



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRORODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Uticaj interakcija galaksija na njihovo termalno i netermalno zračenje na velikim crvenim pomacima

-Master rad-

Student:
Marina Pavlović

Mentor:
Prof. dr Tijana Prodanović

Novi Sad, 2018.

What you must understand is that, as scientists, we must embrace every possibility. No limitations. No boundaries. There is no reason for them.

- dr. Walter Bishop

Sadržaj

-Uvod-	4
1. Daleka infracrvena- radio korelacija.....	5
1.1 Fizičke osnove i značaj korelacija	5
1.2 Posmatranje FIR-radio korelacijske	7
1.3 FIR-radio korelacija i polje zračenja.....	7
1.4 FIR-radio korelacija i magnetna polja	8
1.5 FIR-radio korelacija i stopa formiranja zvezda.....	8
2. FIR-radio korelacija u interagujućim sistemima.....	9
3. Zavisnost parametra FIR-radio korelacijske od metaličnosti	11
4. Ispitivanje zavisnosti FIR-radio korelacijske od morfologije galaksija	13
4.1 Podaci	13
4.1.1 Radio posmatranja na 3GHz i temperature sjaja	14
4.1.2 Morfologija galaksija.....	14
4.1.3 FIR i radio (1.4GHz) gustine flukseva	15
4.1.4 sSFR	16
4.1.5 Ranija ispitivanja zavisnosti parametra q_{FIR} od crvenog pomaka.....	16
4.2 Rezultati i analiza	18
4.2.1 FIR-radio korelacija uzorka SMG galaksija na velikim crvenim pomacima	22
4.2.2 Zavisnost parametra q_{FIR} od crvenog pomaka z	23
- Zaključak -	32
Literatura.....	33
Biografija	35

-Uvod-

Još 1980. godina uočeno je u galaksijama gde se rađaju zvezde da postoji tesna linearna zavisnost između luminoznosti dalekog infracrvenog zračenja ($42\mu\text{m}-122\mu\text{m}$) i luminoznosti radio zračenja. Ova zavisnost nazvana je daleka infracrvena-radio korelacija (*eng: Far Infrared- Radio correlation - FIR-radio*).

Ova korelacija pokazala se kao moćno sredstvo za proučavanje mnogih astrofizičkih problema. U lokalnom delu svemira, FIR-radio korelacija koristi se da se empirijski kalibriše radio luminoznost kao indikator stope formiranja zvezda (*eng: Star Formation Rate-SFR*). Ova korelacija pomaže nam da detektujemo galaksije sa aktivnim galaktičkim jezgrom (*eng: Active Galactic Nuclei-AGN*), koje imaju mnogo veću gustinu fluksa u radio domenu u odnosu na gustinu fluksa u infracrvenom delu spektra. FIR-radio korelacija može da se upotrebi da bi se našla udaljenost do galaksija (Carilli & Yun et al. 1999) koje se nalaze na velikim crvenim pomacima ($z > 1$) i temperatura prašine (Chapman et al. 2005) luminoznih zvezdorodnih (*eng: Starburst*) galaksija nazvanih submilimetar galaksije (SMG¹)

Dalja istraživanja FIR-radio korelacijske pokazala su mala odstupanja od ove linearne zavisnosti kod sistema kao što su patuljaste galaksije ili galaksije koje imaju aktivno galaktičko jezgro, koje imaju višak radio ili infracrvene emisije. Takođe, pokazano je da se linearnost korelacijske ne održava i kod sistema koji imaju malu metaličnost, što će za naš rad biti značajno zato što proučavamo galaksije na velikim crvenim pomacima, što znači da su starije a samim tim imaju i malu metaličnost (Zavisnost FIR-radio korelacijske od metaličnosti biće detaljnije opisana u poglavljju 3).

U skorije vreme, proučavana je FIR-radio korelacija kod galaksija koje su u interakciji. Ovo je značajno zato što se očekuje kod ovih galaksija javljaju plimski udarni talasi, koji ubrzavaju kosmičko zračenje, te se samim tim povećava netermalna radio emisija i utiče na odstupanje FIR-radio korelacijske od linearnosti. Detaljan mehanizam interakcije između galaksija i uticaj na komponente zračenja biće prikazan u poglavljvu 2.

Poglavlje 4 posvećeno je našem istraživanju FIR-radio korelacijske u zavisnosti od morfološke galaksije. Cilj ovog rada je da se ispita kako će se FIR-radio korelacija menjati u zavisnosti od morfološkog tipa izabranih galaksija. Biće prikazana korelacija kod nepravilnih galaksija (koje su trenutno u sudaru, ili su već ranije doživele sudar ili bliski prolaz sa drugom galaksijom) i posebno kod diskolikih (spiralne, prečkaste...) galaksija. Rezultati našeg rada biće upoređeni sa radom Delhaize et al. 2017, u kome je prikazana FIR-radio korelacija na velikim crvenim pomacima ($0 < z < 6$), za uzorak od 12333 SMG galaksija, među kojima su i nepravilne i diskolike galaksije. Cilj ovog poređenja je da ispitamo kako interakcija između galaksija utiče na promenu u linearnosti FIR-radio korelacijske.

¹ SMG- podvrsta ultraluminoznih galaksija, sa luminoznošću u infracrvenom delu od $L_{IR} > 10^{12}L_0$, gde je L_{IR} infracrvena luminoznost galaksije a L_0 je luminoznost Sunca

1. Daleka infracrvena- radio korelacija

Tesna linearna veza između radio i infracrvenog zračenja, ustanovljena je još 1980. godine, za spiralne galaksije. Infracrveno zračenje je termalno i dominantno potiče od prašine zagrejane UV zračenjem mladih zvezda, dok je radio zračenje netermalne prirode, gde je dominantno sinhrotronsko zračenje elektrona kosmičkog zračenja ubrzanih u ostacima supernovih. Na visokim radio frekvencijama, pored netermalnog i termalnog radio zračenja iz HII regiona dobija značajnu ulogu. Kako obe komponente, i IR (infracrveno) i radio zračenje, vode poreklo od masivnih zvezda, ova korelacija je veoma korisna prilikom proučavanja samog procesa formiranja zvezda. Ova korelacija ne važi samo u lokalnom delu svemira, već i kod objekata sa crvenim pomakom $z \sim 1 - 3$, gde je z crveni pomak galaksije. Na velikim crvenim pomacima, kao dodatak sinhrotronskom zračenju, gubitak energije zbog inverznog Komptonovog rasejanja o mikrotalasnu pozadinu ima značajnu ulogu.

FIR-radio korelacija definisana je preko parametra q_{FIR} koji određuje razliku između gustine fluksa dalekog infracrvenog zračenja i gustine fluksa radio zračenja kao:

$$q_{FIR} = \log\left(\frac{FIR}{3.75 \times 10^{12} \text{Wm}^{-2}}\right) - \log\left(\frac{S_{1.4\text{GHz}}}{\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}}\right) \quad (1.1)$$

gde je FIR gustina fluksa dalekog infracrvenog zračenja od $42\mu\text{m}$ do $122\mu\text{m}$. $S_{1.4\text{GHz}}$ je gustina fluksa radio zračenja na 1.4GHz . Konstanta 3.75×10^{12} predstavlja srednju frekvenciju dalekog infracrvenog zračenja (na $80\mu\text{m}$) i uvedena je iz dimenzionih razloga.

1.1 Fizičke osnove i značaj korelacije

Smatra se da je glavni uzrok empirijski uočene korelacijske veze između infracrvene i radio emisije u galaksijama, formiranje masivnih zvezda. Masivne zvezde ($M > 8M_0$, gde je M masa zvezde, a M_0 masa Sunca) su glavni izvor zagrevanja međuzvezdane prašine putem UV zračenja, kako lokalne u HII regionima tako i difuzno raspoređene prašine u međuzvezdanom prostoru. Masivne zvezde su, takođe, odgovorne za radio emisiju, i to na dva načina: one emituju fotone koji mogu da ionizuju i proizvode termalnu radio emisiju u HII regionima. Kada masivna zvezda, na kraju svog života, eksplodira u vidu supernove, njen ostatak, putem udarnih talasa, ubrzava elektrone kosmičkog zračenja koji u međuzvezdanom magnetnom polju emituju radio sinhrotronsko zračenje.

Iako je bazična veza jasna, koraci od formiranja masivnih zvezda, pa sve do emisije radio zračenja sa jedne strane, odnosno infracrvenog zračenja sa druge strane, nisu potpuno direktni, već uključuju i znatan broj drugih parametara. Za infracrveno zračenje, glavni dodatni parametar je neprozračnost prašine u disku galaksije, koja je za patuljaste galaksije koje imaju malo prašine dosta manja nego kod galaksija koje imaju veliku stopu stvaranja zvezda, čiji je sloj prašine optički veoma debeo (neprozračan). Radio zračenje se bazira na još kompleksnijim procesima. Ovo zračenje se sastoji od dve radio komponente koje nastaju u potpuno različitim procesima: zakočno zračenje termalnih elektrona (termalno radio zračenje) u HII regionima i sinhrotronsko zračenje koje nastaje ubrzavanjem elektrona kosmičkog zračenja u magnetnom polju. Kada posmatramo frekvencije reda veličine 1GHz (10^9Hz), sinhrotronsko zračenje dominira. Ono nastaje kada kosmičko zračenje je ubrzano u

ostatku supernove, gubi energiju usled kretanja u magnetnom polju i emituje sinhrotronsko zračenje. Kod spiralnih galaksija ovi gubici energije odlaze na inverzno Komptonovo i sinhrotronsko zračenje, dok kod zvezdorodnih galaksija koje poseduju mnogo veće količine gasa nego spiralne galaksije i koje imaju veliku stopu stvaranja zvezda, zakočno zračenje, ionizacija i gubljenje energije na adijabatske procese postaju izražajni. Najvažniji fizički parametri, kod emisije sinhrotronskog zračenja jesu jačina magnetskih polja, gustina gasa u međuzvezdanoj sredini i difuzne i konvekcione brzine gasa. Kada uzmemo u obzir sve ove kompleksne zavisnosti između prvočitne masivne zvezde i rezultujućeg infracrvenog i radio zračenja jako je teško razumeti kako je korelacija između infracrvenog i radio zračenja toliko postojana i univerzalna.

Korelacija između infracrvenog i radio zračenja ima velike primene kako smo ranije već rekli. Veza između radio zračenja i formiranja masivnih zvezda implicira da se emisija ovog zračenja može iskoristiti da bi se odredila brzina formiranja zvezda u nekoj galaksiji. Druge metode koje se koriste da bi se odredila brzina formiranja zvezda, kao što je H α emisija ili UV zračenje, daju veoma nesigurne rezultate zbog toga što prašina apsorbuje ovo zračenje, a teško je odrediti korekciju apsorbovanog zračenja od strane praštine. Zračenje u srednjem infracrvenom delu spektra (8μm-42μm), koja se takođe koristi kao indikator formiranja zvezda, zajedno sa drugim metodama kao što je metoda preko UV zračenje, nije podložno apsorpciji na međuzvezdanoj praštini. Međutim, ovakva vrsta posmatranja mora biti obavljena u svemiru, što znači sa svemirskih teleskopa (Spitzer, Herschel), koji imaju ograničenu uglovnu rezoluciju. Radio zračenje izbegava oba ova problema. Na njega ne utiče međuzvezdana prašina i posmatranja se mogu obaviti sa Zemlje, gde posmatranja možemo izvršiti pomoću većih teleskopa te čemo kao posledicu imati veću uglovnu rezoluciju. Korelacija infracrvenog i radio zračenja može se upotrebiti kao fotometrijski indikator crvenih pomaka, preko radio-submilimetarskog odnosa. Iz navedenih razloga jako je bitno da bolje razumemo fizičke procese koji dovode do pojave ove korelacije.

Da bismo izračunali brzinu formiranja zvezda na osnovu infracrvenog i UV zračenja, koristimo sledeće relacije

$$SFR_{IR}[\text{M}_0\text{yr}^{-1}] = 1.7 \times 10^{-10} L_{IR}[L_0] \quad (1.2)$$

$$SFR_{UV}[\text{M}_0\text{yr}^{-1}] = 1.13 \times 10^{-28} L_{UV}[\text{erg s}^{-1}\text{Hz}^{-1}] \quad (1.3)$$

gde je L_{IR} luminoznost u infra crvenom delu (8-1000μm) data u jedinici L_0 (luminoznost Sunca), a L_{UV} luminoznost u UV (1-380nm) delu spektra. Ukupna SFR je onda data kao

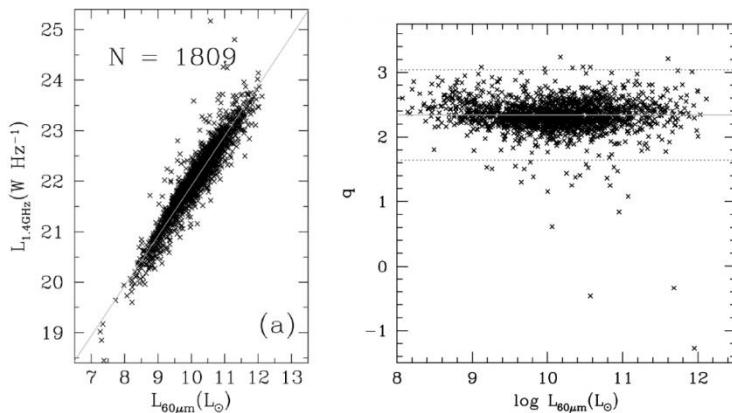
$$SFR = SFR_{IR} + SFR_{UV} \quad (1.4)$$

Ako prepostavimo da važi FIR-radio korelacija, merenjem gustine fluksa infracrvenog zračenja možemo odrediti gustinu fluksa radio zračenja na 1.4GHz. Kada želimo da izračunamo SFR preko gustine fluksa radio zračenja, koristimo relaciju

$$SFR_{1.4}[\text{M}_0\text{yr}^{-1}] = 5.9 \times 10^{-22} L_{1.4} \quad (1.5)$$

1.2 Posmatranje FIR-radio korelacije

FIR-radio korelacija testirana je na mnogim galaksijama. Dosadašnji rezultati su pokazali da se korelacija održava kod svih galaksija u lokalnom svemiru, u odnosu na njihov morfološki tip i stopu formiranja zvezda. Jedini izuzetak gde se korelacija narušava su predstavljale galaksije kod kojih se kosmičko zračenje ubrzava i van ostataka supernovih, kao što su galaksije sa aktivnim galaktičkim jezgrima, i kod galaksija koje se sudsaraju. FIR-radio korelacija je približno linearna (grafik 1). Na niskim luminoznostima, situacija nije potpuno jasna. Neka istraživanja pokazuju da se korelacija zadržava čak i kod patuljastih galaksija.



Grafik 1: Primer FIR-radio korelacije. Levo: Radio luminoznost na 1.4 GHz u zavisnosti od IR luminoznosti ($60\mu\text{m}$) uzete iz IRAS baze podataka. Desno: raspodela veličine q (q_{FIR}) u zavisnosti od IR luminoznosti na $60\mu\text{m}$. $L_{60\mu\text{m}}$ je luminoznost IR emisije na $60\mu\text{m}$ u jedinicama L_\odot . Puna linija predstavlja srednju vrednost veličine, dok isprekidane predstavljaju standardnu devijaciju. Objekti koji imaju višak radio emisije (ispod donje isprekidane linije) verovatno potiču od galaksija sa aktivnim galaktičkim jezgrima. (Lisenfeld et al. 2015.)

Pored istraživanja kod lokalnih galaksija, FIR-radio korelacija je testirana i na velikim crvenim pomacima ali za sada nemamo jasne dokaze da se ona održava i u ovim oblastima. Nekoliko istraživanja pokazuju, da se ona održava do crvenih pomaka veličine $z = 1$ do $z = 2$, dok za veće pomake tipa $z = 3$ do $z = 6$ postoji samo nekoliko manje pouzdanih merenja.

