



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



UTICAJ SUDARA GALAKSIJA NA BRZINU FORMIRANJA ZVEZDA

- završni rad -

Mentor:

Prof. dr Tijana Prodanović

Kandidat:

Vlasto Petraš

Novi Sad, 2016.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. DIJAGNOSTIČKE METODE	4
2.1. Metod kontinualnog UV spektra	5
2.2. Metod dalekog IC spektra	5
2.3. Metod radio spektra	6
2.4. Metod rekombinacionih linija	7
2.5. Metod zabranjenih linija	8
2.6. Metod mladih zvezdanih objekata	9
3. FAZE SUDARA GALAKSIJA	9
4. SIMULACIJE SUDARA GALAKSIJA	10
4.1. Očekivane vrednosti SFR-a	11
4.2. Nastanak zvezda tokom sudara galaksija	11
5. FUNKCIJA INICIJALNE MASE	12
5.1. Definicija FIM-a	12
6. ANALIZA PODATAKA	14
6.1. Poređenje SFR-a različitih markera	16
6.1.1. Poređenja u svih pet faza sudara galaksija	17
6.1.2. Prva faza sudara	18
6.1.3. Druga faza sudara	19
6.1.4. Treća faza sudara	20
6.1.5. Četvrta faza sudara	21
6.1.6. Peta faza sudara	22
7. DISKUSIJA	23
8. ZAKLJUČAK	29
LITERATURA	30

1. UVOD

Galaksije predstavljaju fundamentalne gradivne jedinice svemira, i kao takve galaksije je lakše prepoznati na slici nego ih jednoznačno definisati. Ovo je posledica nedovoljnog poznavanja detalja galaktičke strukture i dinamičkih procesa unutar i izvan galaksije, koji dovode do toga da galaksije evoluiraju ili čak mogu da nestanu kao što je to primer pri sudarima galaksija. Najjednostavnija definicija galaksija je, da su to objekti sačinjeni od zvezda, gasa, prašine i tamne materije. Dimenzije im se kreću u rasponu od 0,1 kpc do 30 kpc (kiloparseka) a u sebi mogu da sadrže od 10^6 do 10^{12} zvezda (Prodanović 2010). Danas se procenjuje da u svemiru postoji oko 160 milijardi galaksija (Ćirković 2008).

Prvu potvrdu da u našem svemiru pored naše galaksije Mlečni put, postoje i druge galaksije, ustanovio je Edvin Hابل (Edwin Powell Hubble) 1924. godine, kada je u Andromedinoj maglini¹ otkrio specifičnu grupu promenljivih zvezda Cefeide, pomoću kojih je ustanovio da je ova (tada zvana) maglina udaljena od nas nekoliko miliona svetlosnih godina (više od 300 kpc), pa se s obzirom na dimenzije naše galaksije, morala nalaziti daleko izvan nje. Od tad pa do danas, ovi objekti svemira se intenzivno istražuju. Svakako napredak u istraživanju galaksija u velikoj meri podređen je razvoju posmatračke tehnike i tehnologije.

Sve galaksije morfološki mogu se podeliti u tri osnovne grupe galaksija: spiralne, eliptične i nepravilne. Opšti odnos broja spiralnih, eliptičnih i nepravilnih galaksija u današnjoj epohi, možemo opisati odnosom 60:30:10 (Ćirković 2008). Lokalno mogu da postoje značajna odstupanja od ovog odnosa. Pored morfološke podele galaksija, može se izvršiti i fizička klasifikacija na normalne i aktivne galaksije. Pod normalnim galaksijama podrazumevamo galaksije kod kojih njihovi spektri predstavljaju uglavnom prost zbir spektara gasa i zvezda koje se u njima nalaze. Spektar aktivne galaksije je takav da je za njegovo objašnjenje potrebno uvesti dodatne mehanizme ili posebne uslove. Zračenje u aktivnim galaksijama je intenzivnije u jednom domenu ili u celom spektru. Posebna vrsta aktivnih galaksija su takozvane “starburst” galaksije. Glavna odlika ovih galaksija je što u njima dolazi do iznenadnog i naglog formiranja velikog broja zvezda, usled čega i njihovo zračenje je mnogo intenzivnije u poređenju sa normalnim galaksijama. Veličina kojom se opisuje brzina nastajanja zvezda u određenoj galaksiji naziva se stopa ili brzina formiranja zvezda i obično se označava skraćenicom SFR². Merna jedinica ove veličine je $M_{\text{Su}}/\text{god.}$ ³ Ova jedinica govori koliko zvezda mase Sunca se stvori u galaksiji za jednu godinu. Normalne galaksije kao što je naša, stvore nekoliko zvezda mase Sunca u jednoj godini ($\text{SFR} \approx 1-5 M_{\text{Su}}/\text{god.}$) Za razliku od njih, kod “starburst” galaksija, ova veličina ima vrednost $\text{SFR} \approx 10-100 M_{\text{Su}}/\text{god.}$, tj. ove galaksije stvaraju 10 do 100 zvezda masa Sunca u jednoj godini (Muxlow et al. 2006. “Starburst” galaksije su galaksije bogate gasom i prašinom, što je neophodan uslov za formiranje zvezda. Naglo formiranje nastaje kada gas počinje gravitaciono da se sažima. Uzroci koji izazivaju sažimanje mogu biti različiti, kao što su eksplozija supernove, prolazak masivnog objekta pored oblaka gasa i slično. Međutim, najbitniji proces u kome galaksije postaju “starburst” galaksije su sudari i interakcije sa nekom drugom galaksijom. Sudari i interakcije galaksija jedan su od najzanimljivijih prizora u svemiru, tokom kojih dolazi do narušavanja strukture interagujućih galaksija. Kao krajnji produkt sudara obično je eliptična galaksija. Vrednosti SFR-a koje mogu da se dobiju u sudarajućim galaksijama zavise pre svega

¹ Sve do 1924. godine značajan deo astronomske zajednice nije galaksije prepoznavao kao samostalne objekte, nego kao vrstu maglina koje se nalaze unutar galaksije Mlečni put.

² Engleski naziv ove veličine je **Star Formation Rate**.

³ M_{Su} - masa koja je jednaka masi Sunca.

od količine gasa i prašine u interagujućim galaksijama, njihovih međusobnih dimenzija a možda i od faze sudara u kojoj se galaksije nalaze. Međutim, sudar galaksija nije preduslov nastajanja “starburst” galaksija, a isto tako ako je neka galaksija okarakterisana kao “starburst” galaksija, ne znači da je nastala sudarom galaksija. Jednostavno, većina “starburst” galaksija koje poznajemo nalazi se u nekoj interakciji ili u procesu sudara sa drugom galaksijom.

