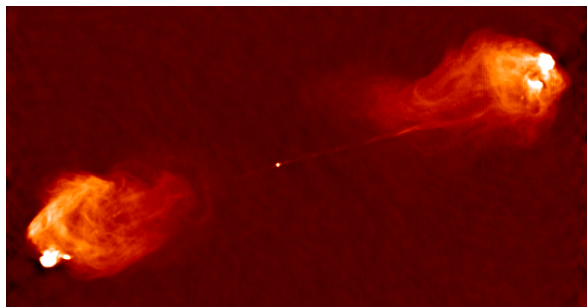
Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

24.01.2021.

Sinkrotronsko zračenje, nastalo interakcijom relativistički ubrzanih nabijenih čestica i lokalnog magnetskog polja, dominantno je zračenje u radiopodručju. Proučavanjem sinkrotronskog zračenja radiogalaksija možemo dobiti informaciju o starosti plazme koja čini mlazove radiogalaksije. Promatramo radiozračenje tri radiogalaksije iz polja COSMOS na frekvencijama 1.4 GHz i 3 GHz. Koristimo podatke gustoće toka zračenja koji dolaze s *Very Large Array* (VLA) radioteleskopa. Korištenjem radiomapa na različitim frekvencijama izrađujemo mapu spektralnog indeksa za tri radiogalaksije. Informacija o spektralnom indeksu pomogla nam je u pronalasku odgovarajućeg indeksa ubrizgavanja koji daje informaciju o lokaciji izvora nove plazme kod radiogalaksije. Korištenjem Jaffe-Perola (JP) modela spektralne starosti određujemo starost plazme u mlazovima radiogalaksija. Zaključujemo da starost plazme raste od izvora prema krajevima mlazova. Najveću starost nalazimo u plazmi u oblacima difuzne radioemisije kod sva tri izvora. Koristeći metodu Voronoi teselacije analizirali smo gustoću galaktičkog susjedstva oko radiogalaksija. Kao rezultat dobili smo da se većina radiogalaksija nalazi na mjestima velike lokalne gustoće galaksija. Nalazimo da dvije od tri radiogalaksije koje se nalaze u područjima povećane gustoće imaju veću spektralnu starost plazme od radiogalaksije u području male lokalne gustoće galaksija. Ovaj rezultat mogao bi ukazivati na to da radiogalaksije u grupama galaksija imaju veću spektralnu starost od izoliranih radiogalaksija. Da bi se to točnije utvrdilo potrebno je provesti analizu na većem uzorku radiogalaksija i njihovih okruženja.

1. UVOD

Radiogalaksije[1][16] su podvrsta galaksija s aktivnom galaktičkom jezgrom (eng. *active galactic nucleus* - AGN[10]) u čijem središtu se nalazi supermasivna crna rupa. One su vrlo sjajne u radiovalnom području elektromagnetskog spektra. Promatrajući radiogalaksiju u radiopodručju razlikujemo tri strukturalna elementa: središnju jezgru, mlazove i oblake radiozračenja. Središnja jezgra (eng. *core*) područje je neposredno oko crne rupe. Radi-



Slika 1. Slika radiozračenja radiogalaksije Cygnus A rezolucije 0.5" dobivena radio-interferometrijskom mrežom VLA na valnoj duljini od 6 cm. Slika je preuzeta s <https://cass.ucsd.edu/hexte/people/pblanco/cyga.html>.

ozračenje[1][16] koje vidimo u ovom području dolazi od akrecijskog materijala koji kruži oko crne rupe, ali i od crpljenja rotacijske energije crne rupe (Blandford-Znajek mehanizam[12]). S druge strane, mlazovi (eng. *jets*) su uske i dugačke strukture koje se šire od polova središnje jezgre prema van. Mlazove čini nabijena plazma koja

se u uskom snopu giba brzinom usporedivom s brzinom svjetlosti i pritom sinkrotronski zrači. Zbog efekta relativističkog usnopljanja[1], 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. Mlazovi završavaju u oblacima radiozračenja (eng. *lobes*) koji su područja difuzne radioemisije, približno elipsoidalnog oblika. Sam kraj mlazova ponekad je kompaktan i vrlo sjajan, što zovemo vrućom točkom (eng. *hotspot*). Vruće točke[1][16] posljedica su udarnih valova koji nastaju kada nadzvučni mlaz (brzina zvuka u plazmi iznosi $c/\sqrt{3}$) naglo završava na granici dvaju medija.

Kada se relativistička nabijena čestica giba u spiralnoj putanji duž silnica magnetskog polja, ona sinkrotronski zrači. Zbog kruženja nabijenog akrecijskog diska oko crne rupe nastaje magnetsko polje. Zbog promjenjivog magnetskog polja na površini diska inducira se električno polje koje ubrzava čestice do relativističkih brzina od diska prema van u obliku mlazova[1][16]. Točan mehanizam nastanka magnetskog polja koji opisuje opažanja vezana za mlazove nije poznat. Međutim, pretpostavlja se da na polovima crne rupe postoji magnetsko polje \vec{B} koje djeluje na čestice naboja q silom \vec{F} oblika[1]:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

gdje je \vec{v} vektor brzine čestice. Polumjer r kružne putanje čestice mase m oko silnica magnetskog polja je stoga:

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB}, \quad (2)$$

gdje je v_{\perp} komponenta brzine čestice okomita na silnice magnetskog polja. 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[2]:

$$S_\nu \propto \nu^{-\alpha}, \quad (3)$$

gdje je S_ν gustoća toka zračenja na određenoj frekvenciji ν . Eksponent α zovemo spektralni indeks. Spektralni indeks možemo povezati s jednim drugim eksponentom u eksponencijanoj distribuciji nabijenih čestica. Naime, energetska distribucija populacije nabijenih čestica zaslužnih za sinkrotronsko zračenje $n(E)$ dana je u obliku[2]:

$$n(E)dE = kE^{-p}dE, \quad (4)$$

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 :

$$\alpha = \frac{p-1}{2}, \quad (5)$$

Uz spektralni indeks vezan je i tzv. indeks ubrizgavanja α_{inj} . Indeks ubrizgavanja[16] opisuje nagib spektra zračenja (relacija (3)) za početnu distribuciju populacije elektrona u vrućim točkama (središnja jezgra se također smatra vrućom točkom). Ovaj indeks označava ona mjesta radioizvora nulte spektralne starosti, odnosno mjesta nove plazme. Naime, česticama plazme (koju čine većinom elektroni) potrebno je određeno vrijeme da izrače svoju energiju kroz sinkrotronske i inverzno-Comptonske gubitke[16]. To vrijeme nazivamo spektralnom starošću. Visokoenergetske čestice plazme gube energiju većom brzinom, stoga je njihova spektralna starost mala. Očekujemo stoga da će plazma u blizini vrućih točaka imati najmanju spektralnu starost, koja će rasti kako se udaljavamo od vrućih točaka zbog manje energije čestica plazme.

Radiogalaksije su većinom masivne eliptične galaksije, ali postoje iznimke[1]. Eliptične galaksije siromašne su plinom i prašinom te u njima prevladava populacija starih i crvenih zvijezda. One mogu nastati sudarima manjih, plavih galaksija bogatih plinom i prašinom. Naime, zbog sudara galaksija dolazi do intenzivnog stvaranja zvijezda, što iscrpi zalihe plina i prašine. Do sudara galaksija[1] često dolazi u gusto naseljenim okolinama galaksija kao što je središte jata galaksija. U većini slučajeva u središtu galaktičkog jata imamo masivnu eliptičnu galaksiju, i to radiogalaksiju. Stoga, očekujemo da se radiogalaksija nalazi u potencijalnoj jami jata, no ne mora uvijek biti tako. Postoje slučajevi kada dolazi do sudara dvaju ili više jata, što dovodi do toga da radiogalaksija bude izbačena iz središta jata[1]. Međutim, zbog dinamičkog trenja prisutnog zbog prolaska radiogalaksije kroz područje bogatije plinom, radiogalaksija ne uspijeva daleko odmaknuti od središta združenog sustava. Odabirom nekoliko radiogalaksija iz polja COSMOS pogledat ćemo u kakvim se okolinama one nalaze i koje su njihove karakteristike.