1.3 FIR-radio korelacija i polje zračenja

Polje zračenja je jedna od veličina koja određuje zagrevanje prašine. Polje zračenja se napaja kako od regiona u kojima se formiraju zvezde tako i od starih zvezda malih masa, te može poslužiti u određivanju parametra q_{FIR} . Upoređivanjem korelacije iz oblasti u kojima se formiraju zvezde i iz oblasti gde polje zračenja potiče od međuzvezdane sredine, može se proceniti sam nagib korelacije i istraživanja pokazuju da je u međuzvezdanom prostoru taj nagib zaista manji nego kod regiona u kojima se stalno formiraju zvezde. Bitno je naglasiti da se u i međuzvezdanoj sredini FIR-radio korelacija održava, samo ima manji nagib.

Rasipanje parametra q_{FIR} iz FIR-radio korelacije ukazuje na to da nagib korelacije nije konstantan. Veća vrednost ovog parametra koju uočavamo u spiralnim granama mnogo više nego u unutrašnjosti galaksije, ukazuje na to da je u ovakvim regionima i veći nagib same korelacije. Jaka veza između parametra q_{FIR} i SFR (što ćemo pokazati u sledećem odeljku) ukazuje na to da je nagib korelacije veći i u regionima u kojima se formiraju zvezde.

1.4 FIR-radio korelacija i magnetna polja

Istraživanja spiralnih grana galaksija ukazuju da u ovim oblastima dolazi do odstupanja od linearnosti kod FIR-radio korelacije i na višak sinhrotronskog zračenja u odnosu na infracrveno, zbog povećanog formiranja zvezda u ovakvim regionima. To znači da formiranje zvezda ima drugačiji uticaj na radio u odnosu na infracrveno zračenje, ili pak da neki drugi mehanizam određuje sinhrotronsko zračenje. Sinhrotronsko zračenje je funkcija jačine magnetnog polja i koncentracije elektrona iz kosmičkog zračenja. To znači da ako koristimo sinhrotronsko zračenje da bismo odredili stopu formiranja zvezda, magnetna polja i koncentracija elektrona postaju direktno povezani sa formiranjem zvezda. Supernove utiču i na koncentraciju elektrona u kosmičkom zračenju koje se ubrzava u ostacima supernovih, i na jačinu magnetnog polja koje nastaje u udarnim talasima u regionima u kojima se formiraju zvezde. Međutim kosmički zraci se kasnije kreću daleko od mesta ostataka supernovih, kroz međuzvezdanu sredinu, u kojoj postoji uniformno magnetno polje. Ovakvo magnetno polje nije nikako povezano sa regionima u kojima se formiraju zvezde.

1.5 FIR-radio korelacija i stopa formiranja zvezda

U ovom odeljku pokazaćemo kako pomoću parametra q_{FIR} možemo odrediti SFR. Pre svega moramo definisati površinsku gustinu formiranja zvezda ($\Sigma_{SFR} [\text{M}_0 \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}]$), kao stopu formiranja zvezda na površini od kpc^2 . Ova veličina određuje se preko luminoznosti H_α emisije, i mi nećemo u ovom radu zalaziti u detaljan opis njenog određivanja, samo ćemo navesti najbitnije relacije. Luminoznost H_α emisije (L_{H_α}) se može povezati sa SFR preko empirijske jednačine utvrđene na osnovu posmatranja:

$$SFR [\text{M}_0 \text{yr}^{-1}] = 5.37 \times 10^{-42} L_{H_\alpha} [\text{erg s}^{-1}] \quad (1.6)$$

Površinska gustina formiranja zvezda može se povezati sa odnosom sinhotronskog i infracrvenog zračenja, ako prepostavimo da je sinhronsko netermalno zračenje dominantni oblik radio zračenja, na sledeći način (Schleicher et al. 2016):

$$\frac{L_s}{L_{th}} \propto \Sigma_{SFR}^{\frac{1}{3}} \quad (1.7)$$

gde je L_s luminoznost sinhotronskog a L_{th} luminoznost infracrvenog zračenja.

Sada možemo naći stepeni zakon koji nam pokazuje kako parametar q_{FIR} iz FIR-radio korelacije zavisi od stope formiranja zvezda.

$$q_{FIR} \propto (0.115 \pm 0.003) \log \Sigma_{SFR} \quad (1.8)$$

Vidimo da na vrlo jednostavan način, pomoću FIR-radio korelacije, možemo naći stopu formiranja zvezda u nekom regionu. Bitno je da se naglasi da je ovo jedna od najbitnijih primena FIR-radio korelacije i da je jako važno da je što bolje proučimo i da objasnimo njen poreklo.

2. FIR-radio korelacija u interagujućim sistemima

Uprkos mnogim istraživanjima koja ukazuju da je FIR-radio korelacija uglavnom linearna, postoji nekoliko posmatranja, kako na velikim tako i na manjim crvenim pomacima, koji se sa ovom konstatacijom ne slažu. Na primer, posmatranja galaksija koje se nalaze u bogatim jatima pokazuju da linearna FIR-radio korelacija u ovim galaksijama varira. Takođe, posmatranja dalekih galaksija u kojima se aktivno formiraju zvezde i posmatranja submm (submilimetar) galaksija ukazuju na povećanu radio luminoznost u odnosu na lokalnu FIR-radio korelaciju. Ovo nam govori da se korelacija u nekim regionima definitivno ne održava. Ovo odstupanje od linearnosti FIR-radio korelacije potiče od mlađih aktivnih galaktičkih jezgara, od jakih magnetnih polja u galaksijama u kojima se aktivno formiraju zvezde, ili od galaksija koje se trenutno nalaze u interakciji.

Pomeranje od tipične FIR-radio korelacije, i višak radio emisije, uočen je i u slučajevima takozvanih „Taffy“ galaksija (galaksije koje međusobno interaguju i formiraju most od gasa sa jakom sinhrotronskom emisijom, videti sliku 1). Višak radio zračenja (netermalnog) se verovatno javlja zbog ubrzanja nanelektrisanih čestica u jakim udarnim talasima koji nastaju u mostu između galaksija koje interaguju. Odstupanje od korelacije se najverovatnije javlja i u samim galaksijama zbog jakih udarnih talasa, a ne samo u mostu između njih.



Slika 1. Sudar galaksija koje čine takozvani „Taffy“ sistem.

Udarni talasi koji se javljaju prilikom interakcije galaksija (sudara i bliskih prolaza) uzrokuju povećano formiranje zvezda (povećanu SFR). Skorije hipoteze kažu da ovakvi udarni talasi koji nastaju prilikom ovakvih interakcija, povećavaju populaciju takozvanih plimskih kosmičkih zraka (*eng. Tidal Cosmic rays-TCR*). Ovi kosmički zraci mogu potencijalno da utiču na nukleosintezu lakih elemenata, kao što je litijum. Jasno je da će prisustvo kosmičkih zraka takođe uticati i na povećano radio zračenje. Sve ove pojave će naravno uticati i na disperziju u FIR-radio korelaciji.

Za razliku od galaktičkih kosmičkih zraka, TCR nisu posledica eksplozije masivnih zvezda te nisu povezani sa stopom formiranja zvezda. Iako usled interakcija galaksija dolazi do rasta stope formiranja zvezda, ovo se dešava nešto kasnije, te je i sama smrt ovih novo formiranih zvezda kasnija u odnosu na interakciju. Baš zbog toga, najbolje je TCR identifikovati u ranoj fazi sudara galaksija. U ranoj fazi sudara se takođe očekuje i dodatno zagrevanje gase i praštine u plimskim talasima u poređenju sa onim što bi se očekivalo prilikom normalnog formiranja zvezda. Sa povećanim termalnim i netermalnim zračenjem, logično je zaključiti da će se i FIR-radio korelacija menjati. Parametar q_{FIR}^T u novim uslovima, gde postoji dodatna populacija plimskih kosmičkih zraka više neće biti isti kao parametar q_{FIR} iz klasične korelacije. Kada postaje dodatni plinski kosmički zraci, očekuje se da će parametar q_{FIR}^T imati sledeći izgled

$$q_{FIR}^T = \log \frac{F_{FIR} + F_{FIR}^T}{S_{1.4} + S_{1.4}^T} \quad (2.1)$$

gde je sada F_{FIR}^T dodatni fluks infracrvenog zračenja nastao usled zagrevanja zbog plimskih udarnih talasa, dok je $S_{1.4}^T$ dodatni fluks radio zračenja nastao zbog dodatnih plimskih kosmičkih zraka. Ako prepostavimo da je efekat plimskih udarnih talasa mala perturbacija već postojećih efekata, odnosno da je $F_{FIR}^T/S_{1.4}^T < F_{FIR}/S_{1.4}$ imaćemo da je $q_{FIR}^T < q_{FIR}$. Bitno je naglasiti da su Donevski & Prodanović 2015. ovo izveli samo za interakcije galaksija u ranoj fazi, te da moramo dalje istraživati kako će se ovaj parametar menjati kako interakcija između galaksija napreduje.

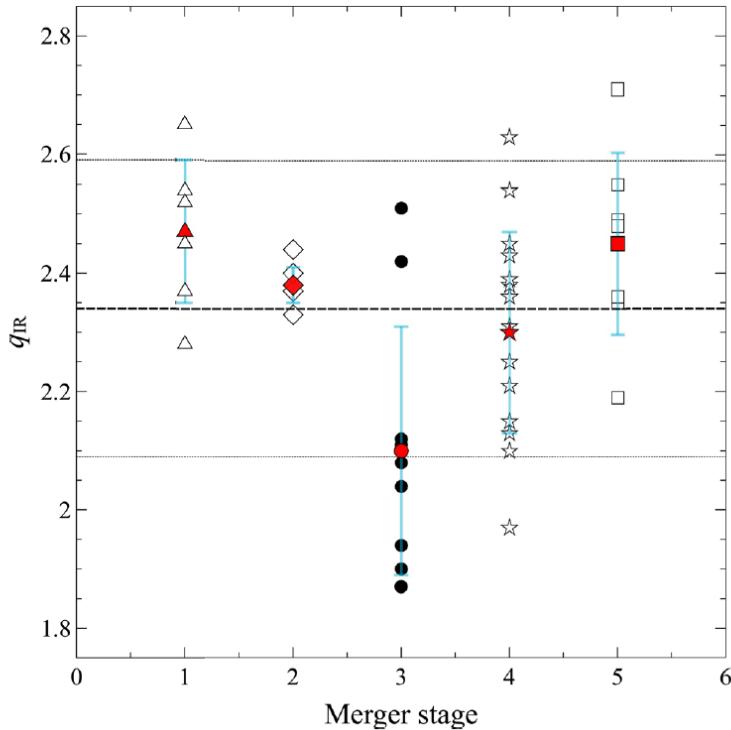
Na uzorku od 43 galaksije, veoma svetle u infracrvenom delu spektra, koje imaju gustinu fluksa na $60\mu m$ od $2.5Jy$ i infracrvenu luminoznost od $L_{IR} \geq 10^{10.5}L_0$, izvršeno je istraživanje kako se parametar FIR-radio korelacije menja u odnosu na epohu interakcije galaksija (Donevski & Prodanović 2015). U kojem stadijumu spajanja se date galaksije nalaze, možemo videti u tabeli ispod.

Rezultate rada možemo videti na grafiku (Grafik 2).

Stadijum sudara	Simbol	Opis
0	Nema	Nema sudara
1	Δ	Epoha pre sudara, dve odvojene galaksije
2	\diamond	Sudar u toku, rana faza. Vidljive obe galaksije
3	\bullet	Sudar u toku. Vidljive obe galaksije sa zajedničkim okolnim gasom
4	*	Sudar u toku, kasna faza. Vidi se jedna galaksija sa dva jezgra i repom
5	\square	Posle sudara. Jedna galaksija sa jednim jezgrom i repom. Nepravilna galaksija
6	Nema	Posle sudara, kasna faza. Jedna galaksija sa jednim jezgrom i slabim repom

Sudar	Simbol	q_{FIR}	α
1	Δ	2.47 ± 0.12	0.69 ± 0.171
2	\diamond	2.38 ± 0.03	0.56 ± 0.185
3	\bullet	2.09 ± 0.21	0.92 ± 0.19
4	*	2.31 ± 0.17	0.79 ± 0.22
5	\square	2.44 ± 0.15	0.51 ± 0.16

Tabela 1 (gore): Klasifikacija stadijuma spajanja na osnovu Haan et al. (2011) i njihovi simboli koji su korišćeni na grafiku (grafik 2). Tabela 1 (dole): FIR-radio parametar i radio spektralni indeks α izračunati posebno za svaki stadijum interakcije.



Grafik 2: Parametar q_{IR} (q_{FIR}) FIR-radio korelacije za uzorak od 43 para interagujućih galaksija u kojima se formiraju zvezde, koje su označene kao u tabeli 1. Isprekidana linija predstavlja srednju vrednost parametra (Yun et al. 2001), dok tačkaste linije predstavljaju standardnu devijaciju. (Donevski & Prodanović 2015.)

Ono što su Donevski i Prodanović zaključili jeste da samo u stadijumima sudara 4 i 5 (videti tabelu radi objašnjenja), parametar FIR-radio korelacije, poklapa se sa globalnom vrednošću od $q_{FIR} = 2.34 \pm 0.01$, a da u ostalim stadijuma sudara ovaj parametar ima dosta različitu vrednost. Ono što se čini, jeste da kod galaksija koje su u bliskom prolazu ili koje su u najranijem stadijumu sudara, parametar korelacije ima veću vrednost od srednje, koji kreće da opada u kasnijim stadijumima, i dostiže svoj minimum u trećem stadijumu sudara, nakon čega opet počinje da raste.

3. Zavisnost parametra FIR-radio korelacije od metaličnosti

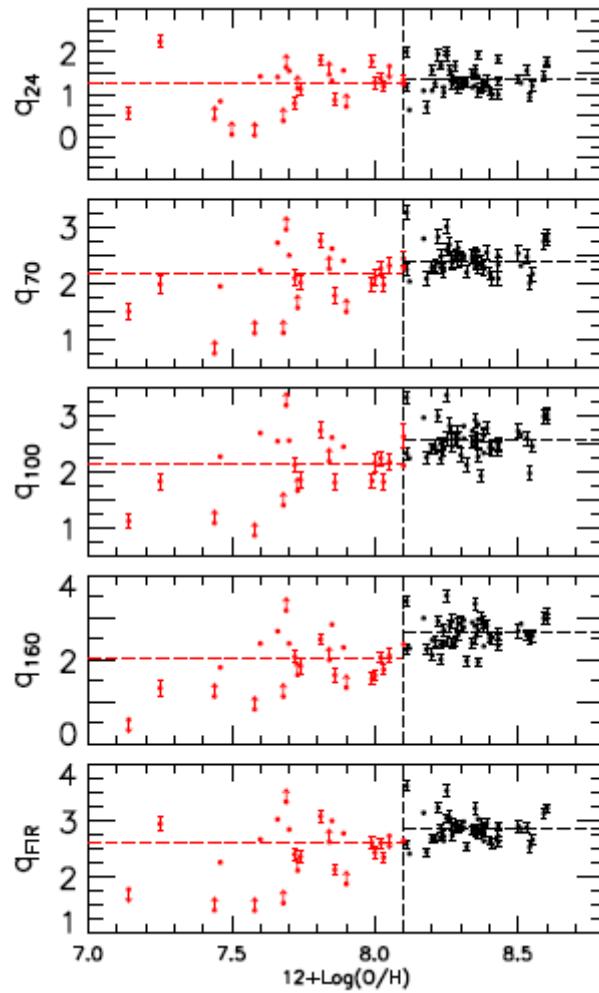
Pod pojmom metaličnost podrazumeva se zastupljenost hemijskih elemenata težih od helijuma u posmatranom sistemu. Metaličnost se određuje u odnosu na neki standard i to je obično vodonik (mada se može određivati i u odnosu na druge hemijske elemente, kada na primer određujemo meteorsku zastupljenost, radi se u odnosu na 10^6 atoma silicijuma). Metaličnost predstavlja odnos koncentracije atoma nekog elementa n_i i koncentracije atoma vodonika n_H . U praksi se najčešće koristi logaritamska notacija, a zastupljenost ε_i nekog elementa u odnosu na 10^{12} atoma vodonilka se može izraziti kao:

$$\varepsilon_i \equiv \log_{10} n_i = \log_{10} n_H + \log_{10} \left(\frac{n_i}{n_H} \right) = 12 + \log_{10} \left(\frac{n_i}{n_H} \right) [\text{dex}] \quad (3.1)$$

pri čemu je $\log_{10} n_H \equiv 12$. U praksi se koncentracije atoma obeležavaju oznakom samog hemijskog elementa. Jedinica za metaličnost je dex, odnosno dekadni eksponent (10^x).