Dužina života jedne zvezde zavisi od njene mase. Dužina života zvezde i njena masa su obrnuto proporcionalne veličine, što znači da masivne zvezde imaju kraći životni vek. Što je njena masa veća, zvezda intenzivnije zrači, brže troši gorivo, pa samim tim i kraće traje. Tako recimo zvezde slične Suncu (spektralna klasa G) žive u proseku 10^{10} godina, dok recimo zvezde koje imaju masu u proseku veću 18 odnosno 60 puta (to su zvezde spektralne klase B odnosno O), žive nekoliko 10^7 godina odnosno nekoliko 10^6 godina. Rezultati simulacija sudara galaksija (Di Matteo et al. 2008), procenjuju da procesi sudara galaksija traju u proseku 3×10^9 godina. Na osnovu toga zaključuje se da zvezde poput Sunca i manje mase nisu pogodne za određivanje SFR-a u sudarajućim galaksijama, pošto dugo žive. Najpogodnije zvezde su one koje najkraće žive tj. zvezde spektralne klase B i O.

Iako je određivanju vrednosti SFR-a posvećen veliki broj istraživačkih i naučnih radova, danas još uvek ne postoji objedinjena teorija koja bi na zračenjima svih talasnih dužina dala iste vrednosti SFR-a, tako da njena vrednost može značajno da varira u zavisnosti od talasne dužine zračenja.

Cilj ovog rada je da ispita da li faza sudara galaksija utiče na pouzdanost određivanja SFR-a za neke markere, tj. da utvrdi da li postoji kontaminacija vrednosti SFR-a usled nekih procesa unutar interagujućih galaksija, kao i da posle odstranjivanja kontaminiranih vrednosti SFR-a ispita kako vrednosti SFR-a zavise od faze sudara.

Rad je tako organizovan da u drugom poglavlju su predstavljene metode merenja SFR-a putem različitih markera. Faze sudara galaksija opisane su u trećem poglavlju. U četvrtom poglavlju govori se o simulacijama sudara galaksija. U petom poglavlju iznesene su osnovne postavke o funkciji inicijalne mase. Šesto poglavlje daje pregled poređenja SFR-a određenih pomoću različitih markera. Mogući procesi koji dovode do rezultata predstavljenih u šestom poglavlju, predstavljeni su u sedmom poglavlju, dok su zaključci izneseni u osmom poglavlju.

2. DIJAGNOSTIČKE METODE

Postoje različite metode i tehnike kojima se određuje SFR. Usled slabe rezolucije posmatranih nebeskih sistema (galaksija, zvezdanih jata itd.) tj. nemogućnosti da u njima zvezde posmatramo pojedinačno, spektre zračenja pojedinih zvezda možemo meriti samo u najbližim nebeskim sistemima. Usled toga najviše informacija o formiranju zvezda dobija se na primer putem posmatranja integrisanih spektara u ultraljubičastom (UV) i infracrvenom (IC) domenu elektromagnetnog zračenja, ili posmatranjem rekombinacionih linija u H II regionima ($H\alpha$ -linije na primer). Za svaku metodu zajedničko je što se pokušava detektovati zračenje mladih zvezda a izbegava se zračenje starijih zvezda. SFR se najčešće određuje na osnovu luminoznosti galaksije. Luminoznost galaksije predstavlja ukupnu energiju u određenom opsegu talasnih dužina koje ona izrači sa svoje površine u jedinici vremena. Veza između ove dve veličine može da se određuje na osnovu sintetisanih modela galaksija. Ovim modelima moguće je dobiti spektar zračenja ili luminoznost pojedinih zvezda, a zatim njihovim spajanjem dobiti spektar ili luminoznost cele galaksije ili proceniti SFR. Poređenjem ovakvih modela sa realnim galaksijama, može se proceniti SFR u posmatranim galaksijama. Jedan od takvih modela je Starburst99 (Calzetti 2012).

U sledećem tekstu dat je pregled osnovnih markera za detekciju SFR-a. Procene SFR dosta se razlikuju u zavisnosti od primenjenog markera, ali i od samog autora koji je definisao procenu, tako da su one generalno prilično neprecizne.

2.1. Metod kontinualnog UV spektra

Posmatranje UV spektra, najčešće u opsegu talasnih dužina od 125 nm do 250 nm, omogućava merenje luminoznosti mladih masivnih zvezda ($M > 5 M_{\text{Su}}$), pošto one najintenzivnije zrače u opsegu ovih talasnih dužina. Ovo je direktna metoda, s obzirom da zračenje potiče direktno od mladih masivnih zvezda klase O i B. Pogodne su i zbog toga što su to dovoljno kratke talasne dužine, tako da uticaj starijih zvezda na spektar bude minimalan, pošto one slabo emituju zračenje na ovim talasnim dužinama. Iako nisu pogodne za posmatranje spektra bliskih galaksija (sa crvenim pomakom $z < 0,5$) sa Zemlje, moguće ih je koristiti za posmatranja daljih galaksija ($z \sim 1-5$). Uzrok ovome je što zemljina atmosfera nije providna za zračenja talasne dužine manje od 300 nm, pošto ono biva apsorbovano ozonom, molekulima i atomima kiseonika i azota. Međutim, kada UV zračenje dolazi iz galaksije koja je od nas znatno vremenski i prostorno udaljena, usled Doplerovog pomaka, njeno zračenje može dovoljno da se pomeri ka IC delu spektra, tako da može “preskočiti” ovu prepreku i biti detektovano na površini Zemlje. Zato je najpogodnije UV spektre meriti izvan Zemlje, zbog izostanka ove neželjene apsorpcije u atmosferi.

Dodatna mana ove metode je slabljenje zračenja prilikom prolaska kroz prašinu. Naime, apsorpcija na prašini se povećava sa smanjenjem talasne dužine zračenja. Prašina se skoro uvek javlja u oblasti intenzivnog formiranja zvezda ili na putu zračenja od izvora ka posmatraču, kao smetnja u međuzvezdanom ili međugalaktičkom prostoru.

Ako se pretpostavi da se SFR ne menja u vremenskom intervalu uporedivim sa prosečnim životom zvezda koje su dominantni emiteri UV zračenja⁴ ($t < 10^8$ godina), korišćenjem Salpeterove funkcije inicialne mase (Salpeter 1955) u granicama od $0,1 M_{\text{Su}}$ do $100 M_{\text{Su}}$, može se uvesti sledeća relacija za određivanje SFR-a (Kennicutt 1998):

$$\text{SFR} (M_{\text{Su}} \text{ god}^{-1}) = 1,4 \times 10^{-28} \times L_{\text{UV}} (\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}) \quad (1)$$

gde L_{UV} predstavlja luminoznost galaksije u opsegu talasnih dužina od 150 nm do 280 nm. Ova jednačina se primenjuje na galaksijama koje kontinualno proizvode zvezde u vremenskom intervalu 10^8 godina ili duže.

2.2. Metod dalekog IC spektra

Infracrveni zraci talasnih dužina u opsegu 10-300 μm nastaju u procesu zračenja međuzvezdane prašine, koja se često nalazi u oblasti rađanja zvezda. Masivne mlade zvezde uglavnom emituju UV i vidljive zrake. Međuzvezdana prašina veoma intenzivno apsorbuje UV zračenje i remituje ga kao termalno IC zračenje, zbog čega se IC zračenje velikih talasnih dužina (FIR⁵), koristi kao marker mladih zvezda ili marker SFR-a.