2. PODACI

2.1 Gustoća toka zračenja radiogalaksija

U svrhu našeg istraživanja odabrane su tri radiogalaksije naziva COSMOSVLA_J095741.11+015122.6 (skraćeno u ovome radu, Radio_01), COSMOSVLA_J095839.25+013557.8 (skraćeno u ovome radu, Radio_02) i COSMOSVLA_J095901.52+024740.6 (skraćeno u ovome radu, Radio_03) koji se nalaze unutar polja COSMOS. COSMOS¹ (eng. *Cosmic Evolution Survey*)

Oznaka radiogalaksije	RA [h:m:s]	DEC [°:':"]	z
Radio_01	09:57:41.11	+01:51:22.6	0.9848
Radio_02	09:58:39.25	+01:35:57.8	1.668
Radio_03	09:59:01.52	+02:47:40.6	0.49297

Tablica I. Tablica prikazuje koordinate rektascenzije (RA) i deklinacije (DEC) odabranih radiogalaksija te njihove crvene pomake z . Koordinate[3] odgovaraju optičkom središtu radiogalaksija, dok su oznake radiogalaksija samo naš način identifikacije, a ne službene oznake.

je pankromatski pregled neba s ciljem ispitivanja evolucije galaksija i aktivnih galaktičkih jezgri, s naglaskom na ispitivanje njihove kozmičke okoline[11]. Polje COSMOS čini područje neba veličine $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ centrirano na RA = $10^h00^m28.6^s$ i DEC = $+02^\circ12'21.0''$. U ovom istraživanju korišteni su podaci gustoće toka zračenja² radiogalaksija (Slika 1.) prikupljeni radioteleskopom VLA (eng. *Very Large Array*). VLA³ radioteleskop nalazi se u Novom Meksiku, 80 km zapadno od grada Socorro, a sastoji se od 27 paraboloidnih radioantena, svaka promjera 25 m, postavljenih u obliku slova Y. Radioteleskop pokriva frekvencije između 74 MHz i 50 GHz. Slike gustoće zračenja koje smo uzeli bile su na frekvencijama od 1.4 GHz[4] i 3 GHz[15]. Razlučivost slika toka zračenja na frekvenciji od 1.4 GHz iznosi $2.5'' \times 2.5''$, dok na frekvenciji od 3 GHz iznosi $0.75'' \times 0.75''$.

2.2 Katalog galaksija

Uz gustoću toka zračenja, koristili smo i katalog galaksija u polju COSMOS koji sadrži informacije o fotometrijskom crvenom pomaku i koordinatama rektascenzije (RA) i deklinacije (DEC) 937 013 galaksija[8]. Ovdje treba napomenuti da smo za radiogalaksiju Radio_03 koristili spektroskopski crveni pomak⁴ dobiven DEIMOS⁵ instrumentom na Keck teleskopu⁶. Za preostale radioga-

¹<https://cosmos.astro.caltech.edu/page/astronomers>

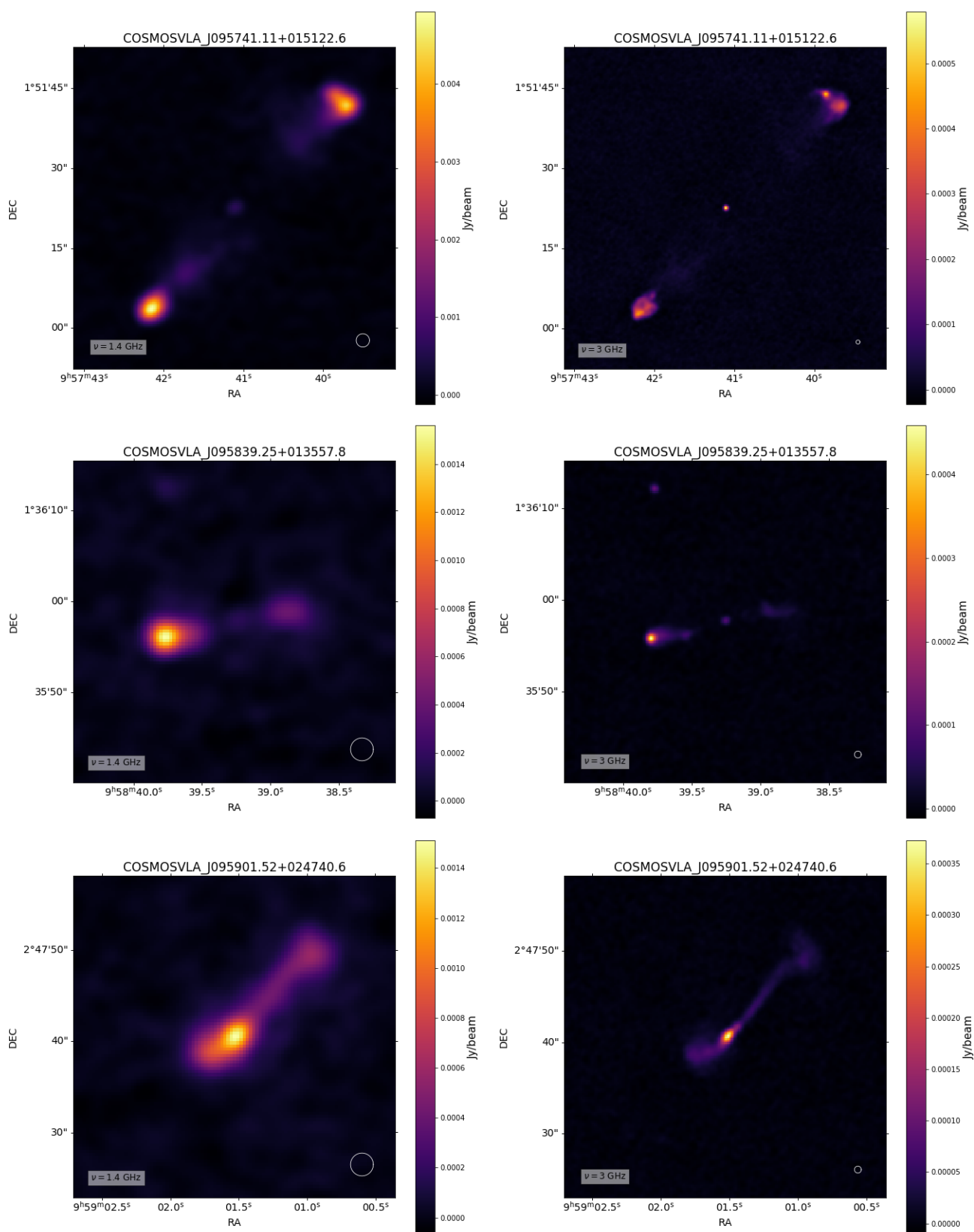
²https://irsa.ipac.caltech.edu/data/COSMOS/index_cutouts.html

³<https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

⁴<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=COSMOSVLA+J095901.52%2B024740.6>

⁵<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aabacf>

⁶<https://www.keckobservatory.org/>



Slika 2. Mape gustoće toka zračenja radiogalaksija Radio_01 (gornji red), Radio_02 (srednji red) i Radio_03 (donji red). Iznos gustoće toka zračenja dan je u jedinicama $Jy/beam$ (vidi skalu desno od grafova). Za svaku radiogalaksiju prikazana je mapa gustoće toka zračenja na frekvenciji od 1.4 GHz (lijevo) rezolucije $2.5'' \times 2.5''$ i na frekvenciji od 3 GHz (desno) rezolucije $0.75'' \times 0.75''$. Kružić u donjem desnom kutu mapa prikazuje veličinu jediničnog rezolucijskog elementa.

laksije koristili smo fotometrijski crveni pomak (Tablica I.) iz kataloga *COSMOS VLA 3GHz Multiwavelength Counterpart*[13].