Dosadašnji radovi, gore pomenuti, fokusirali su se uglavnom na galaksije u kojima se formiraju zvezde i koje imaju metaličnost reda solarne metaličnosti. Patuljaste galaksije koje imaju mali procenat metala, i koje predstavljaju gradivne jedinice za stvaranje masivnijih galaksija na velikim crvenim pomacima, su mnogo brojnije od dosadašnjih posmatranih galaksija. FIR-radio korelacija je veoma dobar alat za proučavanje fizičkih procesa, uključujući formiranje zvezda, zagrevanje praštine, kosmičko zračenje, magnetna polja i mnoge druge, koji se dešavaju u međuzvezdanom prostoru u galaksijama. Ali, šta se dešava sa FIR-radio korelacijom kada je posmatrana galaksija siromašna metalima?

Istraživanje na 26 galaksije koje imaju malu metaličnost reda $12 + \log(O/H) < 8.1$ iz 2017. godine pokazuju sledeće rezultate (Shi et al. 2017.). (grafik 3)



Grafik 3: Zavisnost parametra q_{FIR} iz FIR-radio korelacijske od metaličnosti, na različitim talasnim dužinama. Crvene tačke predstavljaju slabo metalične galaksije, a crne tačke predstavljaju galaksije koje su bogate metalima. Vertikalna isprekidana linija pokazuje vrednost $12 + \log(O/H) = 8.1$, dok dve horizontalne linije predstavljaju srednju vrednost parametra kod galaksije sa malom metaličnošću (crvena isprekidana linija), i kod galaksija bogatih metalima (crna isprekidana linija). (Shi et al. 2017.)

Na grafiku 3. je prikazana zavisnost parametra q_{FIR} od metaličnosti galaksije, odnosno u zavisnosti od zastupljenosti kiseonika, za talasne dužine od dalekog do bliskog infracrvenog zračenja ($q_{24\mu\text{m}}$, $q_{70\mu\text{m}}$, $q_{100\mu\text{m}}$, $q_{160\mu\text{m}}$).

Ono što sa grafika možemo zaključiti je da je $q_{24\mu m}$ za galaksije sa ekstremno malom metaličnošću nešto viši u odnosu na galaksije visoke metaličnosti ($q_{FIR} = 1.34 \pm 0.05$) zbog emisije vrele prašine koja dostiže svoj maksimum na $24 \mu m$, za neke od galaksija iz posmatranog uzorka, dok je za druge dosta niži od srednje vrednosti.

Kada posmatramo vrednost $q_{70\mu m}$, vidimo da je on u celoj oblasti, za sve posmatrane uzorke, niži od srednje vrednosti ovog parametra kod galaksija sa visokom metaličnošću, i to tako da je njegova srednja vrednost kod nisko metaličnih galaksija za 0.26 ± 0.09 dex manja od srednje vrednosti parametra kod galaksija velike metaličnosti. Nisku vrednost FIR-radio korelacije možemo videti i za $100\mu m$ i $160\mu m$. U poslednjem delu slike, vidimo zavisnost ukupnog parametra q_{FIR} od metaličnosti, koji ukazuje vrednost nižu za 0.24 ± 0.09 od srednje vrednosti ovog parametra kod galaksija visoke metaličnosti.

Mogući mehanizam koji bi objasnio ovakvo ponašanje parametra FIR-radio korelacije na niskoj metaličnosti gde ima manje prašine koja se greje UV zračenjem masivnih zvezda, te je smanjeno i infracrveno zračenje, što bi svakako uticalo na promenu SFR u ovakvim sistemima. Zavisnost parametra q_{FIR} od metaličnosti pokazan je zato što ćemo se u ovom radu osvrnuti sistemima koji se nalaze na visokim crvenim pomacima, što znači da su to stariji sistemi, koji imaju manju metaličnost od sistema koje smo ranije opisivali.

4. Ispitivanje zavisnosti FIR-radio korelacije od morfologije galaksija

U ovom radu biće predstavljeno istraživanje FIR-radio korelacije (odnosno parametar q_{FIR} iz FIR-radio korelacije) na uzorku od 37 SMG galaksija, od kojih su 11 galaksije po morfologiji nepravilne dok je 26 galaksija diskolikih (Miettien et al. 2017. videti tabelu 1). Galaksije označene kao C22a i C22b su sigurno u sudaru, što je potvrđeno iz mapa u radio oblasti snimljenih na 3GHz (slika 2, poglavljje 4) na kojoj se jasno vidi luk u radio oblasti nastao interakcijom. Cilj ovog istraživanja jeste da se utvrdi kako parametar q_{FIR} zavisi od morfologije galaksija. Kako je rečeno i u poglavljju 2 (Donevski & Prodanović 2015), parametar q_{FIR} iz FIR-radio korelacije će se svakako menjati kada su galaksije u interakciji. Za razliku od rada Donevski & Prodanović (2015), galaksije iz našeg uzorka se nalaze na velikim crvenim pomacima, te je fitovanje parametra q_{FIR} u odnosu na crveni pomak z vršeno kao i u radu (Delhaize et al. 2017.) u kome su prikazane galaksije sa crvenim pomacima $z < 6$, ali u obzir nije uzeta i interakcija između galaksija.

4.1 Podaci

Galaksije iz našeg uzorka su prvo bitno detektovane pomoću posmatranja na $\lambda_{obs} = 1.1\text{mm}$ na površini od 0.72deg^2 , odnosno 35% od ukupne površine (2deg^2) sa COSMOS (eng: *The Cosmic Evolution Survey*) pregleda neba sprovedenog AzTEC bolometrijskim nizom na Atacama Submilimetar Telescope Experiment (ASTE; Ezawa et al. 2004). Ugaona rezolucija ovih posmatranja je bila $34''\text{FWHM}$.

Bitno je naglasiti da je galaksija C61 detektovana pomoću Very Large Baseline Array (VLBA) sa visokom rezolucijom od $16.2 \times 7.3 \text{ miliarcs}^2$ na $\nu_{obs} = 1.4\text{GHz}$. Gustina fluksa

galaksije na datoј frekvenciji je izračunata i iznosi $S_{1.4GHz} = 11.1 \text{ mJy}$, što nam ukazuje ili na prisustvo aktivnog galaktičkog jezgra ili na veoma kompletno zvezdorodno jezgro, ili pak na oba ova slučajeva, te smo galaksiju C61 isključili iz daljeg istraživanja.

4.1.1 Radio posmatranja na 3GHz i temperature sjaja

Korišćena radio posmatranja na 3GHz su uzeta iz VLA-COSMOS 3GHz Large Project (Smolčić et al.2017).

Mereni fluksevi na 3GHz (S_ν) su upotrebljeni za izračunavanje temperature sjaja T_b definisane preko Rejli-Džinsove aproksimacije kao:

$$T_b = \frac{c^2}{2k_B\nu^2} \frac{S_\nu}{\Omega} = 1.22 \times \left(\frac{\nu}{\text{GHz}}\right)^{-2} \left(\frac{S_\nu}{\mu\text{Jy}}\right) \left(\frac{\theta_{maj}}{''}\right)^{-2} [\text{K}] \quad (4.1)$$

gde je k_B Boltzmanova konstanta, Ω je prostorni ugao pod kojim se objekat vidi, i koji zavisi od ugla θ_{maj} koji predstavlja uglovnu veličinu objekta na nebu.

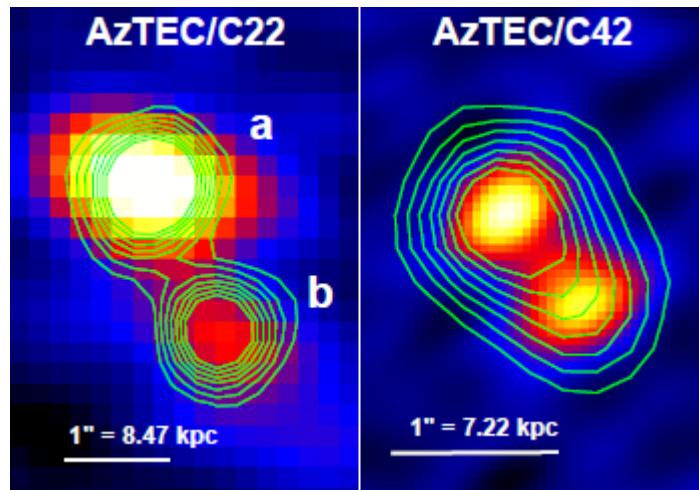
ID	CC ^a	TC ^b	ZSMC ^c	Morphology ^d
C9b	disk	disk	...	disk
C12	Irr	disk	...	Irr ^e
C18	Irr	Irr
C19	disk	disk	disk	disk
C22a	disk	disk	disk	disk
C23	disk	disk	...	disk
C25	...	Irr	...	Irr
C28a	disk	disk	...	disk
C36	Irr	Irr	disk	Irr
C44b	ETG	ETG	x ^f	ETG
C45	disk	Irr	disk	disk
C47	Irr	disk	...	Irr ^e
C48a	disk	disk	...	disk
C51b ^g	Irr	disk	disk	disk
C52	Irr	disk	disk	disk
C56	disk	ETG	...	disk ^e
C59	Irr	Irr	disk	Irr
C65	Irr	disk	disk	disk
C66	Irr	disk	disk	disk
C67	disk	disk	disk	disk
C84b	Irr	disk	Irr	Irr
C86	ETG	ETG	x ^f	ETG
C90c	...	disk	...	disk
C97a ^g	Irr	Irr	disk	Irr
C101b	Irr	disk	...	Irr ^e
C105	Irr	disk	...	Irr ^e
C112	Irr	Irr	...	Irr
C122a	Irr	Irr	disk	Irr
C126 ^g	Irr	Irr	...	Irr
C127	disk	disk	...	disk

4.1.2 Morfologija galaksija

Galaksije koje su po morfologiji klasifikovane kao nepravilne (njih 13), i kojima smo u ovom radu posvetili najviše pažnje, uzete su iz kataloga Zürich. Tabela 2 nam pokazuje klasifikaciju galaksije po morfologiji, a 13 galaksija koje smo mi koristili su označene kao irr (eng: irregular/nepravilne).

Tabela 2: Klasifikacija galaksija po morfologiji: irr označava nepravilne galaksije (eng: irregular), disk označava spiralne galaksije koje su u katalogu Cassata and Tasca označene kao diskolike, pa je termin održan. ETG (eng: early-type galaxy) su galaksije ranog tipa. (Miettien et al. 2017)

Od ostalih galaksija koje se nalaze u tabeli 2, velika pažnja posvećena je galaksijama C22 (a i b) i C42, koje su dobri kandidati za takozvani „Taffy“ sistem, odnosno interagujuće galaksije. Slika sa ALMA 1.3mm posmatranja galaksije C22 potvrđuje prisustvo dva tela koja emituju infra-crveno zračenje i nalaze se na razdaljini od 13.8 kpc. Obe galaksije su snimljene i na 3GHz radio emisije i potvrđen je most između njih, nastao interakcijom (videti sliku 2. levo).



Slika 2: ALMA posmatranja na 1.3mm dopunjena posmatranjem na 3GHz radio emisije za galaksije C22 i C42.

Galaksija C42 nije mogla biti lepo snimljena pomoću ALMA na 1.3mm, ali su dve komponente uhvaćene pomoću ALMA na većoj rezoluciji $\lambda_{obs} = 994\mu\text{m}$ (Cycle 1ALMA project 2012, A. Karim et al. 2012). Ono što je zaključeno iz posmatranja jeste da postoje dva tela koja emituju i u infracrvenom i u radio delu na 3GHz, na razdaljini od 5.3 kpc (slika 2, desno). Kako su galaksije C22 i C42 lepo razdvojene, to znači da se one nalaze u ranoj fazi sudara i da radio most koji detektujemo, potiče od jakog magnetnog polja između njih.

Iono et al. 2016. uspeo je galaksiju C4 da razdvoji na dve komponente, takođe pomoću ALMA na $\lambda_{obs} = 860 \mu\text{m}$. Zaključeno je da se galaksije nalaze u srednjoj fazi sudara na razdaljini od 1.5 kpc.

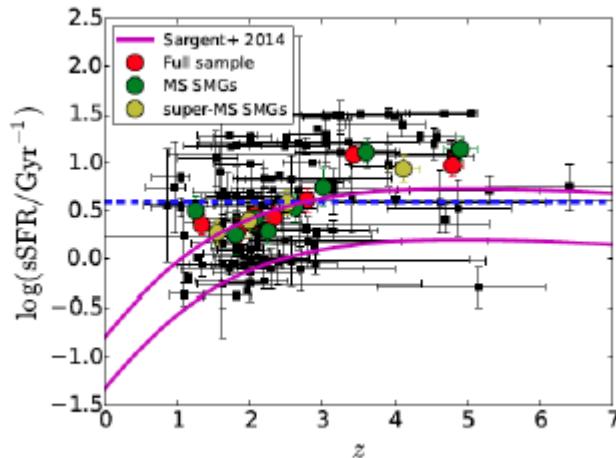
4.1.3 FIR i radio (1.4GHz) gustine fluksa

U ovom radu, koristili smo IR (24 μm , 100 μm , 160 μm i 250 μm) Herschel posmatranja infracrvenog zračenja (Pilbratt et al. 2010.).

U radio režimu, iskorišćene su VLA slike kontinuuma na 1.4GHz, uz dodatak gustine fluksa na 3GHz uzete iz baze VLA-COSMOS 3GHz Large Project. Gustine fluksa u radio i infracrvenom delu nalaze se u tabeli 5 za nepravilne i tabeli 6 za diskolike galaksije.

4.1.4 sSFR

Na grafiku 4. možemo videti sSFR (specifičnu stopu formiranja zvezda $sSFR[\text{Gyr}^{-1}]$) koja nam pokazuje trenutnu SFR aktivnost, kao funkciju crvenog pomaka (Miettinen et al. 2017). Možemo da zaključimo da se u oblasti od $z = 1$ do $z = 3$, sSFR povećava sa maksimumom na $z = 3$, te kasnije pokazuje plato na $z > 3$.