Iako ovako zračenje ne utiče ekstinkcija, interpretacija FIR spektra može da bude složena. Sastav prašine kao i njena raspodela u pravcu posmatranja, odnosno njena neprozirnost, značajno

⁴Recimo prosečan život zvezde klase O6 je $6 \cdot 10^6$ godina a klase B5 u proseku $350 \cdot 10^6$ godina (Calzetti 2012).

⁵ Skraćenica od Far Infrared što je engleski naziv za ovu veličinu

utiču na udeo apsorpcije UV zračenja. Efikasnost zavisi i od udela mladih zvezda u zagrevanju prašine. Osim toga deo FIR zračenja potiče i od zagrevanja od strane starijih zvezda.

Najpogodniji slučaj je kad su mlade zvezde dominantni emiteri zračenja u odnosu na starije zvezde, i to u UV i vidljivoj oblasti a neprozračnost prašine je velika. Ovo je slučaj kod “starburst” galaksija i tada je FIR zračenje najbolji SFR marker.

Kada su u pitanju normalne galaksije situacija je malo složenija. Kod njih jedan deo FIR spektra, topliji, potiče od prašine koja se nalazi u oblasti formiranja zvezda (talasne dužine oko 60 μ m). Drugi deo, hladniji (sa talasnim dužinama preko 100 μ m), potiče od raspršene prašine u međuzvezdanom prostoru koji zagrevaju i starije zvezde preko vidljivog spektra. U plavim galaksijama obe komponente se ravnomerno zagrevaju putem mladih zvezda, dok kod crvenih galaksija na zagrevanje utiču i starije zvezde, što može biti značajno.

Veoma značajan deo zagrevanja prašine i gasa je i putem udarnih i plimskih talasa, koji se javljaju prilikom sudara ili interakcije galaksija. Pod uticajem ovih procesa, čestice prašine i gasa se međusobno sudaraju što dovodi do njihovog zagrevanja, usled čega ove čestice emituju IC zračenje. Ovi procesi ne potiču od formiranja zvezda, ali svojim zračenjem mogu da utiču na SFR vrednost, zbog čega se mogu tretirati kao smetnja.

Primenom modela u kome se gas sagoreva u vremenskom intervalu 10-100 miliona godina i primenom Salpeterove funkcije inicijalne mase u granicama od 0,1 M_{Su} do 100 M_{Su} , dobija se kalibraciona relacija SFR-a u odnosu na luminoznost galaksije u FIR spektru (Kennicutt 1998):

$$\text{SFR} (M_{\text{Su}} \text{ god}^{-1}) = 4,5 \times 10^{-44} \times L_{\text{FIR}} (\text{ergs}^{-1}) \quad (2)$$

Ova relacija važi samo za “starburst” galaksije. L_{FIR} je luminoznost galaksije u rasponu talasnih dužina od 8 μ m do 1000 μ m. Kod “starburst” galaksija najviše luminoznosti doprinosi zračenje talasnih dužina 10-120 μ m.

2.3. Metod radio spektra

Kontinualno radio zračenje na frekvenciji 1,4 GHz je jedan od mogućih markera SFR-a. Radio spektar koji se koristi kao metoda za određivanje SFR-a, sastoji se od dve komponente: netermalnog ili sinhrotronskog zračenja i termalnog zakočnog ili bremštralung (bremsstrahlung) zračenja. Naelektrisane čestice koje zrače na ovoj frekvenciji ubrzavaju se u udarnim talasima. Udarni talasi nastaju u događajima kao što su eksplozije supernovih ili interakcije galaksija. Posle eksplozije supernove udarni talasi prolaze kroz gas ostatka supernove. Kada su u pitanju interakcije galaksija, čestice se ubzavaju putem plimskih interakcija. Međutim, problem je što čestice ubrzane putem plimskih interakcija, mogu da utiču na precenjivanje vrednosti SFR-a, pošto one u nekim slučajevima nisu povezane sa procesom formiranja zvezda.

Kada ove naelektrisane čestice (uglavnom elektroni), krećući se relativističkim brzinama, ulaze u magnetno polje tako da njihov vektor brzine nije paralelan sa vektorom indukcije magnetnog polja, na ove naelektrisane čestice dejstvuje Lorencova sila. Usled toga one počinju da se kreću po putanji u obliku helikoide. Zbog dejstva sile, ove čestice imaju ubrzanje (i to samo normalnu komponentu ubrzanja, kada je vrednost magnetne indukcije konstantna), usled čega emituju zračenje koje nazivamo netermalno ili sinhrotronsko zračenje.

Ako se pak ove naelektrisane čestice kreću kroz neku sredinu kao što je jonizovan gas, one će biti pod dejstvom Kulonove sile od okolnih naelektrisanih čestica. U ovom slučaju čestice se ponovo kreću ubrzano (odnosno usporeno) i emituju zračenje. Emisija dovodi do smanjenja kinetičke energije čestice, usled čega joj brzina opada, pa čestica kao da koči. Pošto ovo zračenje

zavisi i od brzine kretanja ovih čestica, a na tu brzinu utiče temperatura okoline, ovo zračenje naziva se termalno zakočno ili bremštralung zračenje.

Na frekvenciji 1,4 GHz sinhrotronsko zračenje dominira. Koristeći Salpeterovu funkciju inicialne mase u granicama od 0,1 M_{Su} do 100 M_{Su} , može se koristiti sledeća jednačina da se odredi SFR iz radio zračenja, pod uslovom da radio zračenje potiče od elektrona ubrzanih u udarnim talasima ostataka supernovih (Cram et al. 1998):

$$\text{SFR} (M_{\text{Su}} \text{ god}^{-1}) = 2,5 \times 10^{-29} \times L_{1,4} (\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}) \quad (3)$$

$L_{1,4}$ predstavlja luminoznost galaksije na frekvenciji 1,4 GHz.

Prednost ove metode je što nije osetljiva na ekstinkciju.

Karakteristika radio zračenja je i njegova korelacija sa FIR zračenjem u galaksijama u kojima se intenzivno rađaju zvezde. Ova korelacija se prostire kroz pet redova veličine luminoznosti galaksija, ne samo u lokalnim galaksijama, nego i na većim crvenim pomacima, ali i kod galaksija različite morfološke klasifikacije. Ova korelacija opisuje se q_{IR} parametrom kao (Yun et al. 2001):

$$q_{\text{IR}} = \log\left(\frac{F_{\text{FIR}}}{3,75 \times 10^{12} \text{ Wm}^{-2}}\right) - \log\left(\frac{S_{1,4}}{\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}}\right) \quad (4)$$

gde su $S_{1,4}$ i F_{FIR} fluks kontinualnog zračenja na 1,4 GHz odnosno FIR fluks prašine. Vrednost parametra q_{IR} je 2,34 i određena je na osnovu uzorka od 1800 galaksija (Yun et al. 2001).