3. ANALIZA I REZULTATI

3.1 Izrada mape spektralnog indeksa

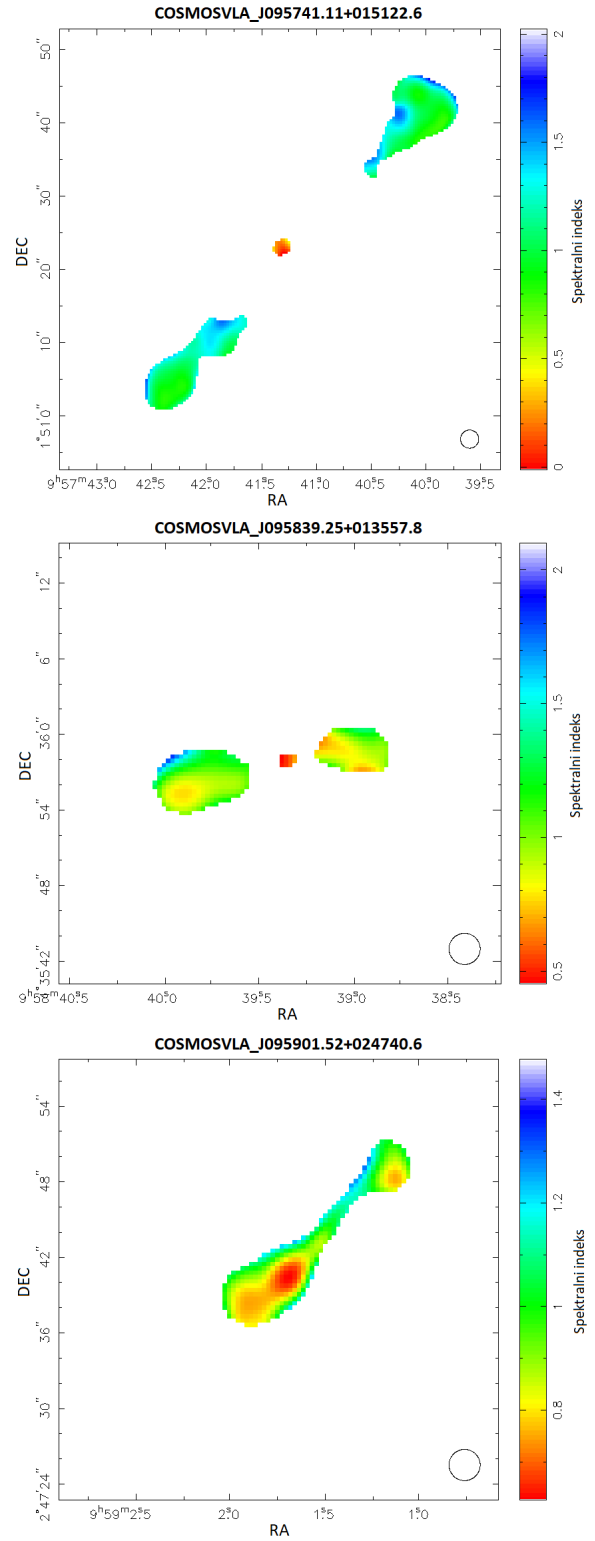
Poznavanjem gustoće toka zračenja nekog izvora na dvije različite frekvencije trivijalno dolazimo do izraza za spektralni indeks. Koristeći relaciju (3) dobivamo:

$$\alpha = -\frac{\log S_2 - \log S_1}{\log \nu_2 - \log \nu_1}, \quad (6)$$

gdje su $S_{1,2}$ gustoće toka zračenja izvora na frekvencijama $\nu_{1,2}$, respektivno. U svrhu računanja spektralnog indeksa, ali i spektralne starosti kasnije, koristimo *software* BRATS⁷ (eng. *Broadband Radio Astronomy ToolS*). Kako bi odredio pogrešku spektralnog indeksa, BRATS koristi GSL (eng. *GNU Scientific Library*) funkcije *ulinear* i *linear_est*⁸ 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 kao¹⁰:

$$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N w_i}{(\sum_{i=0}^N \log(\nu_i^2) w_i)(\sum_{i=0}^N w_i) - (\sum_{i=0}^N \log(\nu_i) w_i)^2}}, \quad (7)$$

gdje je N broj frekvencija ν . Za potrebe računanja spektralnog indeksa i spektralne starosti, razlučivost slika, kao i veličina slike i piksela, mora biti jednaka za sve promatrane frekvencije. Korištenjem *softwarea* CASA⁹ rezoluciju slike na 3 GHz konvoluirali smo na rezoluciju slike na 1.4 GHz te smo slike podesili na jednaku veličinu piksela. Prije same izrade mape spektralnog indeksa, prilikom unosa slika u *software* 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, ostalo zanemaruje. Na taj način zanemarujemo velik dio pozadinskog šuma i zadržavamo samo signal od željenog radioizvora. Naredbom *setregions*¹⁰ određujemo piksele za koje želimo izračunati spektralni indeks. Pritom je korisno postaviti omjer signala prema šumu (naredba *signaltonoise*) na željenu vrijednost kako bi još više smanjili utjecaj pozadinskog šuma. Kako bi smanjili utjecaj termalnog šuma izvora, naredbom *onsource* zadajemo faktor kojim se množi kvadratna sredina (eng. *Root*



Slika 3. Mape spektralnog indeksa radiogalaksija Radio_01 (gornja slika), Radio_02 (srednja slika) i Radio_03 (donja slika). Desno je prikazana skala vrijednosti spektralnog indeksa α . Kružić u donjem desnom kutu slika odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

⁷<http://www.askanastronomer.co.uk/brats/>

⁸<https://www.gnu.org/software/gsl/doc/html/lls.html#linear-regression>

⁹<https://casa.nrao.edu/>

¹⁰<http://www.askanastronomer.co.uk/brats/downloads/bratsc-ookbook.pdf>

Oznaka radiogalakcije	α_{min}	$\Delta\alpha_{min}$	α_{max}	$\Delta\alpha_{max}$	α_{mean}
Radio_01	-0.01	0.58	1.76	0.73	1.10
Radio_02	0.45	1.16	1.83	1.01	0.99
Radio_03	0.63	0.28	1.28	1.13	0.91

Tablica II. Minimalna (α_{min}) i maksimalna vrijednost (α_{max}) spektralnog indeksa za tri radiogalakcije te srednja vrijednost spektralnog indeksa (α_{mean}) cijelog izvora. Za svaku vrijednost minimalnog i maksimalnog spektralnog indeksa dana je i njegova pogreška ($\Delta\alpha_{min}$ i $\Delta\alpha_{max}$ respektivno).