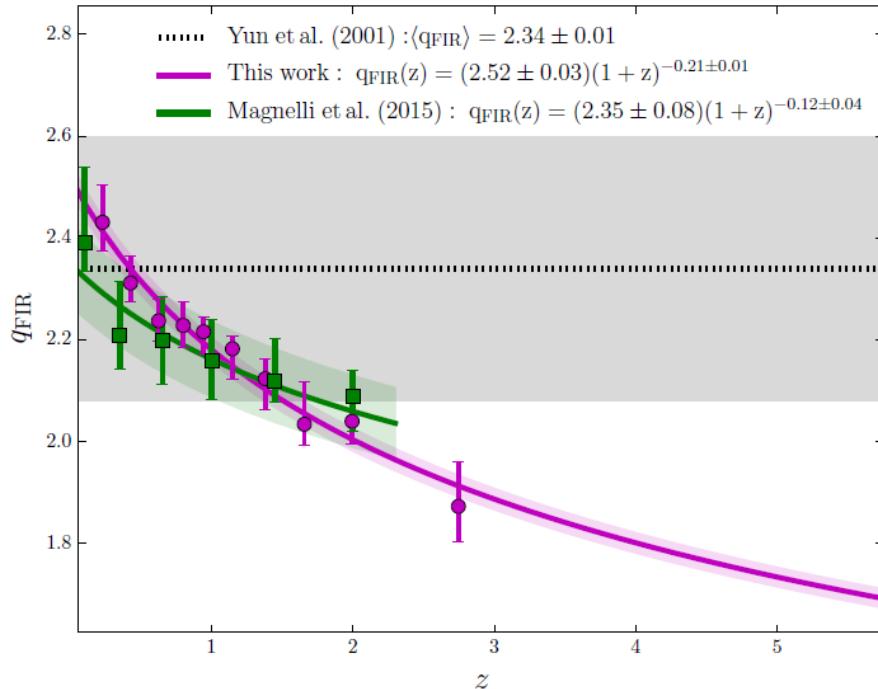


Grafik 4: sSFR u zavisnosti od z (Sargent et al. 2014) ljubičasta linija.

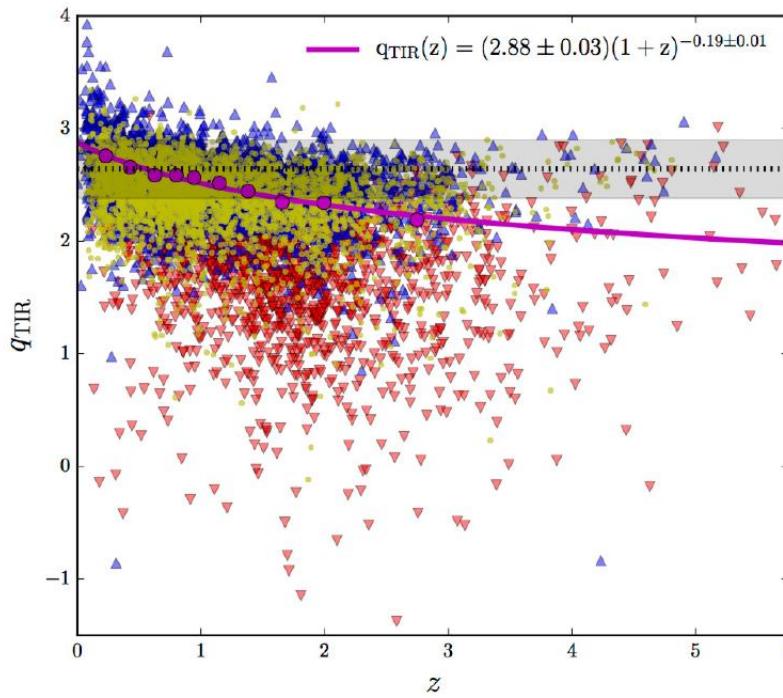
Pozitivna kriva $sSFR(z)$ nam ukazuje na povećanje mase gasa i gustine samog molekulskog gasa u ranijim epohama svemira. Fizički proces koji dovodi do ovoga je verovatno akreacija kosmičkih bariona u haloe tamne materije, koja je stepena funkcija oblika $\dot{M}_{\text{halo}}/M_{\text{halo}} \propto (1+z)^{2.5}$, gde je M_{halo} masa bariona koja se akreatuje u halo tamne materije (Bouché et al. 2010). Još specifičnije, evolucija sSFR može biti regulisana ugaonim momentom akreacionog gasa. Ako bi ugaoni moment materijala koji se kasnije nagomila bio veći na manjim crvenim pomacima ($z \leq 2$), akreacioni gas bi se nagomilavao u spoljašnjim delovima diska što bi rezultovalo manju površinsku gustinu akreatovanog gasa a samim tim i manju sSFR.

4.1.5 Ranija ispitivanja zavisnosti parametra q_{FIR} od crvenog pomaka

Da bismo rezulata našeg rada proverili i uporedili sa već postojećim istraživanjima, u ovom delu rada navećemo rezultate rada Delhaize et al. 2017. Delhaize et al. 2017 su na uzorku od 12333 SMG galaksija uočili da q_{FIR} parametar opada sa crvenim pomakom i to kao: $q_{FIR}(z) = (2.52 \pm 0.03)(1+z)^{-0.21 \pm 0.01}$. Rezultat do kojeg su došli u ovom radu, prikazan je na grafiku 5. i grafiku 6.



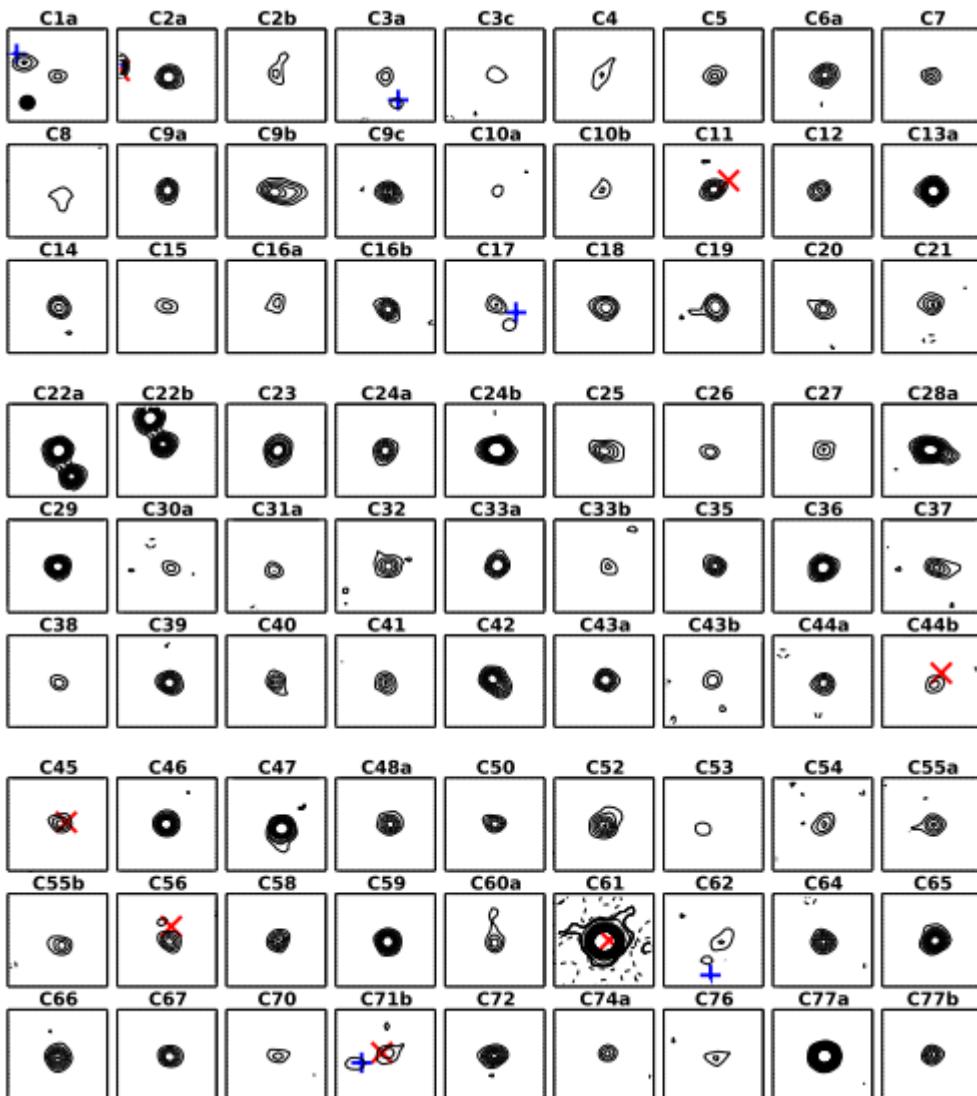
Grafik 5: Zavisnost parametra q_{FIR} od crvenog pomaka, gde je gustina fluksa infracrvenog zračenja računata u opsegu od $42\mu\text{m}$ do $122\mu\text{m}$, roze linija (Delhaize et al. 2017.) Evolucija parametra q_{FIR} od crvenog pomaka iz rada Magnelli et al. 2015 prikazana je zelenom linijom, dok su crne tačke i siva senka, srednja vrednost parametra $q_{FIR} = 2.34 \pm 0.01$ i standardna devijacija $\delta = 0.26$ respektivno, iz rada Yun et al. 2001.



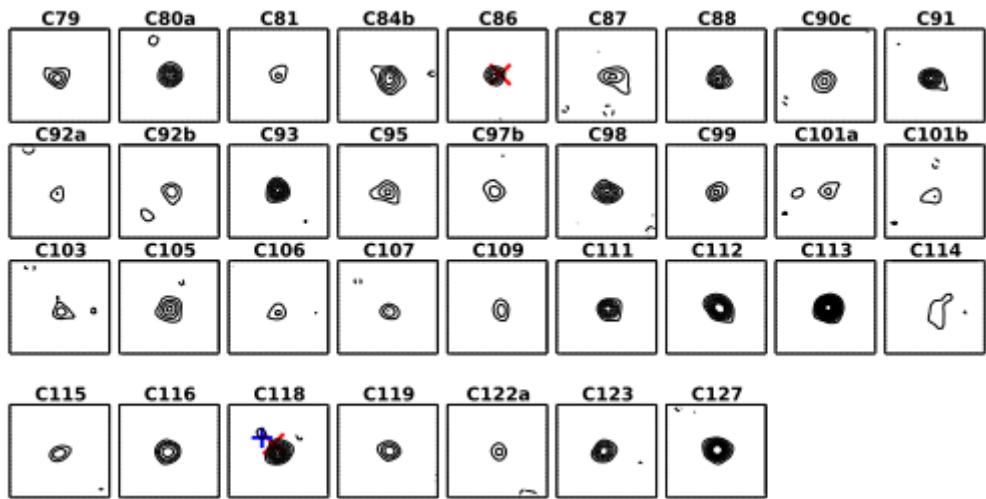
Grafik 6: Zavisnost parametra q_{TIR} (Parametar TIR-radio korelacijski računat korišćenjem ukupnog fluksa infracrvenog zračenja od $8\mu\text{m}$ - $1000\mu\text{m}$) od crvenog pomaka z , roze linija. Žuto su objekti koji su detektovani i u radio i u FIR delu spektra i korišćeni su za računanje parametra q_{TIR} . Crveni trouglovi su objekti koji su detektovani samo u radio domenu (1.4GHz) i predstavljaju gornju granicu parametra q_{TIR} , dok su plavi trouglovi objekti koji su detektovani samo u infracrvenom domenu (8 - $1000\mu\text{m}$) i predstavljaju donju granicu za vrednost parametra q_{TIR} . Crne tačke sa sivom senkom predstavljaju srednju vrednost parametra $q_{TIR}(z = 0) = 2.64 \pm 0.02$ (Bell et al. 2003), sa standardnom devijacijom $\delta = 0.26$. (Delhaize et al. 2017).

4.2 Rezultati i analiza

U ovom radu biće prikazano istraživanje vršeno na uzorku od 37 galaksija, od čega 11 galaksija koje su klasifikovane kao nepravilne i 26 diskolikih galaksija. Među 11 nepravilnih galaksija nalaze se 9 galaksija iz tabele 1. i galaksije C22a i C22b za koje smo potvrdili da su u sudaru (videti sliku 2, i objašnjenje). Za 4 nepravilne galaksije nismo uspeli da izračunamo parametar q_{FIR} zbog toga što luminoznosti (gustine flukseva) u radio i infracrvenom delu nisu sa sigurnošću određene ili su previse male. Takođe, iz uzorka od 49 diskolikih galaksija, za njih 23 nije izračunat parametar q_{FIR} te će se na graficima koji pokazuju rezultate ovog rada naći 11 nepravilnih i 26 diskolikih galaksija (tabele 3, 4, 5 i 6.). Na slici ispod (slika 3.) možemo videti mape svih navedenih galaksija snimljenih na 3GHz.



Slika 3. Mape korišćenih galaksija snimljene na 3GHz. Sve galaksije su usmerene kao: sever gore i zapad levo. Plavi i crveni krstići predstavljaju objekte snimljene u optičkom NIR (eng. Near infrared) i X delu zračenja, respektivno. (Miettien et al. 2017.)



Slika 3. Nastavak

Dve tabele ispod (tabela 3 i tabela 4.) sadrže osnovne podatke o datim galaksijama, kao što su njihove koordinate (α (h,m,s) i δ (°, ' , '')), crveni pomak (z), radio spektralni indeks (α , $S_\nu \propto \nu^\alpha$, gde je S_ν gustina fluksa radio zračenja na dатoj frekvenciji ν), temperaturre sjaja (T_b), temperaturu prašine T_d , odnos mase ukupnog gasa i prašine u galaksiji M_d/M_g , te ukupnu masu zvezda ($M [10^{10}M_0]$), sSFR [Gyr^{-1}] i SFR [$M_0\text{yr}^{-1}$].

Galaksija	Koordinate	z	A	T_b [K]	M [$10^{10}M_0$]	sSFR Gyr^{-1}	SFR $M_0\text{yr}^{-1}$	T_d [K]	M_d/M_g	
α (h,m,s)		δ (°, ' , '')								
C12	10 01 36.82	+02 11 10.06	3.25	> -0.77	12.3 ± 7.0	1.77827941	29.9	991	47	0.524808
C18	10 00 35.30	+02 43 53.27	3.15	-0.82 ± 0.34	18.0 ± 6.0	39.81072	6.1	2 421	42	0.275422
C36	09 58 40.29	+02 05 14.58	2.415	-0.99 ± 0.21	63.0 ± 21.3	15.13561	7.6	1 154	36	0.389046
C47	09 59 40.87	+02 01 13.25	2.0468	-1.49 ± 0.12	> 97.4	20.41738	2	404	42.5	0.645655
C52	10 01 56.57	+02 21 00.93	1.1484	-0.92 ± 0.36	9.4 ± 2.7	31.62278	0.6	203	34.3	0.549541
C59	10 00 30.14	+02 37 16.76	1.2802	-1.19 ± 0.14	> 59.2	23.44229	1	243	31.5	0.724433
C65	09 59 42.94	+02 21 44.91	1.798	-0.91 ± 0.20	47.0 ± 12.8	58.88437	0.9	517	36	0.645655
C66	10 01 04.64	+02 26 33.98	2.01	-0.66 ± 0.32	20.2 ± 7.0	38.01894	1.2	463	42.7	0.426582
C84b	09 59 42.58	+01 55 01.49	1.959	-0.65 ± 0.41	7.0 ± 2.2	66.06934	0.5	315	29.2	0.524809
C101b	09 59 45.87	+02 30 24.80	1.74	> -1.42	2.3 ± 1.5	0.776247	14.7	113	42.2	0.524812
C105	09 58 45.12	+02 14 30.84	2.2	> -0.30	9.6 ± 5.9	38.90451	0.9	342	33.5	0.676084
C112	10 00 11.03	+01 53 14.06	1.894	-0.82 ± 0.23	20.3 ± 4.4	30.19952	1.3	402	39.8	0.467736
C122a	10 02 00.74	+02 16 38.12	1.06	> -1.89	7.5 ± 8.8	1.318257	7	93	45	0.501185
C22a	10 00 08.94	+02 40 10.90	1.599	-0.37 ± 0.27	58.8 ± 11.4	9.772372	4.4	434	33.2	0.457089
C22b	10 00 08.90	+02 40 09.52	1.599	-0.94 ± 0.30	57.4 ± 21.9	2.041738	8.1	165	32	0.69183

Tabela 3. Nepravilne galaksije: prva kolona je ime galaksije, druge dve kolone predstavljaju koordinate objekta u ekvatorijalnom kordinatnom sistemu, rektascenziju α i deklinaciju δ , z je crveni pomak galaksije, α predstavlja radio spektralni indeks, T_b je temperaturre sjaja u Kelvinima, M je ukupna masa zvezda u galaskiji, Md/Mg je odnos ukupne mase prašine i gasa u procentima. SFR je stopa formiranja zvezda izračunata u radu Kennicutt et al. 1998 iz $L_{IR} - SFR$ veze. sSFR je specifična stopa formiranja zvezda u jedinicama Gyr^{-1} . T_d predstavlja temperaturu prašine u galaksiji.