Ako ovaj parametar ima manju vrednost od 2,34 u toj galaksiji je radio zračenje intenzivnije od FIR zračenja. Ako je veći, FIR zračenje je intenzivnije od radio zračenja. Pretpostavlja se da ovaj parametar može da menja svoje vrednosti u galaksijama koje međusobno interaguju ili se sudaraju. Ova vrednost možda zavisi od faze sudara galaksija (Murphy 2013; Donevski, Prodanović 2015).

Iako obe komponente zračenja zavise od pojave formiranja zvezda, nije u potpunosti razjašnjeno, koji fizički procesi su odgovorni sa dobru korelaciju između njih. Jedno moguće objašnjenje je da je ono posledica naglog formiranja zvezda. Zračenje koje emituju mlade masivne zvezde biva usput apsorbavano od strane prašine i reemitovano na talasnim dužinama FIR zračenja. Iste te zvezde pošto su masivne, svoj život završavaju kao supernove, i tom prilikom pri eksploziji ubrzavaju čestice (elektrone i protone dominantno) u prostor koje zatim emituju zračenje u radio domenu (Donevski, Prodanović 2015).

2.4. Metod rekombinacionih linija

Ove linije nastaju emisijom zračenja H II regiona. H II regioni su oblasti jonizovanog vodonika, koji se nalaze u okolini mladih masivnih zvezda klase O i B. S obzirom da ove zvezde najviše emituju UV zračenje, ovo zračenje jonizuje oblake neutralnog vodonika. U procesu rekombinacije, elektron ne mora obavezno da se vrati na osnovni nivo, nego može prvo da se rekombinuje na neki od pobuđenih nivoa, pri čemu višak energije odmah izrači što doprinosi kontinualnom zračenju. Zatim kaskadnim prelazima odlazi na najniži slobodni nivo. Na taj način atom vodonika može nekoliko puta da emituje zračenje, pri čemu nastaju emisione linije različitih talasnih dužina od radio do vidljivog domena. Ako se pak rekombinuje u osnovno stanje, emitovaće se UV zračenje, koje opet jonizuje neutralni vodonik (Prodanović 2010). U spektrima galaksija ove linije se pojavljuju kao jako intenzivne, pa su direktni pokazatelji postojanja mladih masivnih zvezda. Kao indikator najčešće se koristi Balmerova alfa linija (H α)

talasne dužine 656,3 nm, koja nastaje prelazom sa trećeg na drugi energetski nivo. Osim nje koriste se i sledeće linije: H β , P α , P β , Br α i Br γ .

Pošto jonizaciju izazivaju uglavnom zvezde mase najmanje 10 M_{Su} i sa vremenom života od najviše 20 miliona godina, rekombinacione linije predstavljaju direktnu meru SFR-a, nezavisno od brzine stvaranja zvezda u prošlosti.

Koristeći Salpeterovu funkciju inicijalne mase sa masama zvezda u rasponu od 0,1 M_{Su} do 100 M_{Su} , jednačina koja povezuje SFR sa luminoznošću galaksije na H α liniji, dobija oblik (Kennicutt 1998):

$$\text{SFR} (M_{Su} \text{ god}^{-1}) = 7,9 \times 10^{-42} \times L_{H\alpha} (\text{erg s}^{-1}) \quad (5)$$

Glavni nedostatak ove metode je osetljivost na neodređenosti u funkciji inicijalne mase i ekstinkciji. Pošto zračenje koje jonizuje HII regione uglavnom emituju zvezde sa masom najmanje 10 M_{Su} , SFR dobijen ovom metodom je izuzetno zavisano od usvojene funkcije inicijalne mase. Tako, ako se recimo umesto Salpeterove, koristi Skalova funkcija inicijalne mase (Scalo 1986), vrednost SFR se menja trostruko (Kennicutt 1998).

Ekstinkcija je najčešći izvor sistematskih grešaka pri merenju, a njena veličina se određuje poređenjem H α zračenja i rekombinacionih linija IR zračenja ili radio kontinua. Ekstinkcija se javlja u vidu apsorpcije ove emisije linije od strane prašine. U nekim lokalizovanim oblastima kao što su gusti HII regioni u nekim "starburst" galaksijama, ekstinkcija je intenzivna, pa se za dobijanje SFR-a koriste i rekombinacione linije Bracketove ili Pašenove serije. Sem toga, javlja se i kontaminacija usled zabranjenih linija jonizovanog azota na talasnim dužinama 658,4 nm i 654,8 nm, između kojih je H α linija uklještena. Glavna prednost ove metode je osetljivost na broj jonizujućih fotona koji su opet proporcionalni broju mladih masivnih zvezda.

2.5. Metod zabranjenih linija

Zabranjene linije nastaju prilikom zabranjenih prelaza. To su prelazi koji po kvantnomehničkim selekcionim pravilima nisu dozvoljeni. Međutim, to ne znači da ovi prelazi nisu mogući, već samo da su malo verovatni, odnosno da je potrebno dosta vremena da se atom spontano deekscituje iz takvog stanja. Jedan od načina da se atom deekscituje iz ovih takozvanih metastabilnih stanja je putem radijativne deekscitacije, prilikom koje nastaju zabranjene linije.

Pošto H α emisije linije na crvenim pomacima iznad 0,5 izlaze iz vidljivog dela spektra, kao SFR indikator može da se koristi dublet zabranjenih linija [OII] talasne dužine 372,7 nm. Studije su pokazale da su ove linije u korelaciji sa H α linijom. Iako ove linije nisu direktno povezane sa jonizujućim zračenjem mladih vrelih zvezda, mogu se putem H α linija kalibrisati za detekciju SFR-a. Vrednost određena na ovaj način ima veću grešku u odnosu na H α , pošto odnos zračenja [OII]/H α varira u zavisnosti od galaksije. Pored toga, ekscitacija linija [OII] zavisi od jonizacije gasa i zastupljenosti elementa u njemu (Jansen 2000).

Prednost ove metode je što se dubleti [OII] mogu posmatrati u vidljivom delu spektra, kada se posmatraju galaksije na crvenim pomacima do $z \approx 1,6$. Kao moguću kalibraciju SFR-a preko luminoznosti [OII] zabranjenih linija, može se koristiti izraz (Kennicutt 1998):

$$\text{SFR} (M_{Su} \text{ god}^{-1}) = 1,4 \times 10^{-41} \times L_{[OII]} (\text{erg s}^{-1}) \quad (6)$$

2.6. Metod mladih zvezdanih objekata

Jedna od metoda merenja SFR-a je i prebrojavanje objekata ili događaja koji prate formiranje zvezda (npr. eksplozije supernovih) na mestima gde je rezolucija nebeskog sistema pogodna da se pojedini objekti unutar sistema mogu raspoznati kao samostalni (uglavnom unutar Mlečnog puta). U molekularnim oblacima koji se nalaze na udaljenosti do 1 kpc od Sunčevog sistema, SFR određuje se prebrojavanjem mladih zvezdanih objekata kao što su protozvezde. Pošto su protozvezde još uvek obavijene oblakom gasa i prašine iz kog su nastale, detektujemo ih preko IC zračenja ovih objekata. Veza ukupnog broja mladih zvezdanih objekata i SFR-a data je relacijom (Calzetti 2012):