Mean Square - RMS) vrijednosti šuma izvora. Na dobivene željene regije primjenjujemo naredbu *specindex* koja računa spektralni indeks za sve odabrane piksele. Na središnjoj regiji tri radioizvora (Slika 2.) vidimo ravan spektar zračenja ($\alpha(\text{Radio}_01) < 0.4$, $\alpha(\text{Radio}_02) < 0.6$, $\alpha(\text{Radio}_03) < 0.7$). Središnja regija odgovara središtu same radiogalakcije, gdje se nalazi aktivna galaktička jezgra. Taj rezultat je u skladu s očekivanom vrijednošću spektralnog indeksa za središte radiogalakcije jer je ono izvor nove plazme izbačene u mlazove. Kako se udaljavamo od središta radiogalakcija prema oblacima radiozračenja vidimo da opada vrijednost spektralnog indeksa. U svakom oblaku radiogalakcije gdje završavaju mlazovi vidimo ravniji spektar zračenja nego na rubovima oblaka. Međutim, u odnosu na središnju jezgru, u oblacima je spektar strm (~ 1). Na rubovima oblaka radiogalakcija spektar zračenja naglo opada ($\alpha > 1$), no trebamo biti oprezni kod spektra u uskom području uz rub izvora koji je možda samo rubni artefakt zbog rezanja rubnih piksela za određene vrijednosti šuma. Udaljavanjem od sredine oblaka plazma ima manju energiju zbog radijativnih gubitaka, što odgovara većem spektralnom indeksu, tj. velikom nagibu spektra zračenja. Kod radiogalakcije Radio_01 dobili smo negativnu vrijednost minimuma spektralnog indeksa $\alpha_{min} = -0.01$ (takvi se izvori u literaturi nazivaju izvorima invertiranog spektra). Pogreška minimalnog spektralnog indeksa za Radio_02 iznosi $\Delta\alpha_{min} = 1.16$, što je izrazito velika pogreška u odnosu na $\alpha_{min} = 0.45$. Naime, veličina rezolucijskog elementa, koji je konvoluiran s *CLEAN* komponentama pomoću *softwarea* CASA da bi se proizvela slika radioizvora, može biti usporediva ili veća od fizikalne veličine vruće točke[16]. To za posljedicu ima lošiju rezoluciju koja "objedinjuje" vruću točku i okolno područje dajući srednji spektralni indeks te se onda ne može razlučiti točan spektralni indeks toga područja. Budući da je veličina rezolucijskog elementa na slikama naših radiogalakcija usporediva s veličinom vruće točke (središte radiogalakcije), možda smo zato dobili velike pogreške minimalnog spektralnog indeksa kod radiogalakcija Radio_01 i Radio_02. Međutim, nemamo dovoljno informacija za potvrdu ove tvrdnje. Drugi razlog velike pogreške minimuma spektralnog indeksa kod Radio_01 i Radio_02 mogla bi biti činjenica da se područje minimalnog spektralnog indeksa nalazi na rubu središta radiogalakcije, gdje bismo mogli očekivati veću nepouzdanost rezultata.

3.2 Računanje indeksa ubrizgavanja

Jedan od ključnih parametara modela spektralne starosti je indeks ubrizgavanja. *Software* BRATS sadrži naredbu *findinject*⁹ koja uzima danu vrijednost indeksa ubrizgavanja i minimizira χ^2 vrijednosti prilagodbe određenog modela spektralne starosti (u našem slučaju JP model). χ^2 vrijednost za neki piksel dana je kao[16]:

$$\chi^2 = \sum_{\nu=1}^N \left(\frac{S_{i,\nu} - S_{model,\nu}}{\Delta S_{i,\nu}} \right)^2, \quad (8)$$

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 (vidi poglavlje 3.3), $\Delta S_{i,\nu}$ nepouzdanost gustoće toka zračenja, a N ukupan broj promatranih frekvencija (u našem slučaju $N = 2$). Naredba *findinject*, uz početne parametre minimuma i maksimuma vrijednosti indeksa ubrizgavanja (*mininject* i *maxinject*), traži kao ulazni parametar i vrijednost magnetskog polja u mlazovima i oblacima radiogalakcije. Za izračun magnetskog polja koristimo gotov izraz oblika[7]:

$$B = 5.69 \cdot 10^{-5} \left[\frac{1+k}{\eta} (1+z)^{3+\alpha} \times \frac{1}{\Theta_x \Theta_y l \sin^3 \Phi} \cdot \frac{F_0 \nu_2^{1/2-\alpha} - \nu_1^{1/2-\alpha}}{\nu_0^\alpha \frac{1}{2-\alpha}} \right]^{2/7} [G], \quad (9)$$

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 poluos jediničnog rezolucijskog elementa, l duljina puta (kpc) kroz izvor duž doglednice, Φ kut između uniformnog magnetskog polja i doglednice, F_0 gustoća toka zračenja (Jy ili Jy/beam) na promatranoj frekvenciji ν_0 (GHz), ν_1 i ν_2 (GHz) donja i gornja granična frekvencija radiovalnog područja elektromagnetskog spektra te α srednji spektralni indeks cijelog izvora. Budući da nemamo dovoljno informacija o radioizvorima, uzimamo određene aproksimacije. Pretpostavljamo da radioplazma 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) te da su granične frekvencije spektra radiozračenja 10 MHz i 100 GHz. Naredba *findinject* među početnim parametrima zahtijeva i podatak o gornjoj granici spektralne starosti (*myears*) u milijunima godina. Za sve tri radiogalakcije odabrali smo gornju granicu spektralne starosti u iznosu od 20 milijuna godina. Kao rezultat, *findinject* daje sumu χ^2 vrijednosti svih piksela radioizvora za dane početne vrijednosti indeksa ubrizgavanja. Tražena vrijednost indeksa ubrizgavanja odgovara onoj vrijednosti koja daje minimalnu sumu χ^2 vrijednosti. Vrijednost indeksa ubrizgavanja koju očekujemo nalazi se u blizini minimuma spektralnog indeksa, što ograničava interval vrijednosti indeksa ubrizgavanja koji testiramo. Proces traženja indeksa ubrizgavanja zahtijeva mnogo

vremena i može potrajati i do nekoliko sata pa i do nekoliko dana ovisno o brzini računala i vrsti modela spektralne starosti koji se primjenjuje. Vrijednosti indeksa

Oznaka radiogalaksije	α_{inj}	B [T]
Radio_01	0.16	$3.98 \cdot 10^{-10}$
Radio_02	0.46	$4.09 \cdot 10^{-10}$
Radio_03	0.63	$2.86 \cdot 10^{-10}$

Tablica III. Prikaz dobivenih vrijednosti indeksa ubrizgavanja α_{inj} tri radiogalaksije, kao i jakost magnetskog polja B u mlazovima i oblacima izračunatog relacijom (9).

ubrizgavanja (Tablica III.) koje smo dobili odgovaraju područjima nulte starosti plazme za naše tri radiogalaksije. Prema vrijednostima indeksa ubrizgavanja α_{inj} vidimo da α_{inj} za Radio_03 odgovara upravo minimumu spektralnog indeksa ove radiogalaksije. Ovaj rezultat je u skladu s našim očekivanjem vrijednosti α_{inj} . Naime, područja najmanjeg spektralnog indeksa (ravni spektar) nekog radioizvora odgovaraju izvoru nove plazme, kod koje još nema radijativnih gubitaka pa je njezina spektralna starost nula. Sličnu situaciju imamo i kod Radio_02, gdje je $\alpha_{inj} = 0.46$ jako blizu vrijednosti minimuma spektralnog indeksa $\alpha_{min} = 0.45$, razlika je zanemariva. Najveću razliku između minimuma spektralnog indeksa i indeksa ubrizgavanja možemo vidjeti kod Radio_01, gdje su $\alpha_{inj} = 0.16$ i $\alpha_{min} = -0.01$. Ovaj rezultat mogao bi biti posljedica prethodno spomenutog utjecaja veličine rezolucijskog elementa na pouzdanost spektralnog indeksa u vrućim točkama, no nemamo dovoljno informacija da budemo sigurni. Budući da smo imali veliku nepouzdanost spektralnog indeksa ($\Delta\alpha_{min} = 0.58$) u središtu Radio_01 nismo ni mogli očekivati da će odgovarajuća vrijednost indeksa ubrizgavanja biti oko minimuma spektralnog indeksa. Zato smo proširili interval traženja vrijednosti indeksa ubrizgavanja kako bismo pronašli najbolji indeks ubrizgavanja za određeni model.