Galaksija	Koordinate		z	α	T_b [K]	M [$10^{10} M_\odot$]	SSFR Gyr $^{-1}$	SFR $M_\odot \text{yr}^{-1}$	T_d [K]	Md/Mg
	α (h,m,s)	δ								
C1a	10 01 41.75	+02 27 12.92	4.7	>-1.76	>10.8	316.2278	2.6	3702	53	0.316227
C2a	09 59 59.33	+02 34 41.05	3.179	-0.95 ± 0.32	40.0 ± 26.6	7.943282	31.3	2543	46.2	0.275423
C2b	09 59 58.80	+02 34 57.90	1.1	>-0.28	1.1 ± 0.6	6.91831	1.7	120	31.5	0.389046
C4	09 59 31.70	+02 30 43.96	5.3	>-0.91	1.4 ± 0.7	38.90451	5.2	2025	45.8	0.186208
C9a	10 01 22.96	+02 20 05.92	2.68	-0.89 ± 0.39	23.4 ± 11.4	15.13561	3.3	505	31.6	0.467735
C9b	10 01 22.36	+02 20 02.73	2.883 7	-0.70 ± 0.33	3.7 ± 0.8	25.11886	1.4	345	42.8	0.446685
C19	09 59 50.28	+01 53 36.35	2.87	>0.04	20.6 ± 7.9	4.466836	10.2	454	32.2	0.501187
C20	10 01 14.54	+02 27 05.34	3.06	>-0.88	7.2 ± 3.7	3.890451	30.8	1199	45.5	0.309029
C28a	09 58 49.28	+02 13 01.64	2.319	-1.43 ± 0.19	19.5 ± 2.1	8.912509	5.2	465	32.2	0.691831
C32	10 00 12.53	+02 01 24.22	1.63	-0.28 ± 0.47	7.2 ± 2.7	28.18383	0.9	248	30	0.57544
C37	10 01 21.82	+02 31 29.44	1.7	-0.26 ± 0.49	3.8 ± 1.3	5.754399	4.4	255	43.3	0.47863
C42	10 00 19.75	23 20 04.29	3.63	-0.5 ± 0.24	12.9 ± 2.1	28.84032	3.5	3800	64	0.234424
C55a	10 00 05.09	+01 55 18.17	2.49	>-0.68	10.4 ± 5.7	20.89296	1	212	28	0.501189
C55b	10 00 04.40	+01 55 15.75	2.77	-1.15 ± 0.58	8.3 ± 4.9	7.943282	2.1	166	31.1	0.562343
C60a	10 01 28.39	+02 21 27.49	0.96	>-0.91	5.0 ± 2.3	0.707946	39	39	51.3	0.218773
C61	10 01 20.06	+02 34 43.68	3.267	0.11 ± 0.01	>10 832					
C62	10 01 00.46	+02 38 05.88	3.36	>-1.00	1.9 ± 1.1	5.888437	16.4	966	50.3	0.33884
C71b	09 59 53.85	+02 18 54.14	0.829	-1.16 ± 0.68	3.4 ± 1.8					
C76	10 00 12.93	+02 12 11.51	4.01	>-0.94	1.6 ± 0.9	39.81072	4.1	1630	49.8	0.245472
C87	10 02 04.93	+02 17 01.26	2.39	>-0.38	3.3 ± 1.4	67.6083	0.9	637	36.2	0.446682
C91	10 01 28.49	+02 23 44.88	1.63	>-0.30	25.4 ± 13.9	5.623413	5.1	285	30.8	0.60256
C92a	10 01 40.44	+02 30 10.43	2.58	>-1.98	4.5 ± 4.3	69.1831	0.9	656	38.7	0.380189
C92b	10 01 39.17	+02 30 19.24	4.87	>-1.12	3.9 ± 2.2	5.888437	11.5	679	48.7	0.190546
C95	10 00 18.23	+02 12 42.52	2.102 1	>-0.44	3.9 ± 1.8	19.05461	1.9	357	35.2	0.407378
C101a	09 59 45.33	+02 30 16.81	1.53	>-1.26	2.5 ± 1.5	1.513561	11.2	169	49.2	0.660693
C103	10 01 24.48	+01 56 15.74	2.1	>-0.90	2.9 ± 1.6	30.90295	1.1	326	37.8	0.602558
C118	09 59 59.94	+02 06 33.26	2.234 1	-0.98 ± 0.30	23.9 ± 8.7					
C6a	10 00 56.95	+02 20 17.31	2.494	- 0.76±0.39	15.2 ± 6	22.38721	2.6	709	38	0.354812
C13a	09 5837.97	+02 14 08.43	2.01	- 0.73±0.13	>75.8	12.8825	4.9	637	47.3	0.724435

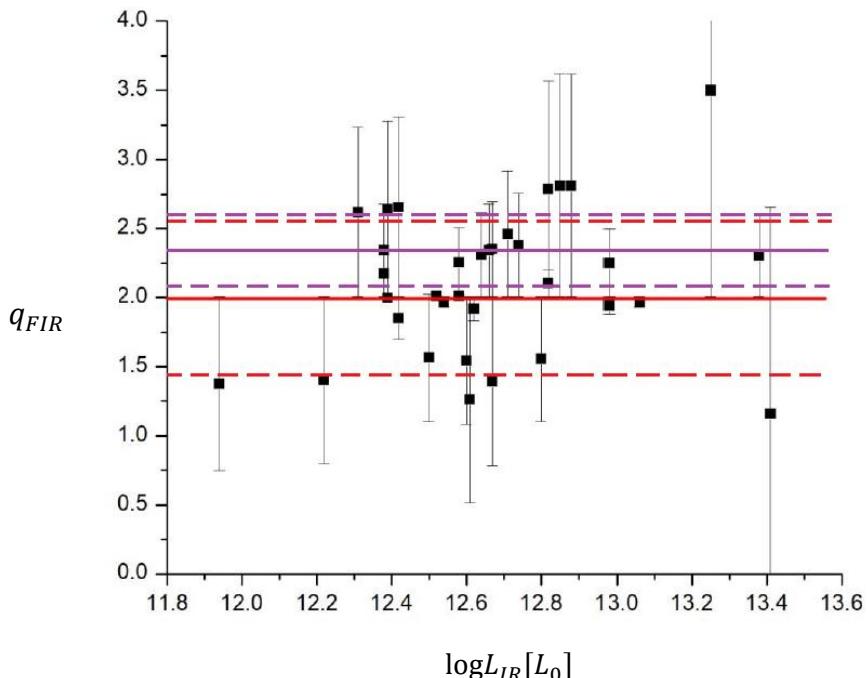
Tabela 4. (nastavak i objašnjenje na sledećoj strani)

Galaksija	Koordinate		z	α	T_b [K]	M [$10^{10} M_\odot$]	sSFR Gyr $^{-1}$	SFR $M_0 \text{yr}^{-1}$	T_d [K]	Md/Mg
	α (h,m,s) δ (°,′,″)									
C16b	09 58 54.19	+02 16 45.95	2.39	- 0.99±0.40	15.0± 6.1	6.16595	4.2	261	32.3	0.501186
C23	10 01 42.36	+02 18 35.88	2.1	- 0.76±0.32	28.0± 6.3	40.73803	1.6	663	36	0.489778
C24a	10 00 10.36	+02 22 24.42	2.01	- 1.07±0.37	16.0± 6.2	28.18383	1.2	346	31	0.416871
C25	10 01 21.95	+01 56 43.57	2.51	- 0.53±0.44	5.1±1. 6	5.370318	17.7	952	40.2	0.407382
C33a	10 00 27.14	+02 31 40.77	2.3	- 0.49±0.34	32.3± 15.0	9.772372	6.8	661	43.2	0.275421
C43a	10 00 03.12	+02 02 01.53	2.01	- 2.15±0.32	>32.7	9.120108	3.7	334	46.3	0.346736
C46	10 01 14.71	+02 35 18.36	1.06	- 1.01±0.16	>51.1	2.511886	3.5	87	32.2	0.616594
C67	10 01 19.53	+02 09 44.67	2.934 2	- 0.92±0.26	>30.5	1.862087	22.6	420	37	0.478629
C70	10 00 25.50	+02 03 12.66	4.01	- 1.06±0.81	4.3±2. 9	12.58925	30.5	3838	64.4	0.177826
C72	10 01 58.99	+02 04 57.67	1.72	- -0.8±0.32	21.6± 7.4	1.258925	19.1	241	29.9	0.69183
C77a	09 59 35.73	+01 58 05.41	3.53	- 0.99±0.03	>243. 9					
C77b	09 59 35.30	+01 57 59.20	3.06	- 1.24±0.30	>23.1	6.025596	16	963	52.7	0.239884
C93	10 01 31.88	+02 11 38.77	1.63	- 0.57±0.26	>34.4	10.23293	2.4	243	37.3	0.660693
C97b	10 02 14.50	+02 19 42.84	2.01	- -1.6±0.75	5.4±3. 6	26.91535	1	265	41	0.354814
C98	10 00 43.18	+02 05 19.03	1.82	- 0.83±0.40	15.4± 6.2	40.73803	1.1	460	34	0.467736
C109	10 01 11.56	+02 28 40.89	2.2	- 1.43±0.75	4.1±2. 6	19.05461	2	383	32.5	0.446684
C111	09 59 29.23	+02 12 43.97	2.1	- 0.81±0.27	>31.8	26.91535	1.4	384	38	0.426578
c113	09 59 14.40	+02 29 60.00	2.089 9	- 0.63±0.11	>98.9	5.370318	32.9	1764	47.2	0.501185
c116	10 01 09.85	+02 03 46.43	2.2	- 0.64±0.27	>31.7	7.943282	6.9	549	41.2	0.295119
c127	10 01 25.33	+02 35 27.32	2.01	- 0.98±0.15	>56.3	7.762471	9.8	761	48.2	0.389044

Tabela 4. Diskolike galaksije: prva kolona je ime galaksije, druge dve kolone predstavljaju koordinate objekta u ekvatorijalnom kordinatnom sistemu, rektascenziju α i deklinaciju δ . z je crveni pomak galaksije, α predstavlja radio spektralni indeks, T_b je temperature sjaja u Kelvinima, M je ukupna masa zvezda u galaskiji, Md/Mg je odnos ukupne mase prašine i gasa u procentima. SFR je stopa formiranja zvezda izračunata u radu Kennicutt et al. 1998 iz $L_{IR} - SFR$ veze. sSFR je specifična stopa formiranja zvezda u jedinicama Gyr $^{-1}$. T_d predstavlja temperaturu prašine u galaksiji.

4.2.1 FIR-radio korelacija uzorka SMG galaksija na velikim crvenim pomacima

FIR-radio korelaciju za uzorak od 37 SMG galaksija (nepravilnih + pravilnih, datih u tabeli 5 i 6) prikazana je na grafiku 7. Ono što možemo sa grafika videti jeste da je srednja vrednost parametra q_{FIR} za ovaj set podataka jednaka $q_{FIR} = 2.00 \pm 0.01$ što predstavlja nešto nižu vrednost od standardne $q_{FIR} = 2.34 \pm 0.01$, ali da se nalazi u okviru donje granice.



Grafik 7. zavisnosti veličine q_{FIR} od L_{IR} (Luminoznost infracrvene emisije na $60\mu\text{m}$), Crvena horizontalna linija predstavlja srednju vrednost parametra $q_{FIR} = 2.00 \pm 0.01$ dok su dve isprekidane crvene linije standardna devijacija $\delta = 0.56$ za naš uzorak od 37 SMG galaksija. Puna ljubičasta linija predstavlja standardnu vrednost parametra $q_{FIR} = 2.34 \pm 0.01$, dok dve isprekidane ljubičaste linije predstavljaju standardnu devijaciju $\delta = 0.26$.

4.2.2 Zavisnost parametra q_{FIR} od crvenog pomaka z

U ovom odeljku ispitaćemo zavisnost parametra q_{FIR} od crvenog pomaka na kojem se galaksija nalazi. Uzorak ćemo podeliti u poduzorke po svom morfološkom tipu, te ih zasebno analizirati. Zavisnost q_{FIR} i z je u oba slučaja fitovana stepenom zavišnošću oblika $q_{FIR}(z) = a(1 + z)^b$, gde je a konstanta, a b je stepeni koeficijent. Ovo je rađeno u pokušaju da se utvrdi uzrok zavisnosti q_{FIR} od z , koja je nađena u radu Delhaize et al. 2017.

Podaci koji su korišćeni za izračunavanje parametra q_{FIR} prikazani su u tabeli 5. (nepravilne galaksije) i tabeli 6. (diskolike galaksije). U tabelama su date gustine flukseva u radio delu na 1.4GHz ($S_{1.4GHz}[\mu\text{Jy}]$) i na 3GHz ($S_{3GHz}[\mu\text{Jy}]$), gustine flukseva u infracrvenom delu (S_{IR}) od mid (eng: *mid infrared*), odnosno srednjeg dela (S_{24}) infracrvenog (8μm-42μm) pa sve do fir (eng: *far infrared*), dalekog (42μm-122μm) infracrvenog dela spektra. Navedena je i gustina fluksa na 250μm (S_{250}). Takođe u tabeli 5. i 6. možemo naći i luminoznost datih galaksija u infracrvenom delu na 60μm ($L[10^{10}L_0]$). U poslednjoj koloni nalaze se izračunati parametri FIR-radio korelacije na osnovu formule (1.1). FIR fluks je određen tako što smo za svaku galaksiju posebno na osnovu gustine flukseva infracrvene emisije na 4 talasne dužine (24μm, 100μm, 160μm i 250μm) delimično odredili SED krivu (zavisnost $S_{IR}(\lambda)$ u obliku $\log S_{IR}(\log \lambda)$), tako što smo date gustine flukseva fitovali polinomom drugog stepena oblika

$$\log S_{IR} = a \log \lambda^2 + b \log \lambda + c \quad (4.1)$$

gde su a , b i c konstante. Integraljenjem SED krive u oblasti od 42μm do 122μm dobili smo ukupnu gustinu gluksa u dalekom infracrvenom delu spektra (FIR) koju smo koristili prilikom računanja parametra q_{FIR} , na sledeći način:

$$\log FIR = \int_{42}^{122} (a \log \lambda^2 + b \log \lambda + c) d(\log \lambda) \quad (4.2)$$

Galaksija	$S_{1.4GHz}$ [μJy]	S_{3GHz} [μJy]	$I(3GHz)$ [μJy/be m]	S_{IR}	FIR [mJy]	$L[10^{10}L_0]$	q_{FIR}
C12	< 36	28.7 ± 4.5	23.4 ± 2.3	< 0.054	< 5.0	< 10.2	6.7 ± 2.4
C18	98 ± 16	52.5 ± 5.2	36.5 ± 2.5	0.357 ± 0.016	< 5.0	23.1 ± 2.9	19.59115317
C36	167.6 ± 14.9	179.1 ± 5.0	66.3 ± 2.5	0.451 ± 0.018	7.3 ± 1.8	22.0 ± 3.0	54.9 ± 2.4
C47	330.0 ± 32.4	105.7 ± 2.3	105.7 ± 2.3	0.153 ± 0.013	5.5 ± 1.3	8.6 ± 3.5	21.7 ± 1.8
C52	119.1 ± 15.4	58.9 ± 6.5	27.7 ± 2.2	0.385 ± 0.036	12.9 ± 1.6	37.2 ± 3.8	53.5 ± 2.7
C59	161.1 ± 14.6	65.2 ± 2.4	65.2 ± 2.4	0.343 ± 0.034	16.1 ± 1.5	41.0 ± 4.1	54.1 ± 2.5
C65	153.4 ± 12.1	76.9 ± 4.6	61.5 ± 2.3	0.401 ± 0.040	12.4 ± 1.8	32.6 ± 3.5	51.3 ± 1.9
C66	86.0 ± 11.0	52.2 ± 5.1	35.6 ± 2.3	0.586 ± 0.024	8.7 ± 1.4	14.4 ± 2.8	38.8 ± 2.4
C84b	82.4 ± 10.9	50.3 ± 6.4	22.7 ± 2.1	0.462 ± 0.046	< 5.0	8.9 ± 2.7	30.8 ± 1.8
C101b	< 36	23.4 ± 6.7	10.5 ± 2.2	< 0.054	< 5.0	< 10.2	9.1 ± 2.0
C105	< 36	40.3 ± 6.0	21.8 ± 2.3	0.362 ± 0.036	< 5.0	14.8 ± 2.6	22.5 ± 1.4

Tabela 5 nepravilne galaksije : $S_{1.4GHz}$ i S_{3GHz} su gustine flukseva u radio domenu, I_{3GHz} je intenzitet zračenja u radio domeu na 3GHz, S_{IR} su gustine flukseva u infracrvenom domenu od 24μm pa sve do 250μm. FIR je gustina fluksa u dalekom infracrvenom delu od 42μm-122μm, računata jednačinom 4.2. L je luminoznost galaksija na 60μm dok je q_{FIR} izračunat parametar FIR-radio korelacija pomoću formule 1.1.