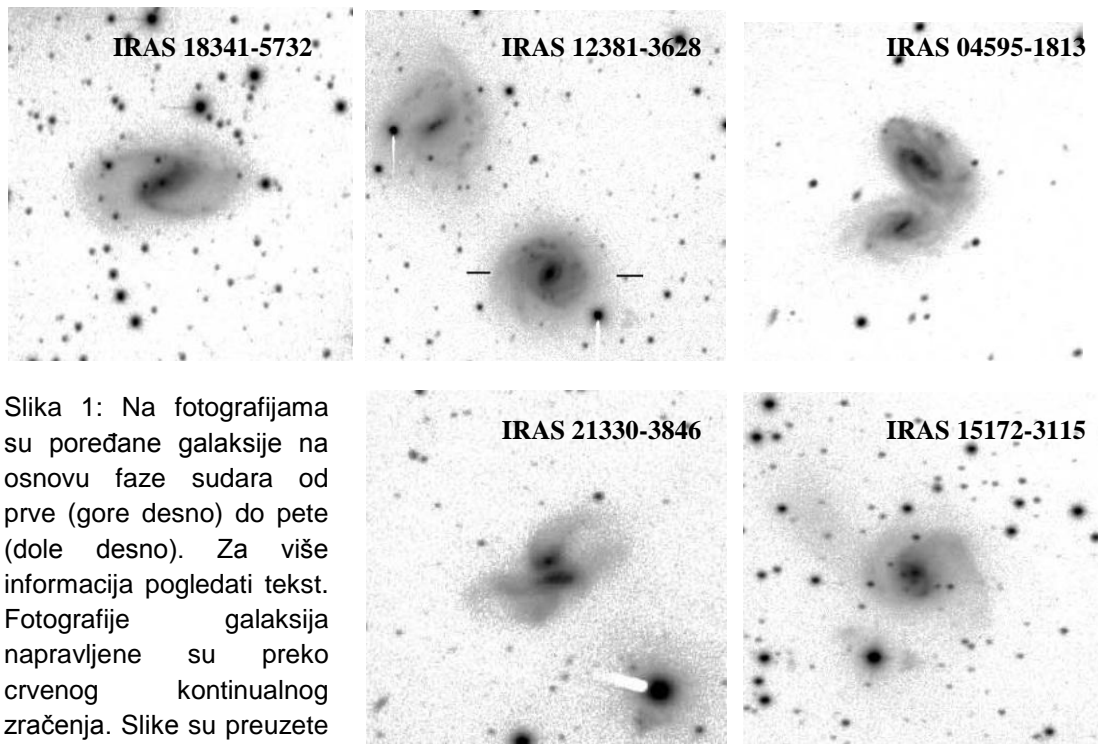
$$\text{SFR} (M_{\text{su}} \text{ god}^{-1}) = N \frac{\langle M \rangle}{t} \quad (7)$$

U ovom izrazu N predstavlja ukupan broj mladih zvezdanih objekata, $\langle M \rangle$ je srednja masa mladih zvezdanih objekata i ona slabo zavisi od usvojene funkcije inicijalne mase a to je vreme života mladih zvezdanih objekata koje je grubo procenjeno na 2×10^6 godina (Calzetti 2012).

3. FAZE SUDARA GALAKSIJA

Da bi se lakše ispratila dešavanja u galaksijama koje učestvuju u sudaru, izvršena je podela u pet faza sudara, po uzoru na izvršenu podelu kod Haan et al. (2011). Svaka od faza sudara, prikazana je na slici 1.

U prvoj fazi sudara, galaksije su znatno udaljene jedna od druge, usled čega i nema značajne interakcije među njima. Usled toga diskovi galaksija su simetrični tj. nisu deformisani (ako govorimo o spiralnim galaksijama koje prethodno nisu učestvovala u nekoj interakciji), i ne



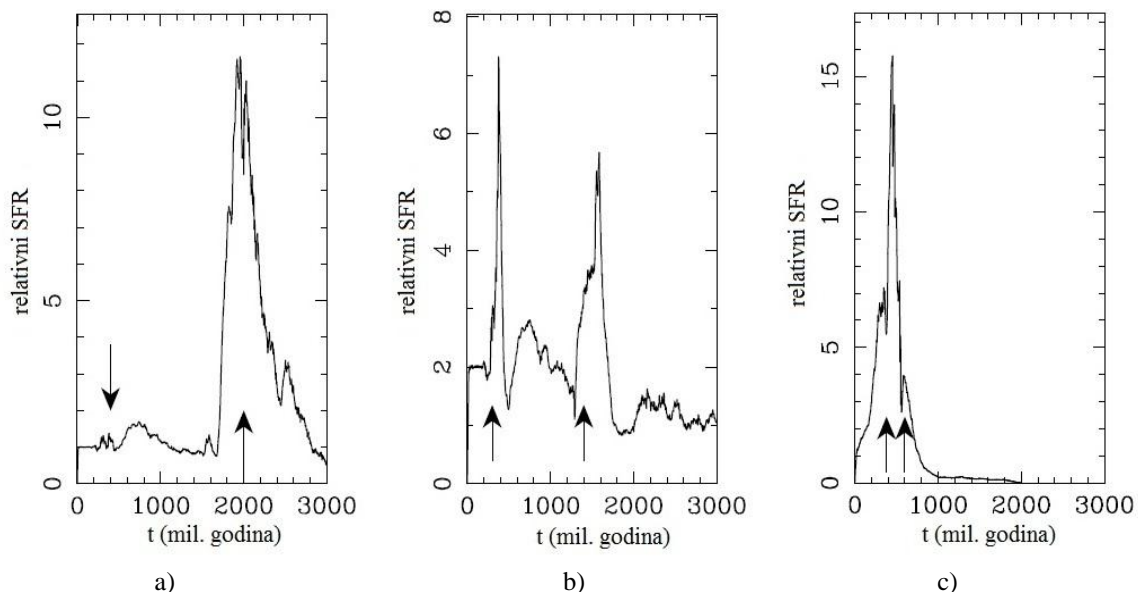
Slika 1: Na fotografijama su poređane galaksije na osnovu faze sudara od prve (gore desno) do pete (dole desno). Za više informacija pogledati tekst. Fotografije galaksija napravljene su preko crvenog kontinualnog zračenja. Slike su preuzete iz Dopita et al. 2002.

pojavljaju se plimski repovi. U ovoj fazi sudara nalazi se recimo galaksija IRAS 18341-5732. Tokom druge faze sudara, galaksije su se znatno približile jedna drugoj. Javlja se interakcija, tako da može doći do deformacije diska galaksija, usled čega izgled diska može biti asimetričan i mogu da se pojave slabi plimski repovi ili most koji spaja dve galaksije. Sudarajuće galaksije se i dalje mogu prepoznati kao zasebni objekti. Primer ove faze je IRAS 12381-3628. IRAS 04595-1813 predstavnik je treće faze sudara galaksija. Treća faza sudara odlikuje se po tome što se diskovi galaksija stapaju međusobno, formirajući tako zajedničku ovojnica oko jezgara galaksija koja su i dalje razdvojena. U četvrtoj fazi sudara jezgra su i dalje razdvojena, s tim da se javljaju intenzivni plimski repovi. Galaksije gube svoju prepoznatljivu diskoliku strukturu (ako su prethodno bile spiralne) i izgledaju izrazito deformisano. Predstavnik ove faze je IRAS 21330-3846. Glavna karakteristika pete faze sudara je postojanje samo jednog jezgra, koje je nastalo spajanjem jezgara galaksija predaka. Pored toga javljaju se i plimski repovi. U petoj fazi nalazi se sistem IRAS 15172-3115.