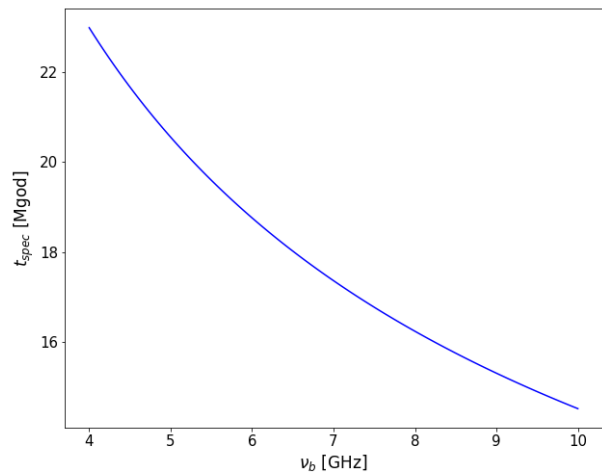
3.3 Izrada mape spektralne starosti

Koristan alat za određivanje starosti radioizvora je spektralno starenje uslijed radijativnih gubitaka[5][6][16]. Kada elektroni zaostaju kako vruće točke napreduju ispunjavajući oblake radiogalaksije ili mlaz ako vrućom točkom smatramo i središte, 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 ovih gubitaka[16]. Spektralna starost t_{spec} (u milijunima godina - Mgod) povezana je s tom frekvencijom prekida ν_b (GHz) i magnetskim poljem

B (nT) kao[5]:

$$t_{spec} = \frac{3}{2} \frac{B^{1/2}}{B^2 + B_{CMB}^2} (c_7/\nu_b)^{1/2}, \quad (10)$$

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, iz relacije (10) možemo dobiti spektralnu starost t_{spec} . Frekvenciju prekida nažalost ne možemo eksperimentalno odrediti jer frekvencije 1.4 i 3 GHz nisu dovoljne. Slika 4. pokazuje izračunatu ovisnost spek-



Slika 4. Primjer ovisnosti spektralne starosti t_{spec} u milijunima godina (Mgod) o frekvenciji prekida ν_b između 4 i 10 GHz dobivene relacijom (10) uz magnetsko polje $B = 0.286$ nT i crveni pomak $z = 0.49297$ uzete za Radio_03.

tralne starosti t_{spec} o frekvenciji prekida ν_b između 4 i 10 GHz iz relacije (10), gdje možemo vidjeti da za veće frekvencije prekida imamo manju spektralnu starost. Dakle, plazma veće energije (veće frekvencije) brže gubi energiju preko radijativnih gubitaka.

Postoji nekoliko modela spektralne starosti koje *software* BRATS podržava. Svi modeli u suštini opisuju sinkrotronsku emisiju relativističkih elektrona koji se kreću u magnetskim poljima od vrućih točaka prema oblacima radiogalaksije gdje započinju radijativni gubitci. Za potrebe ovog istraživanja koristimo model razvijen od Jaffe-Perola (JP) 1973. godine. JP model spektralne starosti[16] pretpostavlja konstantno magnetsko polje duž cijelog radioizvora, ali uz kut između vektora brzine elektrona i magnetskog polja koji je izotropan samo na kratkim vremenskim skalama. Ovaj model stoga koristi vremenski usrednjenu vrijednost kuta δ između vektora brzine elektrona i fiksnog magnetskog polja u oblacima radiogalaksije. Gustoća toka zračenja nekog modela spektralne starosti koji pretpostavlja fik-

sno magnetsko polje dana je kao[16]:

$$S_{model}(\nu) = \frac{\sqrt{3}e^3 B}{8\pi\epsilon_0 c m_e} \int_0^{\pi/2} \int_{E_{min}}^{E_{max}} F(x) \frac{1}{2} \sin^2 \delta \times \times n(E) dE d\delta, \quad (11)$$

gdje je e naboj elektrona, m_e masa elektrona, c brzina svjetlosti, ϵ_0 električna permitivnost vakuumu, a E energija relativističkih elektrona. Funkcija $F(x)$ u prethodnoj relaciji ima oblik⁹:

$$F(x) = x \int_x^\infty K_{5/3}(z) dz, \quad (12)$$

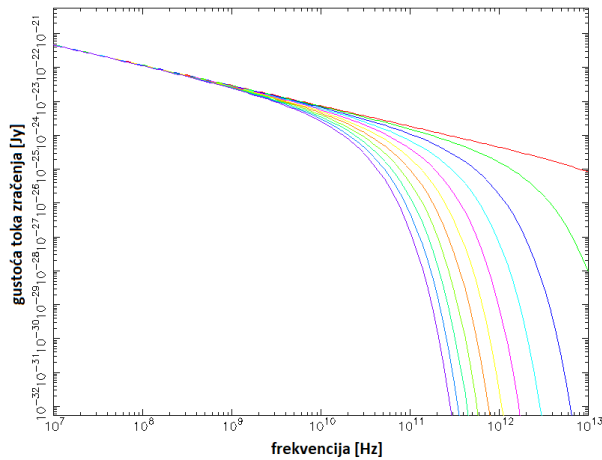
gdje je K Besselova funkcija reda 5/3, $x \equiv \nu/\nu_c$, a $\nu_c = \gamma^2 e B_\perp / 2\pi m_e$ kritična frekvencija te $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Funkcija $n(E)$ odgovara energetskej distribuciji elektrona koja je dana kao[16]:

$$n(E) = n_0 E^{-2\alpha+1} (1-\beta)^{(2\alpha+1)-2}, \quad (13)$$

gdje je n_0 početna energetska distribucija elektrona, a β vremenski ovisan gubitak energije na visokim frekvencijama nekog modela. Za JP model, vremenski ovisan gubitak energije ima oblik⁹:

$$\beta_{JP} = B^2 E t \frac{4\sigma_T}{6m_e^2 \nu_c^3 \mu_0}, \quad (14)$$

gdje je t vrijeme proteklo od početne akceleracije elektrona, μ_0 magnetska permeabilnost vakuumu, a σ_T Thomsonov udarni presjek. Na grafu JP modela gustoće



Slika 5. Primjer JP modela gustoće toka zračenja (S_{model}) između 10 MHz i 10 THz s indeksom ubrizgavanja $\alpha_{inj} = 0.6$ i magnetskim poljem $B = 1$ nT. Krivulje pokazuju model spektralne starosti između 0 (crvena krivulja) i 10 (ljubičasta krivulja) milijuna godina.