C112	121.8 ± 11.5	65.4 ± 4.6	49.7 ± 2.2	0.260 ± 0.026	< 5.0	10.8 ± 4.1	30.1 ± 2.1	4.249521198	398.1072	1.542693
C122a	< 36	16.1 ± 4.4	13.5 ± 2.3	< 0.054	6.9 ± 1.7	13.3 ± 4.3	18.1 ± 2.9		93.32543	
C22a	132 ± 26	99.6 ± 4.8	77.5 ± 2.3	0.660 ± 0.017	7.8 ± 0.9	35.7 ± 2.1	56.0 ± 1.7	26.82934067	436.5158	2.308036
C22b	138 ± 26	67.5 ± 4.6	57.0 ± 2.3	< 0.054	2.8 ± 0.3	12.7 ± 0.7	19.9 ± 0.6	3.47712257	165.9587	1.401341

Tabela 5. Nastavak

Galaksija	$S_{1.4GHz}$ [μJy]	S_{3GHz} [μJy]	$I(3GHz)$ [μJy/beam]	S_{IR}			FIR [mJy]	$L[10^{10}L_0]$	q_{FIR}
				$S24\mu m$ [mJy]	$S100\mu m$ [mJy]	$S160\mu m$ [mJy]	$S250\mu m$ [mJy]		
C1a	< 36	13.7 ± 2.2	13.7 ± 2.2	0.241 ± 0.023	< 5.0	19.9 ± 3.5	23.4 ± 1.8		3715.352
C2a	102 ± 13	49.4 ± 4.8	38.8 ± 2.4	< 0.054	6.4 ± 1.3	30.0 ± 3.5	60.3 ± 2.4	1.472482018	2570.396
C2b	< 36	51.1 ± 12.6	10.0 ± 2.1	< 0.054	< 5.0	< 10.2	4.6 ± 2.8		120.2264
C4	< 36	31.5 ± 7.7	11.4 ± 2.3	< 0.054	< 5.0	< 10.2	11.0 ± 2.2		2041.738
C9a	76.9 ± 15.9	39.1 ± 4.4	34.3 ± 2.3	0.105 ± 0.016	< 5.0	< 10.2	22.3 ± 1.2		501.1872
C9b	142.8 ± 13.6	83.8 ± 8.9	25.4 ± 2.1	0.074 ± 0.016	< 5.0	< 10.2	9.8 ± 0.5		346.7369
C19	< 36	47.0 ± 4.8	34.0 ± 2.2	0.073 ± 0.015	< 5.0	11.0 ± 4.1	18.2 ± 2.5		457.0882
C20	< 36	27.6 ± 4.9	19.1 ± 2.2	< 0.054	< 5.0	11.9 ± 2.7	33.0 ± 2.9		1202.264
C28a	382.0 ± 52.1	128.3 ± 5.8	76.4 ± 2.3	0.201 ± 0.053	< 5.0	13.6 ± 3.8	25.7 ± 1.2	9.44930789	467.7351
C32	55.9 ± 10.9	145.3 ± 6.5	21.9 ± 2.2	0.163 ± 0.016	5.4 ± 1.5	10.7 ± 3.6	33.4 ± 1.9	5.527770451	245.4709
C37	52.1 ± 8.0	42.6 ± 6.5	21.0 ± 2.3	< 0.054	< 5.0	< 10.2	5.6 ± 3.3		257.0396
C55a	< 36	31.2 ± 5.1	20.5 ± 2.2	0.262 ± 0.052	< 5.0	8.7 ± 3.6	8.6 ± 1.1		213.7962
C55b	65.3 ± 10.7	27.1 ± 5.0	18.1 ± 2.2	0.104 ± 0.015	< 5.0	< 10.2	5.3 ± 0.6		165.9587
C60a	< 36	27.6 ± 5.2	18.2 ± 2.2	< 0.054	< 5.0	< 10.2	4.5 ± 1.4		38.90451
C61	$10\ 590 \pm 127$	$11\ 502.0 \pm 4.2$	$11\ 502.0 \pm 4.2$	0.231 ± 0.023	< 5.0	10.6 ± 3.8	17.2 ± 1.8		
C62	< 36	30.4 ± 7.8	10.9 ± 2.1	< 0.054	< 5.0	< 10.2	18.2 ± 2.1		954.9926
C71b	78.5 ± 11.1	32.3 ± 7.1	13.6 ± 2.2	0.523 ± 0.017	< 5.0	9.6 ± 2.9	27.7 ± 1.7	4.697859239	1.77703
C76	< 36	32.6 ± 8.7	10.9 ± 2.3	0.100 ± 0.017	< 5.0	< 10.2	11.8 ± 2.2		1621.81
C87	< 36	41.4 ± 7.8	15.5 ± 2.2	0.557 ± 0.015	< 5.0	14.4 ± 2.8	28.7 ± 2.2		630.9573
C91	< 36	37.1 ± 4.2	33.2 ± 2.3	0.151 ± 0.016	< 5.0	23.9 ± 2.9	42.1 ± 2.3		288.4032
C92a	< 36	16.1 ± 5.0	11.2 ± 2.2	< 0.054	< 5.0	< 10.2	25.4 ± 1.8		660.6934
C92b	< 36	25.9 ± 5.9	13.9 ± 2.2	< 0.054	< 5.0	< 10.2	3.8 ± 1.9		676.083
C95	< 36	39.9 ± 7.7	14.5 ± 2.1	0.592 ± 0.132	5.6 ± 1.3	10.7 ± 3.2	31.1 ± 1.6		354.8134
C101a	< 36	25.4 ± 6.8	11.1 ± 2.2	< 0.054	< 5.0	< 10.2	13.5 ± 2.0		169.8244

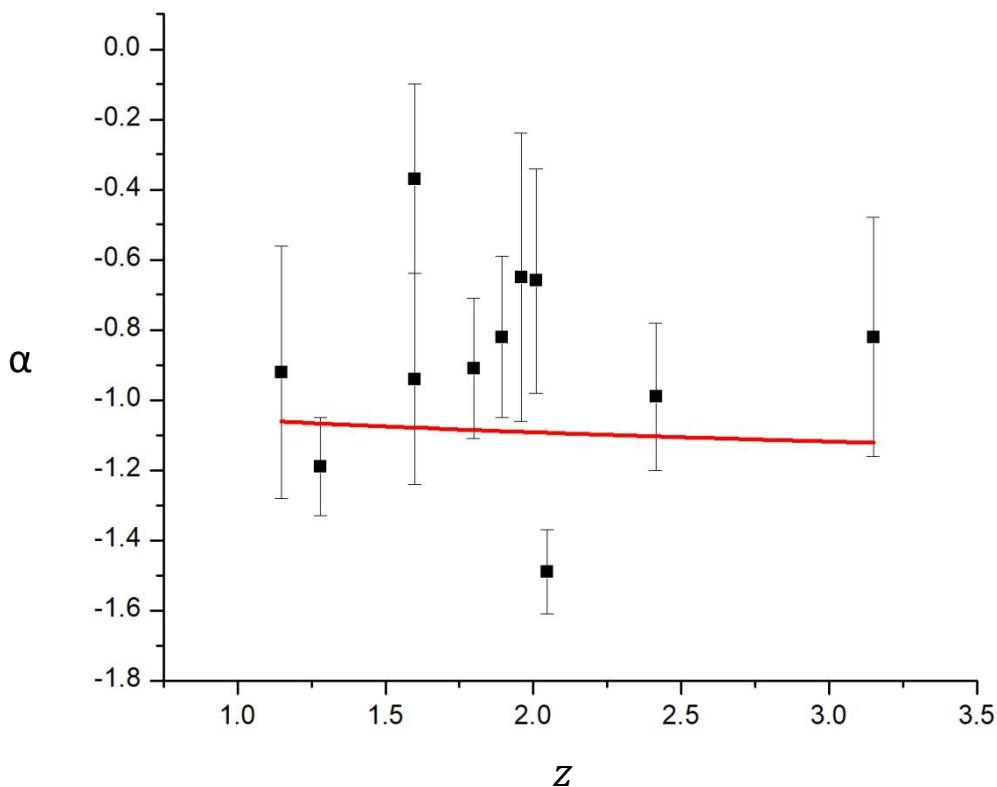
Tabela 6, diskolike galaksije: $S_{1.4GHz}$ i S_{3GHz} su gustine flukseva u radio domenu, I_{3GHz} je intenzitet zračenja u radio domeu na 3GHz, S_{IR} su gustine flukseva u infracrvenom domenu od $24\mu m$ pa sve do $250\mu m$. FIR je gustina fluksa u dalekom infracrvenom delu od $42\mu m$ - $122\mu m$, računata jednačinom 4.2. L je luminoznost galaksija na $60\mu m$ dok je q_{FIR} izračunat parametar FIR-radio korelacije pomoću formule 1.1.

Galaksija	$S_{1.4GHz}$ [μJy]	S_{3GHz} [μJy]	$I(3GHz)$ [μJy/beam]	S_{IR}	FIR [mJy]	$L[10^{10}L_0]$	q_{FIR}	
C103	< 36	22.4 ± 5.8	12.7 ± 2.2	0.203 ± 0.020	< 5.0	< 10.2	8.79 ± 2.0	323.5937
C118	104.3 ± 12.7	49.3 ± 4.6	38.0 ± 2.2	0.222 ± 0.017	4.8 ± 1.6	9.9 ± 2.7	18.5 ± 1.5	6.661162063
C6a	48 ± 12	43.6 ± 5.2	29.5 ± 2.3	0.288 ± 0.022	< 5.0	20.8 ± 2.6	30.3 ± 1.7	31.06561817
C13a	144.2 ± 13.3	82.9 ± 2.4	82.9 ± 2.4	0.327 ± 0.041	< 5.0	10.9 ± 3.9	28.9 ± 1.1	5.164044785
C16b	82.1 ± 13.8	38.5 ± 4.6	30.7 ± 2.3	0.187 ± 0.013	< 5.0	$11.13.6$	23.2 ± 1.7	5.802564812
C23	124.5 ± 13.9	71.5 ± 4.6	53.0 ± 2.2	0.463 ± 0.019	6.0 ± 1.5	30.5 ± 3.6	48.3 ± 1.6	15.73185736
C24a	99.6 ± 12.6	43.9 ± 5.1	32.7 ± 2.4	0.381 ± 0.014	< 5.0	12.6 ± 3.8	27.4 ± 2.1	9.242937151
C25	70.2 ± 12.2	46.7 ± 6.3	22.0 ± 2.1	0.366 ± 0.028	< 5.0	$17.24.1$	41.4 ± 2.0	12.48331703
C33a	67.3 ± 11.7	46.4 ± 4.4	41.1 ± 2.4	0.280 ± 0.013	13.1 ± 1.5	26.7 ± 2.9	42.2 ± 1.7	40.97887203
C43a	190 ± 47.9	37.0 ± 2.4	37.0 ± 2.4	0.200 ± 0.025	8.6 ± 1.2	15.7 ± 2.2	21.6 ± 0.9	19.34060254
C46	122 ± 12.4	56.5 ± 2.3	56.5 ± 2.3	0.184 ± 0.016	< 5.0	9.4 ± 3.3	26.5 ± 1.6	2.884762076
C67	70 ± 12.3	34.7 ± 2.3	34.7 ± 2.3	0.152 ± 0.016	6.1 ± 1.4	8.0 ± 3.3	27.9 ± 3.3	5.782691183
C70	49.1 ± 12.6	21.9 ± 5.6	12.8 ± 2.2	< 0.054	< 5.0	$21.64.5$	34.5 ± 1.9	3801.894
C72	95.5 ± 13.7	50.2 ± 4.8	36.9 ± 2.3	0.253 ± 0.025	< 5.0	16.6 ± 4.9	31.3 ± 2.2	14.24393555
C77a	554.5 ± 11.5	261.1 ± 2.3	261.1 ± 2.3	0.098 ± 0.015	< 5.0	9.2 ± 2.8	9.2 ± 1.5	12.70106095
C77b	69.1 ± 10.7	26.8 ± 2.3	26.8 ± 2.3	0.184 ± 0.016	< 5.0	12.6 ± 2.9	29.0 ± 1.6	6.050482372
C93	60.1 ± 11.1	38.8 ± 2.3	38.8 ± 2.3	0.730 ± 0.073	5.1 ± 1.8	15.4 ± 4.1	22.7 ± 2.5	13.18712127
C97b	55.1 ± 15.9	24.5 ± 5.6	14.0 ± 2.2	0.637 ± 0.015	7.5 ± 1.6	17.5 ± 3.9	21.6 ± 2.4	24.9620357
C98	77.8 ± 13.7	41.3 ± 4.9	30.8 ± 2.3	0.503 ± 0.001	6.6 ± 1.3	27.0 ± 3.6	48.3 ± 1.9	17.03805438
C109	59.1 ± 10.6	19.9 ± 4.8	14.0 ± 2.2	0.201 ± 0.041	5.9 ± 1.2	19.0 ± 3.6	30.6 ± 2.1	10.63212319
C111	66.7 ± 11.6	36.1 ± 2.4	36.1 ± 2.4	0.240 ± 0.024	4.3 ± 1.4	16.3 ± 2.8	26.6 ± 2.1	6.840376401
C113	173 ± 15.6	107.3 ± 2.3	107.3 ± 2.3	0.725 ± 0.073	42.0 ± 2.1	101.4 ± 2.1	86.4 ± 1.6	546.6382281
C116	58.9 ± 10.8	35.9 ± 2.3	35.9 ± 2.3	0.335 ± 0.034	6.8 ± 1.7	17.4 ± 3.0	32.3 ± 2.2	14.11887197
C127	131.1 ± 12.5	62.1 ± 2.4	62.1 ± 2.4	0.622 ± 0.062	15.7 ± 1.6	36.7 ± 3.3	44.2 ± 1.8	84.86527053
								758.5776
								2.811127