U suštini prvu fazu možemo nazvati predsudarno stanje, faze dva, tri i četiri, kao sudarna stanja, a petu fazu kao postsudarno stanje.

4. SIMULACIJE SUDARA GALAKSIJA

Tokom prosečnog čovekovog života, promene koje nastanu u procesu sudara galaksija praktično su zanemarljive. Ovo predstavlja otežavajuću okolnost u istraživanju ove pojave, pošto čovek nije u mogućnosti da sudar dve galaksije isprati od početka do kraja u prirodnim okolnostima. Kao pomoć javljaju se kompjuterske simulacije sudara galaksija. Preko njih postoji mogućnost da se programiranjem i primenom fizičkih zakona iscenira sudar galaksija. Primenom ovakvih simulacija u moguće je procese koji traju nekoliko 10^9 godina, ispratiti za svega nekoliko minuta. Pri tome može se pratiti kako se menjaju određene fizičke veličine tokom trajanja sudara,



Slika 2: Zavisnost relativnog SFR od vremena za tri vrste sudara galaksija. Vrednosti su dobijene putem simulacija sudara galaksija. Strelice ukazuju na vreme međusobnog najbližeg prilaska dve galaksije, odnosno vreme kada je došlo do konačnog spajanja dve galaksije u jednu (slike preuzete iz Di Matteo et al. 2008).

kao što su gustina gasa, njegova raspodela u galaksiji, brzine kretanja raznih objekata unutar galaksije, SFR itd. Jedna takva je Tree–SPH⁶ simulacija (Di Matteo et al. 2008).

4.1. Očekivane vrednosti SFR-a

Generalno, ovakve simulacije ukazuju da tokom sudara galaksija dolazi do povećanja vrednosti SFR-a u odnosu na vrednosti SFR-a kada su galaksije izolovane. Međutim, ova povećanja ne javljaju se tokom određene faze sudara, nego se mogu javiti u različitim fazama sudara, i to ne samo jednom, nego i više puta tokom sudara. Kada se oni javljaju zavisi od ugla pod kojim se njihovi diskovi sudaraju, da li se galaksije sudaraju preko polova ili duž diskova, da li im je rotacija direktna ili retrogradna, kakve su im međusobne količine gasa, prašine i mase, itd. Tako na primer na slici 2.a) data je zavisnost SFR-a od vremena za dve iste spiralne galaksije koje se sudaraju pod uglom 45° i koje se kreću retrogradno. Na slici 2.b) predstavljen je sudar istih tih galaksija, ali pod uglom 90° i sa direktnim kretanjem, dok slika 2.c) prikazuje sudar galaksija koje leže u jednoj ravni. Strelica levo ukazuje na prvi međusobni najbliži prilazak (što odgovara trećoj fazi sudara), dok druga ukazuje na fazu konačnog stapanja dve galaksije (što odgovara petoj fazi sudara). Vrednosti SFR-a su relativne, odnosno pokazuju koliko puta su one veće u odnosu na vrednosti SFR-a određenih za istu galaksiju koja ne učestvuje u sudaru (Di Matteo et al. 2008).

Dakle, u prvom slučaju očekuje se povećanje SFR-a tek u petoj fazi sudara, u drugom slučaju povećanje SFR-a se očekuje u trećoj i petoj fazi sudara, dok u trećem slučaju najveće povećanje se očekuje u fazi između prvog međusobno najbližeg prilaska i konačnog spajanja galaksija, što odgovara četvrtoj fazi sudara.

Na osnovu velikog broja simulacija (približno 1000), došlo se do zaključka da sudari galaksija dovode samo do umerenog povećanja vrednosti SFR-a, dok su snažne “starburst” faze retka pojava. U 85% slučajeva u sudarima na malim vrednostima crvenog pomaka vrednosti SFR-a povećavaju se maksimalno pet puta u odnosu na vrednosti SFR-a galaksije koja se ne sudara (Di Matteo et al. 2008).

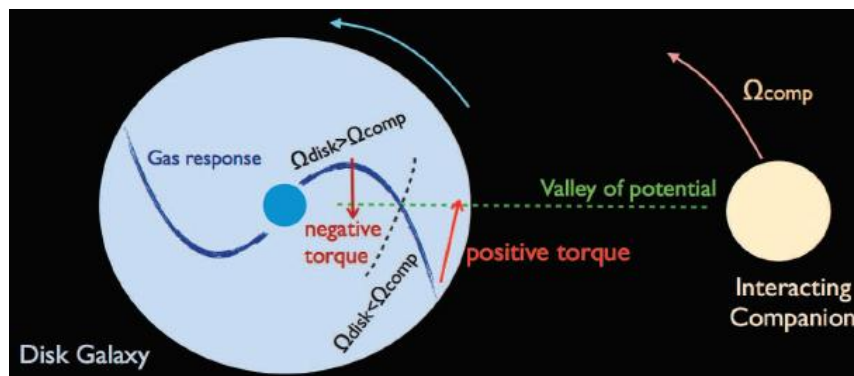
4.2. Nastanak zvezda tokom sudara galaksija

Da bi otpočeo proces formiranja zvezde, potrebno je da počne sažimanje gasa. Pokretač sažimanja gasa tokom sudara galaksija su plimske sile. Plimske sile nastaju kao posledica narušavanja simetričnosti gravitacionog potencijala unutar posmatrane galaksije. Uzročnik narušavanja simetrije je obližnja susedna galaksija sa kojom će se posmatrana galaksija sudariti ili blisko proći pored nje. Ove sile značajno utiču na kretanje materije unutar galaksije, pre svega na kretanje gasa.

Na slici 3. ilustrovano je kretanje gasa unutar galaksije pod dejstvom plimskih sila koje stvara susedna galaksija. Gas koji se nalazi u blizini jezgra nalazi se pod dejstvom negativnog gravitacionog momenta sile koji mu smanjuje ugaoni moment, pa gas počinje brzo da se kreće ka središnjem delu galaksije. Gas koji se nalazi u spoljnim delovima galaksije nalazi se pod dejstvom pozitivnog gravitacionog momenta sile koji mu uvećava ugaoni moment, pa gas počinje da se udaljava od središta galaksije, formirajući tako plimske repove ili dovodi gas u prostor između galaksija, formirajući tako most između galaksija.