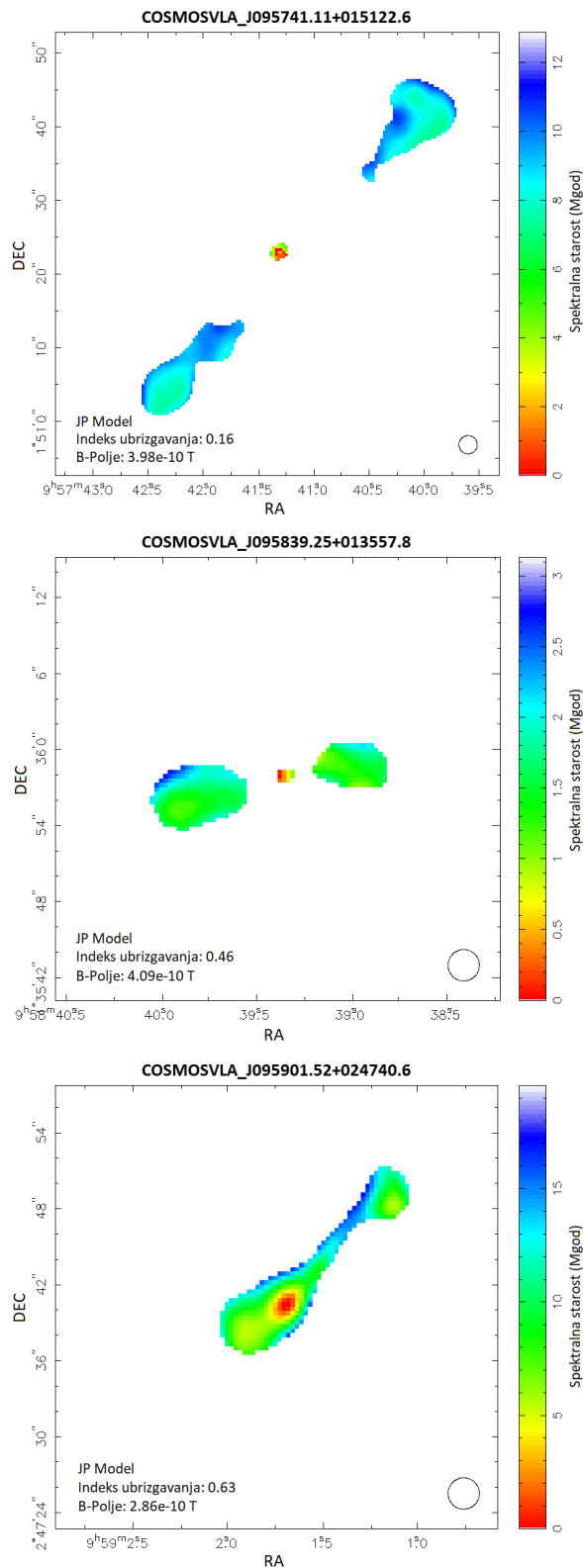
toka zračenja S_{model} (Slika 5.) možemo vidjeti spektar zračenja za različite modele spektralne starosti. Također vidimo da se vrijednost frekvencije prekida, frekvencije na kojoj dolazi do naglog pada spektra zračenja, pomiče

ulijevo prema manjim vrijednostima kako spektralna starost raste. *Software* BRATS koristi naredbu *fitjpmode*⁹ kako bi prilagodio JP model spektralne starosti na dane podatke. Pritom je potrebno navesti početne parametre poput jakosti magnetskog polja (*bfield*), gornje granice starosti (*myears*) te indeksa ubrizgavanja (*injectionindex*), koji je dobiven u prethodnom poglavlju. Naredba *fitjpmode* računa model gustoće toka zračenja (S_{model}) na svim zadanim frekvencijama i uspoređuje rezultat s opaženom gustoćom toka zračenja (S). Nakon toga program računa χ^2 vrijednosti (relacija (7)) za odabrani model kako bi odredio dobrotu prilagodbe modela, pritom određujući i nepouzdanost spektralne starosti. Taj se postupak zatim ponavlja kroz određeni raspon starosti i određuje se najbolja prilagodba spektralne starosti za svaku regiju izvora. Nakon završetka prilagodbe JP modela, BRATS ispisuje na ekran vrijednost spektralne starosti određene regije unutar radioizvora koja je imala minimalnu spektralnu starost (t_{min}) i regije koja je imala maksimalnu spektralnu starost (t_{max}). Rezul-

Oznaka radiogalaksije	t_{min} [Mgod]	t_{max} [Mgod]
Radio_01	$0.00^{+6.56}_{-0.00}$	$11.21^{+2.81}_{-2.40}$
Radio_02	$0.00^{+2.44}_{-0.00}$	$2.72^{+1.40}_{-1.22}$
Radio_03	$0.00^{+4.55}_{-0.00}$	$17.01^{+6.08}_{-7.55}$

Tablica IV. Minimalna (t_{min}) i maksimalna (t_{max}) spektralna starost područja unutar tri radiogalaksije u milijunima godina (Mgod). Pored vrijednosti minimalne i maksimalne spektralne starosti dano je gornje i donje odstupanje starosti.

tantne mape spektralne starosti (Slika 6.) radiogalaksija prate očekivanja koje su dale mape spektralnog indeksa. Naime, na mjestima gdje je spektralni indeks najmanji imamo najmanju spektralnu starost izvora. Područje najmanje spektralne starosti (crveno) odgovara središtu radiogalaksije iz koje izvire nova plazma. U oblacima radiogalaksija sa svake strane središta vidimo veću spektralnu starost plazme budući da plazma u oblacima ima manju energiju zbog radijativnih gubitaka. Središnja područja oblaka imaju mnogo manju spektralnu starost od rubova oblaka. Kao što smo rekli u poglavlju 3.1, nagib spektra zračenja na rubovima oblaka mnogo je strmiji zbog mnogo manje energije plazme u tom području ili rezanja za određene vrijednosti šuma. To znači da plazmi na rubovima treba mnogo više vremena da bi izračila svoju energiju, što odgovara većoj spektralnoj starosti. Iz dobivenih mapa starosti vidimo da oblaci radiogalaksija Radio_01 i Radio_03 imaju veliku spektralnu starost. Većina plazme u oblacima kod Radio_01 ima spektralnu starost između 7 i 10 milijuna godina, dok je kod Radio_03 starost između 4 i 10 milijuna godina. U usporebi s Radio_01 i Radio_03, radiogalaksija Radio_02 ima mnogo manju spektralnu starost oblaka, gdje plazma ima spektralnu starost između 1 i 2 milijuna godina. Prema graničnim vrijednostima spektralne starosti (Tablica IV.) radiogalaksija vidimo da Radio_03 ima najveću spektralnu starost od $t_{max} = 17.01$ mili-



Slika 6. Mape spektralne starosti radiogalaksija Radio_01 (gornja slika), Radio_02 (srednja slika) i Radio_03 (donja slika) za JP model. Desno je prikazana skala vrijednosti spektralne starosti u milijunima godina (Mgod). Kružić u donjem desnom kutu slika odgovara veličini jediničnog rezolucijskog elementa.