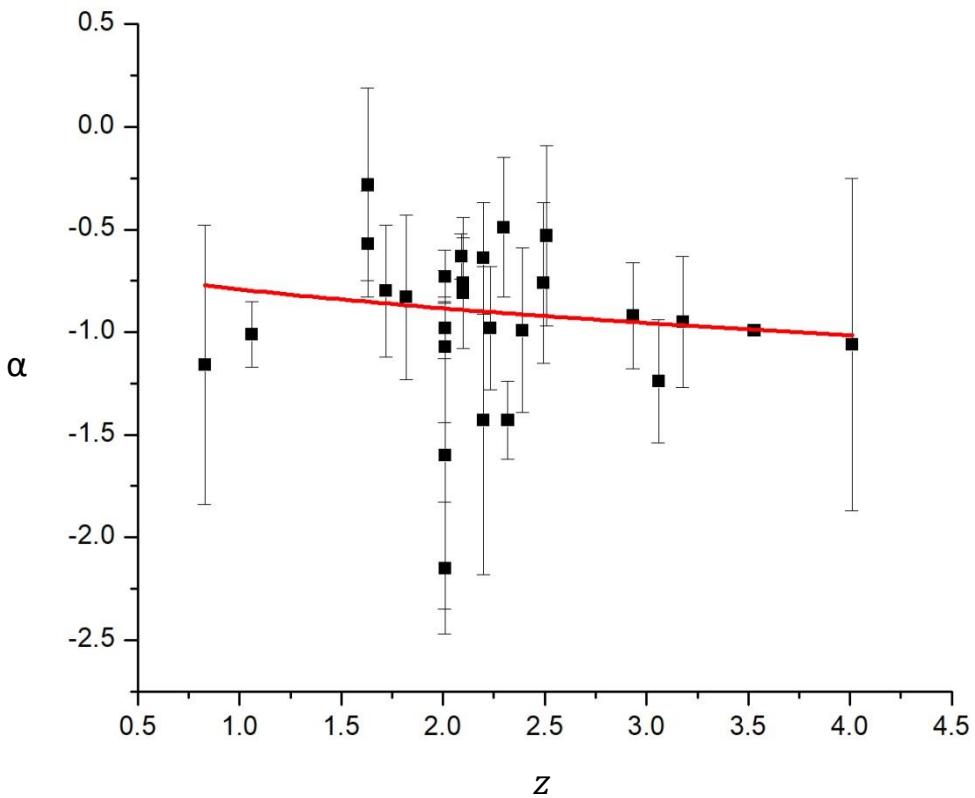
Tabela 6. Nastavak

Spektralni indeks radio zračenja α nam ukazuje na prisustvo termalne odnosno netermalne komponente zračenja. Radio spektralni indeks zavisi od gustine fluksa radio zračenja kao $S_{1.4GHz} \propto \nu^\alpha$, gde je ν frekvencija radio zračenja. Što je spektralni indeks manji, to znači da je dominantnija netermalna komponenta zračenja. Zbog toga smo za dati set SMG galaksija analizirali i zavisnost spektralnog indeksa od crvenog pomaka, zasebno za oba seta galaksija.

Na grafiku 8. prikazana je zavisnost radio spektralnog indeksa α od crvenog pomaka z za 11 nepravilnih galaksija. Na grafiku možemo zapaziti opadanje funkcije kako se krećemo ka većim crvenim pomacima, u formi $\alpha(z) = (-0.99 \pm 0.67)(1 + z)^{(0.08 \pm 0.64)}$.

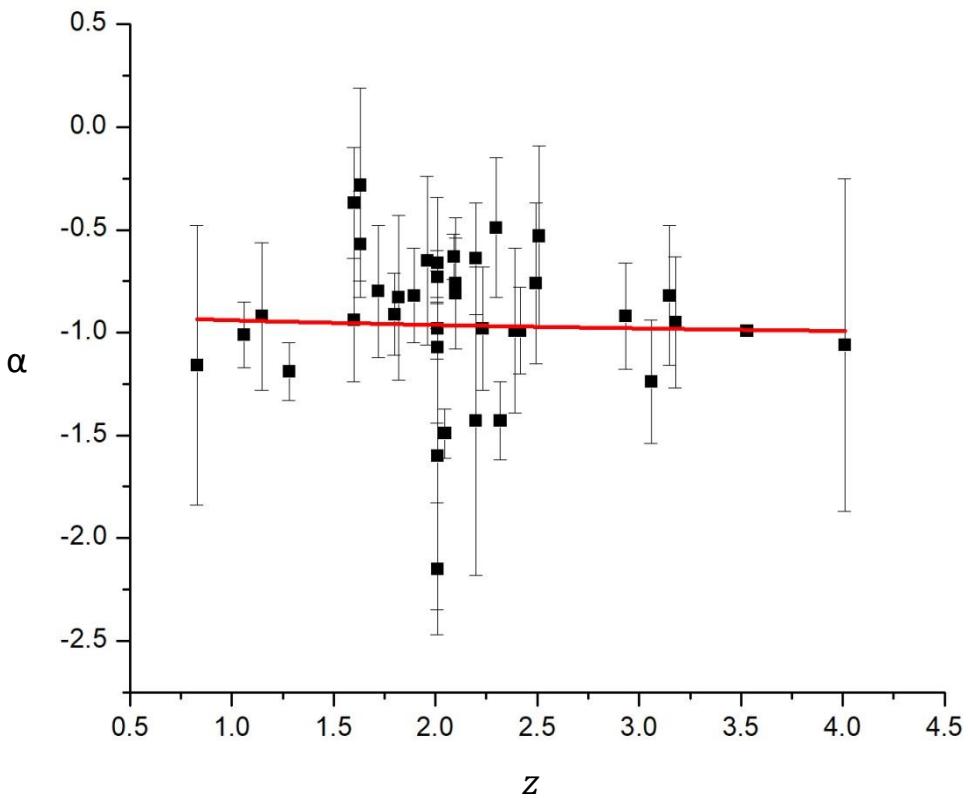


Grafik 8: zavisnost radio spektralnog indeksa α od crvenog pomaka z , za 11 nepravilnih galaksija. Zavisnost ima oblik: $\alpha(z) = (-0.99 \pm 0.67)(1 + z)^{(0.08 \pm 0.64)}$



Grafik 9. zavisnost radio spektralnog indeksa α od crvenog pomaka z , za 26 diskolikih galaksija. Zavisnost ima oblik: $\alpha(z) = (-0.65 \pm 0.17)(1 + z)^{(0.27 \pm 0.18)}$

Na grafiku 9. prikazana je zavisnost radio spektralnog indeksa α od crvenog pomaka z za 26 diskolikih galaksija. Na grafiku možemo zapaziti opadanje funkcije kako se krećemo ka većim crvenim pomacima, u formi $\alpha(z) = (-0.65 \pm 0.17)(1 + z)^{(0.27 \pm 0.18)}$.

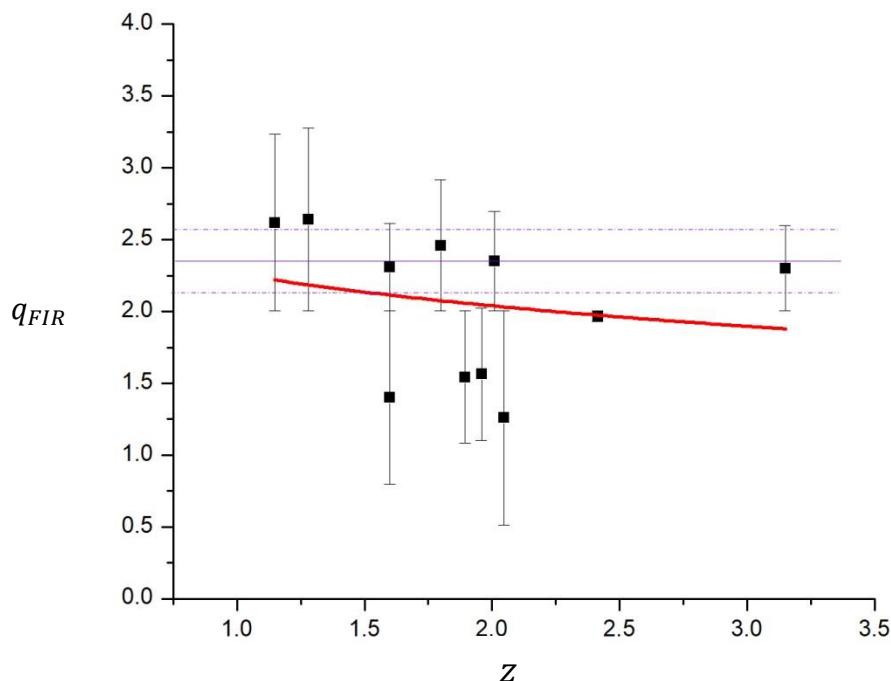


Grafik 10. Zavisnost radio spektralnog indeksa α od crvenog pomaka z , za oba seta zajedno. Zavisnost ima oblik: $\alpha(z) = (-0.90 \pm 0.18)(1 + z)^{(0.05 \pm 0.15)}$

Na grafiku 10. prikazana je zavisnost radio spektralnog indeksa α od crvenog pomaka z za oba seta zajedno (pravilne + nepravilne). Na grafiku možemo zapaziti opadanje funkcije kako se krećemo ka većim crvenim pomacima, u formi: $\alpha(z) = (-0.90 \pm 0.18)(1 + z)^{(0.05 \pm 0.15)}$.

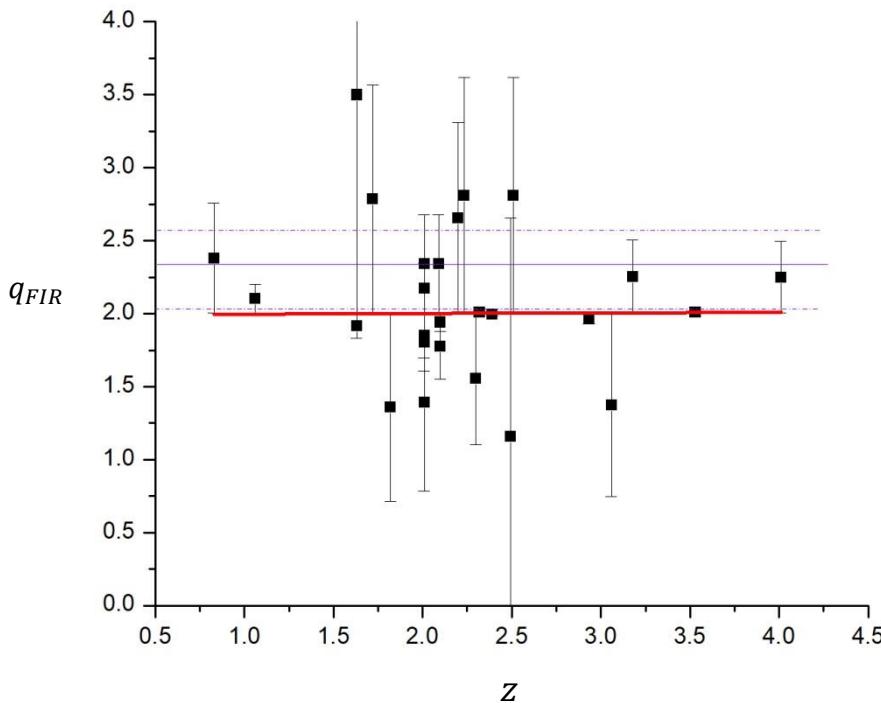
Naredni korak u našem radu je da pokušamo da naše setove galaksija, gde sada imamo i informaciju o morfologiji galaksija, analiziramo i fitujemo funkcijom istog oblika kao i u radu Delhaize et al. 2017 ($q_{FIR} = a(1+z)^b$).

Na grafiku 11. Prikazana je stepena zavisnost parametra q_{FIR} za 11 nepravilnih galaksija iz našeg uzorka. Utvrđeno je da q_{FIR} opada sa z kao: $q_{FIR} = (2.69 \pm 0.95)(1+z)^{-(0.25 \pm 0.29)}$, što je prikazano crvenom linijom na grafiku 11.



Grafik 11. zavisnost parametra q_{FIR} od crvenog pomaka z za 11 nepravilnih galaksija. Crvena linija predstavlja stepeni zakon zavisnosti oblika $q_{FIR} = (2.69 \pm 0.95)(1+z)^{-(0.25 \pm 0.29)}$. Puna ljubičasta linija je standardna vrednost parametra $q_{FIR} = 2.34 \pm 0.01$, dok su dve isprekidane ljubičaste linije, standardna devijacija parametra q_{FIR} , $\delta = 0.26$.

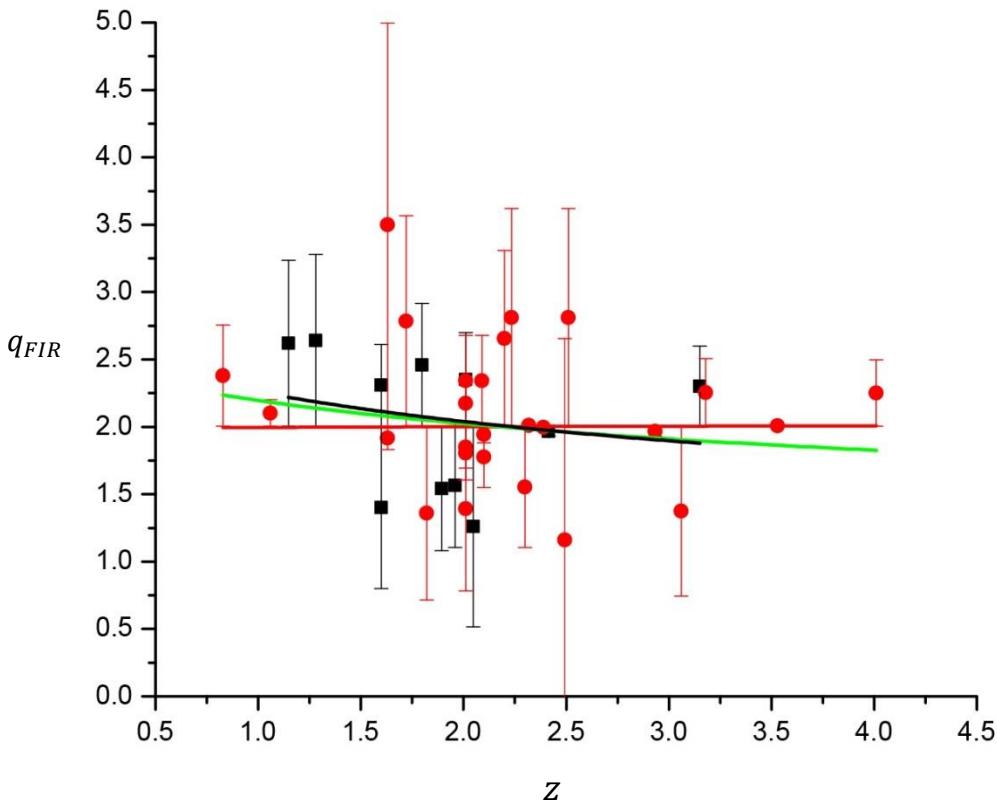
Isti način analiziran je i set od 26 diskolikih SMG galaksija, a rezultati analize prikazani su na grafiku 12. Kao i ranije, crvena linija predstavlja stepeni zakon zavisnosti parametra q_{FIR} od crvenog pomaka, u obliku $q_{FIR} = (1.98 \pm 0.03)(1+z)^{(0.01 \pm 0.01)}$. Ono što možemo sa grafika zaključiti jeste da je kod diskolikih galaksija funkcija $q_{FIR}(z)$ skoro konstantna u odnosu na crveni pomak.