⁶ SPH je skraćena od smoothed particle hydrodynamics (u prevodu glatka čestična hidrodinamika), dok Tree (u prevodu tri) se odnosi na tri metode koje se koriste za određivanje gravitacione sile.

Simulacije ukazuju da u ranim fazama sudara galaksija, glavni pokretač nastanka zvezda je prvi proces. On povećava gustinu gasa u okolini jezgra galaksije, što može dovesti do “starburst” faze u jezgru. U poslednjim fazama sudara takođe može da se javi ovaj proces. U poslednjim fazama sudara galaksija, kada se formiraju plimski repovi, unutar njih može doći do formiranja zvezda. Simulacije pokazuju da se ovaj proces odvija tako što tokom formiranja plimskog repa može doći do nagomilavanja gasa uglavnom na krajevima repa. Na tim mestima gustina gasa se dovoljno poveća da može doći do formiranja zvezda. Drugi način formiranja zvezda nastaje duž repa kada, usled lokalne gravitacione nestabilnosti gas počinje da se sažima (Bornaud 2010).



Slika 3: Uticaj plimskih sila na kretanje gasa unutar galaksije (slika preuzeta iz Bornaud 2010).

5. FUNKCIJA INICIJALNE MASE

Istraživanja evolucije zvezda ukazuju na to da pored početnog hemijskog sastava, na strukturu i evoluciju zvezda utiče i njihova masa. Uticaj drugih činilaca kao što su magnetno polje ili rotacija zvezde nisu beznačajni, ali su od manje važnosti. Kada je masa zvezde određena, dalje smo u mogućnosti odrediti druge veličine kao što su luminoznost, radijus ili radijacioni spektar zvezde u bilo kom momentu razvoja zvezde ili predvideti vrednosti tih veličina u budućnosti. Poznavanje ovih veličina pomaže u shvatanju uticaja zvezde na međuzvezdanu sredinu (MZS). Međutim, u mnogim istraživanjima od primarnog značaja je grupni uticaj većeg broja susednih zvezda koje se nalaze u posmatranom delu MZS-a. Pošto uticaj zvezda na MZS, pored brzine i efikasnosti njihovog nastajanja, zavisi pre svega od njihovih masa, potrebno je odrediti relativan broj zvezda u različitim intervalima masa. Veličina koja određuje raspodelu zvezda po masi pri njihovom rođenju naziva se funkcija inicijalne mase (FIM). Ova funkcija, pored toga što određuje raspodelu zvezdanih masa, predstavlja vezu između evolucije zvezda i galaksije.

5.1. Definicija FIM-a

Funkcija inicijalne mase (tj. raspodela masa pri rođenju grupe zvezda) mora biti definisana tako da bude dovoljno opširna da opiše nastajanje zvezda u bilo kom prostoru, a s druge strane da bude dovoljno precizna kako bi mogla da se poveže sa zakonima koji diktiraju nastanak zvezda. Ovi oprečni zahtevi proizvode niz poteškoća pri formiranju definicije FIM koja bi mogla da se primeni u svim posmatranim slučajevima.

Raspodela zvezda koje se rađaju po masama, određena je pomoću funkcije koju nazivamo FIM i ona predstavlja broj zvezda po jedinici mase $\phi(m)$. Uz pretpostavku da se rađanje odvija konstantnom brzinom i da je rađanje homogeno u prostoru, tada izraz $\phi(m)dm$, predstavlja

relativan broja zvezda rođenih sa masama u intervalu od m do $m + dm$. Pretpostavljajući da je $\phi(m)$ kontinualna funkcija, normiramo je na sledeći način:

$$\int_{m_m}^{m_v} m \phi(m) dm = M_{Su} \quad (8)$$

gde m_m i m_v su donje i gornje granice masa zvezda a M_{Su} je masa Sunca. Donje i gornje granice masa prema pretpostavkama mogu da se kreću u intervalima $m_m=0,05 M_{Su}-0,1 M_{Su}$ i $m_v=100 M_{Su}-500 M_{Su}$. Centralne temperature zvezdanih objekata sa masom manjom od $0,08 M_{Su}$, su nedovoljne za početak nuklearne fuzije, dok kod zvezda sa masama iznad $100 M_{Su}$ se javlja nestabilnost usled nejednakosti pritiska zračenja i gravitacije, usled čega ove zvezde brzo gube masu. Zbog toga gornje granice obično uzimaju vrednosti $m_m \approx 0,08 M_{Su}$ i $m_v \approx 100 M_{Su}$.

Iz gornje relacije (8) sledi da izraz $\phi(m)dm$ predstavlja broj rođenih zvezda sa masama u intervalu od m_m do m_v , koje su nastale iz oblaka gasa mase M_{Su} .

Ukupan broj zvezda i ukupnu masu zvezda sa masama u intervalu od m do $m + dm$, određujemo integraljenjem izraza:

$$dN(m) = \phi(m) dm \quad i \quad dM(m) = m\phi(m) dm. \quad (9)$$

U suštini, FIM može da menja svoj oblik kako među različitim galaksijama, tako i među različitim delovima jedne iste galaksije. Ovo je uzrok toga što današnja posmatranja imaju mnoga ograničenja zbog kojih ne možemo isključiti da se sa promenom nekih fizičkih parametara (npr. temperature, gustine, metaličnosti sredine itd.), menja i oblik FIM. Međutim, rezultati posmatranja Mlečnog puta nagoveštavaju da FIM, grubo gledano, ima isti oblik u bilo kom delu ove galaksije.

U daljem tekstu dat je pregled nekih od standardnih rešenja za FIM.

Za zvezde u okolini Sunca, FIM je prvi definisao Salpeter 1955. godine u vidu izraza:

$$\phi(m) \propto m^{-2,35} \quad (10)$$

za zvezde sa masama u intervalu $0,4M_{Su} \leq m \leq 10M_{Su}$.

Skalo 1986. godine na osnovu velikog broja referenci, daje FIM oblika:

$$\phi(m) \propto \begin{cases} m^{-2,45} & (m > 10M_{Su}) \\ m^{-3,25} & (1M_{Su} < m < 10M_{Su}) \\ m^{-1,80} & (0,2M_{Su} < m < 1M_{Su}) \end{cases} \quad (11)$$

Kroupa 2002. godine definiše FIM na sledeći način:

$$\phi(m) \propto \begin{cases} m^{-2,7} & (1M_{Su} < m < 100M_{Su}) \\ m^{-2,3} & (0,5M_{Su} < m < 1M_{Su}) \\ m^{-1,3} & (0,08M_{Su} < m < 0,5M_{Su}) \\ m^{-0,3} & (0,01M_{Su} < m < 0,08M_{Su}) \end{cases} \quad (12)$$

(Mo, Bosch, White 2010).