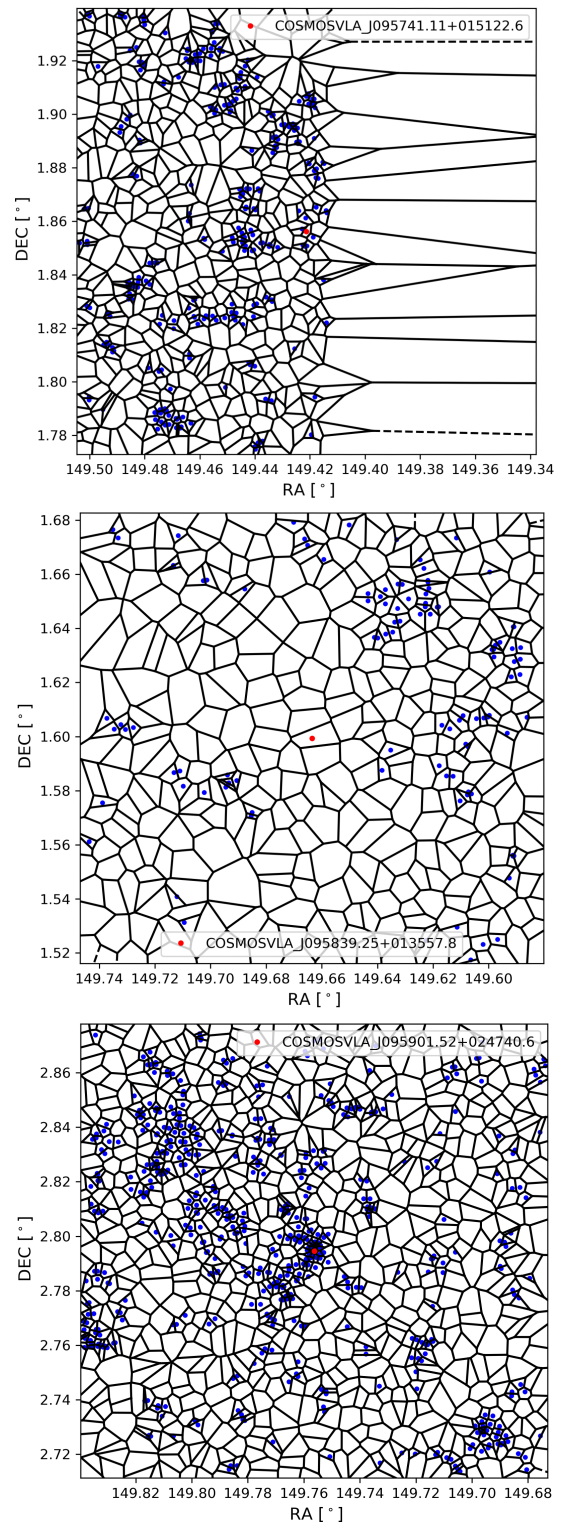
juna godina. Kod Radio_03 vidimo i najveći skok u spektralnoj starosti od sredine prema rubovima oblaka. Iza nje slijedi Radio_01 s maksimalnom spektralnom starošću $t_{max} = 11.21$ milijuna godina. Radiogalaksija Radio_02 ima najmanju spektralnu starost od tri radiogalaksije, čiji je maksimum svega $t_{max} = 2.72$ milijuna godina. Ovaj rezultat govori nam da je Radio_02 relativno mladi radiioizvor u odnosu na druge dvije radiogalaksije. Plazma u oblacima Radio_02 ima još uvijek veliku energiju te se nalazi u početnoj fazi radijativnog gubitka svoje energije. Spektralna starost oblaka radiogalaksija Radio_01 i Radio_03 u skladu je s očekivanjima spektralne starosti dobivene u literaturi[5][6][16], gdje su se odabrane radiogalaksije nalazile u galaktičkom jatu. Stoga, da bi provjerili mogućnost utjecaja galaktičke okoline oko radiogalaksije na njezinu spektralnu starost, pogledat ćemo u kakvoj se okolini nalaze naše tri radiogalaksije.

3.4 Metoda Voronoi teselacije

Kako bi dobili informaciju o okolini bilo koje galaksije, koristimo metodu koja se temelji na postupku Voronoi teselacije. Voronoi teselacija[1][9] 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 određene 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 biblioteku *scipy* unutar programskog jezika Python (za primjer koda vidi link¹¹) koja sadrži funkciju za provedbu Voronoi teselacije. Za tri radiogalaksije koje promatramo, iz kataloga galaksija[8] 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 razmatramo. Nas zanimaju područja povećane gustoće galaksija kako bismo odredili postoje li grupiranja galaksija oko naših radiogalaksija. Za ovu svrhu potrebno je odrediti kriterij za povećanu gustoću naseljenosti galaksija. Uzimamo polje veličine jednog kvadratnog stupnja čiji se centar poklapa s centrom COSMOS polja. Crveni pomaci galaksija unutar jednog kvadratnog stupnja odgovaraju onima za prethodno manje polje oko radiogalaksije. Da bi se isključila mogućnost da je povećana gustoća rezultat slučajnog razmještaja galaksija, a ne stvarne grupiranosti galaksija, provedena je Monte Carlo simulacija. Naime, jednak broj galaksija kao i na realnoj slici

¹¹<http://lapp.irb.hr/~vjelic/MAT/voronoi-primjer.py>

nasumično je razmješten po jednakoj površini od jednog kvadratnog stupnja te je provedena Voronoi teselacija na 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. Kao 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. Iz dobivenih Voronoi dijagrama (Slika 7.) okoline tri radiogalaksije vidimo da se sve tri radiogalaksije nalaze u različitim okolinama. Pogledajmo najprije Voronoi dijagram za Radio_01. Vidimo da se Radio_01 nalazi na samom rubu polja COSMOS, međutim njezina okolina bogata je galaksijama. Na Voronoi dijagramu vidimo više područja u kojima postoje zgušnjenja galaksija, kao što je nepravilno zgušnjenje galaksija s desne strane Radio_01. Radiogalaksija Radio_01 nalazi se relativno blizu zgušnjenja galaksija, koji je mogući kandidat za grupu galaksija, i okružena je malim brojem drugih galaksija izvan središnjeg zgušnjenja. Budući da radimo s fotometrijskim crvenim pomacima, koji nisu dovoljno precizni kao spektroskopski crveni pomaci, ne možemo sa sigurnošću tvrditi da je Radio_01 dio zgušnjenja, odnosno grupe galaksija. Ako pretpostavimo da je Radio_01 gravitacijski vezana za desnu grupu galaksija, onda je radiogalaksija Radio_01 najvjerojatnije satelitska galaksija toj grupi. Preskočimo zasad Radio_02 i pogledajmo Voronoi dijagram za radiogalaksiju Radio_03. U odnosu na Radio_01, okolina Radio_03 bogatija je galaksijama te sadrži veća grupiranja galaksija. Kao što možemo vidjeti na Voronoi dijagramu, Radio_03 nalazi se u centralnom dijelu zgušnjenja galaksija u centru promatranog polja. Prema broju galaksija u zgušnjenju možemo pretpostaviti da se najvjerojatnije radi o grupi galaksija, a ne skupu jer broj galaksija nije dovoljno velik da bi mogli sa sigurnošću tvrditi da se radi o skupu. Zgušnjenje ima nepravilni oblik, kod kojeg vidimo veće izduženje dijagonalno prema jugu. Razlog nepravilnog oblika zgušnjenja je mogao bi biti sudar dvije grupe galaksija, od kojih je jedna grupa galaksija u kojoj se nalazi Radio_03. Međutim, nemamo dovoljno informacija da budemo sigurni u ovu tvrdnju. Osim grupe galaksija oko Radio_03, na Voronoi dijagramu vidimo grupe galaksija poput one u donjem desnom kutu polja, ali i grupe poput gore lijevo te na samom lijevom rubu polja. Dakle, okolina radiogalaksija Radio_01 i Radio_03 gusto je naseljena galaksijama, što smo i naslutili u samom uvodu. Međutim, to nije slučaj kod radiogalaksije Radio_02. Na Voronoi dijagramu okoline Radio_02 vidimo jako mali broj galaksija u odnosu na okoline Radio_01 i Radio_03. Možemo vidjeti nekoliko slabijih grupiranja galaksija na desnoj polovici Voronoi dijagrama i zgušnjenja od samo nekoliko galaksija s desne strane Radio_02. Unutar uže okoline radiogalaksije Radio_02 nema niti jednog grupiranja ili zgušnjenja galaksija. Ovaj rezultat pokazuje da je radiogalaksija Radio_02 vjerojatno izolirana galaksija. U prethodnom poglavlju vidjeli smo da su spektralne starosti radiogalak-