Grafik 12: zavisnost parametra q_{FIR} od crvenog pomaka z za 26 diskolikih galaksija. Crvena linija predstavlja stepeni zakon zavisnosti oblika $q_{FIR} = (1.98 \pm 0.032)(1 + z)^{(0.01 \pm 0.01)}$. Puna ljubičasta linija je standardna vrednost parametra $q_{FIR} = 2.34 \pm 0.01$, dok su dve isprekidane ljubičaste linije, standardna devijacija parametra q_{FIR} , $\delta = 0.26$.

Na kraju smo analizirali oba uzorka sa ciljem da ih uporedimo sa rezultatom Delhaize et al. 2017. Cilj je da se uporede dobijeni rezultati za pravilne i nepravilne galaksije te da se ispita da li funkcija zavisnosti parametra q_{FIR} od crvenog pomaka z za nepravilne galaksije u nekom procentu spušta funkciju zavisnosti $q_{FIR}(z)$ za ceo uzorak od 37 galaksija (pravilne + nepravilne galaksije).

Da bismo ispitivali predhodnu pretpostavku, na jednom grafiku ucrtane su sve tri krive (stepeni zakoni zavisnosti $q_{FIR}(z)$ posebno za pravilne, za nepravilne, i za celokupni uzorak od 37 galaksija). Rezultati analize prikazani su na grafiku 13. Na grafiku 13. možemo videti 3 krive koje opisuju zavisnost $q_{FIR}(z)$. Crveni krugovi predstavljaju diskolike galaksije, te crvena linija pokazuje zavisnost $q_{FIR}(z)$ u vidu stepenog zakona, za date 26 diskolike galaksije. Crne kocke su 11 nepravilnih galaksija, a crna linija pokazuje njihovu zavisnost zavisnost $q_{FIR}(z)$ kao stepeni zakon. Zelena linija pokazuje stepeni zakon zavisnosti $q_{FIR}(z)$ za ceo uzorak od 37 galaksija, koji ima oblik $q_{FIR}(z) = (2.52 \pm 0.03)(1 + z)^{-(0.20 \pm 0.01)}$ među kojima se nalaze i nepravilne i diskolike galaksije.



Grafik 13. Zavisnost $q_{FIR}(z)$ za uzorak od 11 nepravilnih (crna linija), 26 diskolikih (crvena linija), i 37 galaksija koje predstavljaju zbir pravilnih i nepravilnih (zelena linija).

Rezultati prikazani grafikom 13. ukazuju na to da morfologija galaksija igra bitnu ulogu u slučaju zavisnosti $q_{FIR}(z)$. Vrednosti q_{FIR} kod nepravilnih galaksija, dominiraju na vrednost q_{FIR} za ceo kombinovani uzorak. Kada rezultate našeg istraživanja uporedimo sa radom Delhaize et al. 2017. $q_{FIR}(z) = (2.52 \pm 0.03)(1 + z)^{-0.21 \pm 0.01}$ vidimo da kod nas dolazi do pojave skoro istog stepenog koeficijenta krive $q_{FIR}(z) = a(1 + z)^b$ za ukupan uzorak galaksija u obliku $q_{FIR}(z) = (2.52 \pm 0.03)(1 + z)^{-(0.20 \pm 0.01)}$. Iz navedenog možemo zaključiti da morfologija galaksija diktira oblik zavisnosti $q_{FIR}(z)$, odnosno da su nepravilne galaksije uzrok opadanja funkcije $q_{FIR}(z)$. Kako su nepravilne galaksije posledica trenutnih ili prošlih sudara i bliskih prolaza između galaksija, možemo zaključiti da je mozda ubrzanje kosmičkog zračenja koje se dešava u interakcijama, ono što čini nepravilne galaksije posebnim, odnosno što im spušta vrednost parametra q_{FIR} .

- Zaključak -

U ovom radu predstavljen je uzorak preuzet iz rada Miettinen et al. 2017, od 37 galaksija, od čega 11 nepravilnih (interagujućih) i 26 diskolikih galaksija. Morfologija galaksija je testirana kao uzrok opadanja parametra FIR-radio korelacije sa crvenim pomakom koji je uočen u skorijim radovima.

Pri određivanju parametra q_{FIR} koristili smo podatke za gustinu fluksa u infracrvenom delu na različitim frekvencijama ($24\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $160\mu\text{m}$ i $250\mu\text{m}$). Na osnovu datih flukseva, modelirali smo takozvanu SED krivu i integralili u opsegu od $42\mu\text{m}$ do $122\mu\text{m}$, na osnovu čega smo dobili ukupnu gustinu fluksa u dalekom infracrvenom delu (FIR).

Zavisnost parametra q_{FIR} od crvenog pomaka, tražena je u obliku stepenog zakona $q_{FIR}(z) = a(1 + z)^b$ i dobijeni su sledeći rezultati:

- Za nepravilne galaksije: $q_{FIR} = (2.69 \pm 0.95)(1 + z)^{-(0.25 \pm 0.29)}$
- Za pravilne galaksije: $q_{FIR} = (1.98 \pm 0.03)(1 + z)^{(0.01 \pm 0.01)}$
- Za ceo uzorak: $q_{FIR}(z) = (2.52 \pm 0.03)(1 + z)^{-(0.20 \pm 0.01)}$

Kada rezultate našeg rada uporedimo sa rezultatima iz Delhaize et al. (2017) gde je funkcija zavisnosti oblika $q_{FIR}(z) = (2.52 \pm 0.03)(1 + z)^{-0.21 \pm 0.01}$, možemo zaključiti da naš uzorak od 37 galaksija prati vrlo sličan trend. Ovim smo pokazali da interakcija između galaksija verovatno utiče na njihovo radio netermalno zračenje, te dominira evolucijom parametra q_{FIR} tako što q_{FIR} opada ka većim crvenim pomacima.

Literatura

1. *Estimating star formation rates from infrared and radio luminosities: The origin of the radio-infrared correlation-* Eric F. Bell, The Astrophysical Journal (2002).
2. *A Detailed Study of the Radio–FIR Correlation in NGC 6946 with Herschel-PACS/SPIRE from KINGFISH*-F. S. Tabatabaei, E. Schinnerer, E. J. Murphy, R. Beck, B. Groves, S. Meidt, M. Krause, H-W. Rix, K. Sandstrom, A. F. Crocker, M. Galametz, G. Helou, C.D. Wilson, R. Kennicutt, D. Calzetti, B. Draine, G. Aniano, D. Dale, G. Dumas, C.W. Engelbracht, K.D. Gordon, J. Hinz, K. Krecke, E. Montiel, H. Rousse, Astronomy & Astrophysics manuscript no. 6946arxiv (2013).
3. *Possible breaking of the FIR–radio correlation in tidally interacting galaxies-* D. Donevski and T. Prodanović, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 453, 638-644 (2015)
4. *New insights into the interstellar medium of the dwarf galaxy IC10: connection between magnetic fields, the radio–infrared correlation and star formation-* Aritra Basu, Sambit Roychowdhury, Volker Heesen, Rainer Beck, Elias Brinks, Jonathan Westcott and Luke Hindson, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 000, 1-19 (2017)
5. *Radio synchrotron spectra of star-forming galaxies-* U. Klein, U. Lisenfeld, and S. Verley, Astronomy & Astrophysics manuscript no. gal`spec`astroph (2017)
6. *Particle acceleration in supernova remnants and the production of thermal and nonthermal radiation-* Donald C. Ellison, Daniel J. Patnaude, Patrick Slane, Pasquale Blasi, Stefano Gabici, The Astrophysical Journal, 661:879Y891 (2007)
7. *The dependence of the IR-radio correlation on the metallicity-* Jianjie Qiu, Yong Shi, Junzhi Wang, Zhi-Yu Zhang and Luwenjia Zhou, (2017)
8. *The radio - far infrared correlation in the faintest star forming dwarf galaxies-* Sambit Roychowdhury and Jayaram N. Chengalur, Mon. Not. R. Astron. Soc. 000, 1–6 (2012)
9. *Tracing star formation with non-thermal radio emission-* Jennifer Schober, D. R. G. Schleicher, R. S. Klessen, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 000, 1-13 (2017)
10. *VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: The infrared-radio correlation of star-forming galaxies and AGN to $z > 6$ -* J. Delhaize, V. Smolčić, I. Delvecchio, M. Novak, M. Sargent, N. Baran, B. Magnelli, G. Zamorani, E. Schinnerer, E. J. Murphy, M. Aravena, S. Berta, M. Bondi, P. Capak, C. Carilli, P. Cilieg, F. Civano, O. Ilbert, A. Karim, C. Laigle, O. Le Fèvre, S. Marchesi, H. J. McCracken, M. Salvato, N. Seymour and L. Tasca, Astronomy & Astrophysics manuscript no. JDelaize_IRRC_20170504 (2017)
11. *The far-infrared/radio correlation and radio spectral index of galaxies in the SFR–M plane up to $z=2$ -* B. Magnelli, R. J. Ivison, D. Lutz, I. Valtchanov, D. Farrah, S. Berta, F. Bertoldi, J. Bock, A. Cooray, E. Ibar, A. Karim, E. Le Floc'h, R. Nordon, S. J. Oliver, M. Page, P. Popesso, F. Pozzi, D. Rigopoulou, L. Riguccini, G. Rodighiero, D. Rosario, I. Roseboom, L. Wang, and S. Wuyts, Astronomy & Astrophysics manuscript no. 24937 (2014).
12. *The effect of star formation on the Far-Infrared-Radio correlation within galaxies-* E.J. Murphy, G. Helou, R. Braun, J.D.P. Kenny, L. Armus, D. Calzetti, B.T. Draine, R.C. Kennicutt, H. Roussel, F. Walter, G.J. Bendo, B. Buckalew, D.A. Dale, C.W. Engelbracht, J.D.T. Smith, M.D. Thornley, ApJ Letters (2006)
13. *Star-forming dwarf galaxies: the correlation between far-infrared and radio fluxes-* Dominik R. G. Schleicher and Rainer Beck, A&A 593, A77 (2016)

14. *An Initial Look at the Far Infrared-Radio Correlation within Nearby Star-Forming Galaxies Using the Spitzer Space Telescope-* E. J. Murphy, R. Braun, G. Helou, L. Armus, J.D. P. Kenney. *The Astrophysical Journal*, 638:157–175 (2006)
15. *The far-infrared-radio correlation in galaxies-* U. Lisenfeld, M. A. Perez-Torres, A. Alberdi, L. Colina, S. Garca-Burillo, and A. Alonso-Herrero, Spanish SKA Book (2015)
16. *An ALMA survey of submillimetre galaxies in the COSMOS field: The extent of the radio-emitting region revealed by 3 GHz imaging with the Very Large Array-* O. Miettinen, M. Novak, V. Smolčić, I. Delvecchio, M. Aravena, D. Brisbin, A. Karim, E. J. Murphy, E. Schinnerer, M. Albrecht, H. Aussel, F. Bertoldi, P. L. Capak, C. M. Casey, F. Civano, C. C. Hayward, N. Herrera Ruiz, O. Ilbert, C. Jiang, C. Laigle, O. Le Fèvre, B. Magnelli, S. Marchesi, H. J. McCracken, E. Middelberg, A. M. Muñoz Arancibia, F. Navarrete, N. D. Padilla, D. A. Riechers, M. Salvato, K. S. Scott, K. Sheth, L. A. M. Tasca, M. Bondi, and G. Zamorani, *Astronomy & Astrophysics* manuscript no. AA_30443 (2017)
17. *An ALMA survey of submillimetre galaxies in the COSMOS field: Physical properties derived from energy balance spectral energy distribution modeling-* O. Miettinen, I. Delvecchio, V. Smolčić, M. Aravena, D. Brisbin, A. Karim, B. Magnelli, M. Novak, E. Schinnerer, M. Albrecht, H. Aussel, F. Bertoldi, P. L. Capak, C. M. Casey, C. C. Hayward, O. Ilbert, H. T. Intema, C. Jiang, O. Le Fèvre, H. J. McCracken, A. M. Muñoz Arancibia, F. Navarrete, N. D. Padilla, D. A. Riechers, M. Salvato, K. S. Scott, K. Sheth, and L. A. M. Tasca, *Astronomy & Astrophysics* manuscript no. JDelaize_Irrc_20170504 (2017)

Biografija

Rođena sam 6.6.1993. godine u Leskovcu. Osnovnu školu 8. Oktobar u Vlasotincu završavam 2008. godine, kao učenik generacije, kada upisujem Gimnaziju „Stevan Jakovnjević“, prirodno-matematički smer, takođe u Vlasotincu. Po završetku srednje škole, 2012. godine, upisujem osnovne akademske studije fizike na Prirodno-Matematičkom fakultetu u Novom Sadu, smer astronomija sa astrofizikom. Tokom studija učestvovala sam na manifestacijama kao što su Festival nauke, Noć istraživača i studentska astronomska radionica (SAR) u Beogradu i Novom Sadu. 2016. godine sam takođe prisustvovala Studentskoj Vidojevičkoj Astronomskoj praksi (SVAP). Osnovne akademske studije fizike - astronomija sa astrofizikom završavam 15.9.2017. godine, i oktobra iste godine upisujem master akademske studije fizike- astronomija sa astrofizikom, na Prirodno-Matematičkom fakultetu u Novom Sadu.

- U Novom Sadu, septembar 2018.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj

RBR

Identifikacioni broj

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Master rad

VR

Autor: Marina Pavlović

AU

Mentor: Prof. dr Tijana Prodanović

MN

Naslov rada: Uticaj interakcija galaksija na njihovo termalno i netermalno zračenje na velikim crvenim pomacima

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2018

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada: 4 poglavlja/35 strana/2 slike/12 grafika/ 6 tabele

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Astrofizika

ND

Predmetna odrednica: FIR-radio korelacija/Interakcija galaksija/Plimski kosmički zraci

PO

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: Nema

VN

Izvod: U radu je analizirana FIR-radio korelacija na uzorku od 37 SMG galaksija, od čega 11 nepravilnih i 26 diskastih galaksija, u zavisnosti od crvenog pomaka. Uočen je isti trend opadanja parametra q_{FIR} od crvenog pomaka kao i u Delhaize et al. (2016), u kome nisu razdvojene pravilne od nepravilnih galaksija. Razdvajanjem galaksija po morfologiji, pokazali smo da morfologija galaksija igra bitnu ulogu u slučaju zavisnosti parametra q_{FIR} od crvenog pomaka.

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća: Maj, 2018.

DP

datum odbrane: 14.9.2018

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: Prof. dr Miodrag Krmar, redovni profesor

Član: Prof. dr Tijana Prodanović, redovni profesor

Član: Prof. dr Svetlana Lukić-Petrović, redovni profesor

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author: Marina Pavlović

AU

Mentor: Prof.dr Tijana Prodanović

MN

Title: Impact of galactic interactions on thermal and non-thermal radiation of galaxies at large redshifts

TI

Language of text: Serbian (latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Republic of Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2018.

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description: 4 chapters/35 pages/2 pictures/12 graphs/ 6 tables

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Astrophysics

SD

Subject/Key words: FIR-radio correlation/ Galaxy interactions/Tidal cosmic rays

SKW

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: none

N

Abstract: In this paper, we analyzed FIR-radio correlation on a sample of 37 SMG galaxies (11 interacting and 26 disc like), in dependence on redshift. We spotted the same trend of parameter q_{FIR} decreasing with redshift increase, like in Delhaize et al. (2016), which didn't use separate data for normal and irregular galaxies. By separating galaxies by morphology, we have shown that the morphology of galaxies plays an important role in case of dependence of the parameter q_{FIR} with redshift.

AB

Accepted by the Scientific Board: May, 2018.

ASB

Defended on: 14.9.2018

DO

Thesis defend board:

DB

President: Prof. dr Miodrag Krmar, Full professor

Member: Prof. dr Tijana Prodanović, Full professor

Member: Prof. dr Svetlana Lukić-Petrović, Full professor