Slika 7. Voronoi dijagrami okoline radiogalaksija Radio_01 (gornja slika), Radio_02 (srednja slika) i Radio_03 (donja slika) veličine 10×10 arcmin² unutar kojeg se nalaze galaksije (plave točke) čija lokalna gustoća naseljenosti prelazi odabrani kriterij povećane gustoće $\bar{\rho} + 10\sigma_{\rho}$. Crvenom točkom označen je položaj radiogalaksija.

sija Radio_01 i Radio_03 bile relativno velike, dok je spektralna starost Radio_02 bila mnogo manja. Povežemo li rezultat spektralne starosti s rezultatom koji smo dobili za okolinu radiogalakcija Voronoi teselacijom, mogli bi pretpostaviti da postoji mogućnost utjecaja okoline radiogalakcije na njezinu spektralnu starost. Naime, rezultati koje smo dobili ukazuju na to da radiogalakcije unutar (Radio_03) ili u blizini grupa galaksija (Radio_01) imaju veću spektralnu starost od izoliranih radiogalakcija (Radio_02). Nažalost, na temelju samo tri radiogalakcije ne možemo sa sigurnošću tvrditi da postoji veza između spektralne starosti i položaja radiogalakcija u odnosu na grupe galaksija. Da bi s većom sigurnošću mogli tvrditi postojanje takve veze, tj. da veza između spektralne starosti i okoline radiogalakcija nije samo slučajnost, moramo uzeti mnogo veći uzorak radiogalakcija te napraviti istu analizu kao i za naše tri radiogalakcije.

4. ZAKLJUČAK

Proučavali smo zračenje tri radiogalakcije u radiovalnom području na frekvencijama 1.4 GHz i 3 GHz prikupljeno radioteleskopom VLA. Gustoća toka zračenja na ovim frekvencijama poslužila nam je za izračun mapa spektralnog indeksa kao prvog koraka u određivanju spektralne starosti radioizvora. Na temelju mapa spektralnog indeksa zaključili smo da energija plazme radioizvora opada kako se udaljavamo od središta izvora i oblaka radioemisije. Koristeći informaciju o minimumu spektralnog indeksa u većini slučajeva mogli smo predvidjeti interval unutar kojeg se nalazila odgovarajuća vrijednost indeksa ubrizgavanja. Najviše pažnje i vremena posvetili smo određivanju vrijednosti indeksa ubrizgavanja za JP model starosti jer je on najbitniji parametar koji ulazi u izračun spektralne starosti. Da je vrijednost indeksa ubrizgavanja bila npr. veća od vrijednosti koju smo dobili, radioizvor bi imao mnogo manju vrijednost maksimuma spektralne starosti. Jednom kada znamo vrijednost indeksa ubrizgavanja, određivanje

spektralne starosti postaje lagano. Na temelju dobivenih mapa spektralne starosti uočili smo da radiogalakcije Radio_01 i Radio_03 imaju veće spektralne starosti. Velika razlika spektralne starosti pojavila se kod radiogalakcije Radio_02, za koju smo dobili malenu spektralnu starost ($t_{max} = 2.72$ milijuna godina). Ovaj rezultat nas je potaknuo da pogledamo okolinu svake radiogalakcije kako bi provjerili utječe li možda položaj radiogalakcije na spektralnu starost. Koristeći metodu Voronoi teselacije dobili smo informaciju o okolini svake radiogalakcije. Vidjeli smo da se radiogalakcija Radio_01 nalazila blizu grupe galaksija, dok se radiogalakcija Radio_03 nalazila u središtu najgušćeg dijela grupe galaksija. Ovaj rezultat u skladu je s rezultatima iz literature da se većina radiogalakcija nalazi u područjima velike lokalne gustoće galaksija. Naravno, postoje iznimke poput radiogalakcije Radio_02. Uspoređujući rezultate spektralne starosti i lokalne gustoće galaksija oko odabranih radiogalakcija vidjeli smo da je izolirana radiogalakcija imala mnogo manju spektralnu starost, nego što je bio slučaj kod radiogalakcija u blizini grupe galaksija. No, nemamo dovoljno informacija da bi mogli potvrditi da je uzrok male spektralne starosti kod Radio_02 upravo lokalna gustoća galaksija oko ove radiogalakcije, a ne nešto drugo. Plan za buduće istraživanje je korištenje i drugih modela spektralne starosti kako bi dobili bolji uvid u spektralnu starost radioizvora. Korištenjem većeg uzorka radiogalakcija unutar polja COSMOS istražiti ćemo njihove spektralne starosti i okoline u kojima se nalaze. To će nam dati informaciju o (ne)postojanju veze između spektralne starosti radiogalakcije i lokalne gustoće galaksija oko svake radiogalakcije uzorka.

5. ZAHVALE

Zahvaljujem se profesorici Vernesi Smolčić i kolegici Brunu Šlausu sa Zavoda za eksperimentalnu fiziku na uloženom vremenu i pomoći pri izradi ovog seminara.

-
- [1] Antonija Oklopčić, Vernesa Smolčić, Radio galaksije sa široko svinutim repovima detektirane u COSMOS nebeskom polju, Zagreb, 2011.
 - [2] Bruno Šlaus, Vernesa Smolčić, Sinkrotronsko zračenje galaksija u XXL-North polju, Zagreb, 2016.
 - [3] E. Schinnerer et al 2007 ApJS 172 46
 - [4] Eva Schinnerer, M. T. Sargent, M. Bondi, V. Smolčić, A. Datta, C. L. Carilli, et. al., The VLA-COSMOS Survey. IV. Deep Data and Joint Catalog, 2010ApJS..188..384S
 - [5] Harwood et al., 2013, MNRAS, 435, 3353
 - [6] Harwood et al., 2015, MNRAS, 454, 3403
 - [7] George Miley, The structure of extended extragalactic radio sources, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1980. 18: 165-218
 - [8] Lana Ceraj, Moderne astrofizičke tehnike, Potraga za skupovima galaksija metodom Voronoi teselacije
 - [9] M. Ramella, W. Boschin, D. Fadda, M. Nonino, Finding galaxy clusters using Voronoi tessellations, A&A 368, 776–786 (2001)
 - [10] P. Padovani, D. M. Alexander, R. J. Assef, et. al., Active Galactic Nuclei: what's in a name?, arXiv:1707.07134
 - [11] 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
 - [12] Ted Jacobson, Maria J. Rodriguez, Blandford-Znajek process in vacuo and its holographic dual, Phys. Rev. D 99, 124013 (2019)
 - [13] V. Smolčić, I. Delvecchio, G. Zamorani, N. Baran, et. al., The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Multiwavelength counterparts and the composition of the faint radio population, A&A 602, A2 (2017)

- [14] V. Smolčić, E. Schinnerer, A. Finoguenov, I. Sakelliou, C. L. Carilli, C. S. Botzler, et. al., A wide angle tail radio galaxy in the COSMOS field: evidence for cluster formation, arXiv:astro-ph/0610921v2
- [15] V. Smolčić, M. Novak, M. Bondi, P. Ciliegi, et. al., The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Continuum data and source catalog release, 2017A&A...602A...1S
- [16] Vijay Mahatma, Martin J. Hardcastle, Spectral ageing in the most powerful radio galaxies, University of Hertfordshire, September 2016