6. ANALIZA PODATAKA

U ovom poglavlju izvršeno je poređenje SFR-a određenih putem različitih markera, i ispitana je zavisnost odstupanja raznih markera od faze sudara. U tabeli 1 dati su SFR-ovi za 43 galaksije koje se nalaze u nekoj od gore pomenutih faza sudara, najmanje sa jednom galaksijom. Uzorak korišćenih galaksija i njihovih SFR-a, nastao je kombinovanjem odgovarajućih podataka iz radova Corbett et al. (2002), Dopita et al. (2002) i Murphy (2013). Za sve sudarajuće galaksije u ovoj tabeli se pretpostavlja da su “starburst” galaksije na osnovu određenog SFR-a. Da bi se izbegao značajan uticaj Doplerovog efekta, galaksije iz uzorka imaju malu vrednost crvenog pomaka koji se kreće u rasponu $z \sim 0-0,05$. U tabeli 2 predstavljeni su odnosi SFR-a na osnovu vrednosti iz tabele 1.

r.b.	IRAS naziv	faza sudara	SFR _{1,4} (M _{su} /god)	SFR _{Hα} (M _{su} /god)	SFR _{IR} (M _{su} /god)	q _{IR}
12	08087+0347	1	3,52	0,33	5,73	2,45
19	11005-1601	1	12,35	15,3	11,2	2,28
22	11231+1456	1	32,24	2,17	72,5	2,65
25	12120-1118	1	13,9	6,45	10,9	2,37
37	18341-5732	1	15,51	55,9	28,1	2,54
43	23488+2018	1	29,58	2,29	53,27	2,52
3	01173+1405	2	59,35	0,75	83,6	2,40
6	02512+1446	2	59,5	5,42	76,11	2,33
15	09126+4432	2	77,69	3,11	95,7	2,37
18	10565+2448	2	147,65	109,1	208,2	2,44
20	11010+4107	2	40,06	2,15	79,11	2,37
2	01053-1746	3	119,1	17,19	44,8	2,08
4	01341-3734	3	11,6	1,46	7,11	1,90
10	04595-1813	3	18,78	8,86	6,06	1,87
11	06295-1735	3	11,41	2,28	20,8	2,42
16	09437+0317	3	20,1	13,43	20,1	2,04
17	10015-0614	3	37,5	17,5	27,4	2,12
26	12286-2600	3	7,07	22,7	13,4	2,51
29	13362+4831	3	8,94	62,09	123,02	1,90
35	16577+5900	3	1,19	39,81	345,07	1,94
32	14423-2042	3	12,8	5,86	11,41	2,11
7	04131-2836	4	13,42	26,7	8,67	2,10
9	04591-0419	4	6,02	5,86	5,93	2,25
13	08175-1433	4	21,07	4,56	15,1	2,13
14	09006-6404	4	12,2	5,4	15,4	2,38
27	12596-1529	4	9,28	7,8	15,4	2,54
28	13183+3423	4	82,25	11,4	79,25	2,33
30	13373+0105	4	22,6	44,3	46,06	2,45
31	14150-0711	4	2,27	2,18	3,01	2,39
33	15163+4255	4	145,98	4,72	141,45	2,36

36	18093-5744	4	32,01	21,2	39,06	2,43
38	20305-0211	4	45,12	9,29	21,8	1,97
39	21330-3846	4	7,95	5,47	18,1	2,63
40	23157-0441	4	47,28	76,1	36,1	2,15
41	23336+0152	4	6,04	4,45	7,91	2,31
42	23394-0353	4	27,65	36,5	22,8	2,21
1	00085-1223	5	31,53	1,05	51,6	2,48
5	01364-1042	5	46,17	1,11	118	2,71
8	04315-0840	5	36,73	58	67,3	2,49
21	11122-2327	5	10,8	3,58	14,4	2,35
23	11396+0036	5	11,86	6,59	10,9	2,19
24	11409-1631	5	4,89	1,6	4,45	2,55
34	15172-3115	5	2,73	6,01	6,67	2,36

Tabela 1: U prvoj i drugoj koloni nalazi se redni broj galaksije koji je korišćen radi lakšeg praćenja galaksija tokom analize, odnosno njen naziv u IRAS Point Source katalogu. U trećoj koloni za svaku galaksiju upisani su brojevi od 1 do 5, koji predstavljaju fazu sudara u kojoj se galaksija nalazi. Vrednosti SFR-a koji se nalaze u četvrtoj, petoj i šestoj koloni, određeni su na osnovu gore pomenutih relacija, merenjem luminoznosti galaksija. $SFR_{1,4}$ određen je preko radio linije frekvencije 1,4 GHz, $SFR_{H\alpha}$ preko $H\alpha$ rekombinacione linije i SFR_{IR} preko dalekog infracrvenog (FIR) zračenja. Vrednosti su im izražene u masama Sunca po godini (M_{\odot}/god). U sedmoj koloni nalaze se vrednosti parametra koji predstavljaju logaritamski odnos flukseva FIR zračenja i radio zračenja na frekvenciji 1,4 GHz.

r.b.	IRAS naziv	$SFR_{1,4}/SFR_{H\alpha}$	$SFR_{1,4}/SFR_{IR}$	$SFR_{IR}/SFR_{H\alpha}$
12	08087+0347	10,67	0,61	17,36
19	11005-1601	0,81	1,10	0,73
22	11231+1456	14,86	0,44	33,41
25	12120-1118	2,16	1,28	1,69
37	18341-5732	0,28	0,55	0,50
43	23488+2018	12,92	0,56	23,26
3	01173+1405	79,13	0,71	111,47
6	02512+1446	10,98	0,78	14,04
15	09126+4432	24,98	0,81	30,77
18	10565+2448	1,35	0,71	1,91
20	11010+4107	18,63	0,51	36,80
2	01053-1746	6,93	2,66	2,61
4	01341-3734	7,95	1,63	4,87
10	04595-1813	2,12	3,10	0,68
11	06295-1735	5,00	0,55	9,12
16	09437+0317	1,50	1,00	1,50
17	10015-0614	2,14	1,37	1,57
26	12286-2600	0,31	0,53	0,59
29	13362+4831	0,14	0,07	1,98

35	16577+5900	0,03	0,003	8,67
32	14423-2042	2,18	1,12	1,95
7	04131-2836	0,50	1,55	0,32
9	04591-0419	1,03	1,02	1,01
13	08175-1433	4,62	1,40	3,31
14	09006-6404	2,26	0,79	2,85
27	12596-1529	1,19	0,60	1,97
28	13183+3423	7,21	1,04	6,95
30	13373+0105	0,51	0,49	1,04
31	14150-0711	1,04	0,75	1,38
33	15163+4255	30,93	1,03	29,97
36	18093-5744	1,51	0,82	1,84
38	20305-0211	4,86	2,07	2,35
39	21330-3846	1,45	0,44	3,31
40	23157-0441	0,62	1,31	0,47
41	23336+0152	1,36	0,76	1,78
42	23394-0353	0,76	1,21	0,62
1	00085-1223	30,03	0,61	49,14
5	01364-1042	41,59	0,39	106,31
8	04315-0840	0,63	0,55	1,16
21	11122-2327	3,02	0,75	4,02
23	11396+0036	1,80	1,09	1,65
24	11409-1631	3,06	1,10	2,78
34	15172-3115	0,45	0,41	1,11

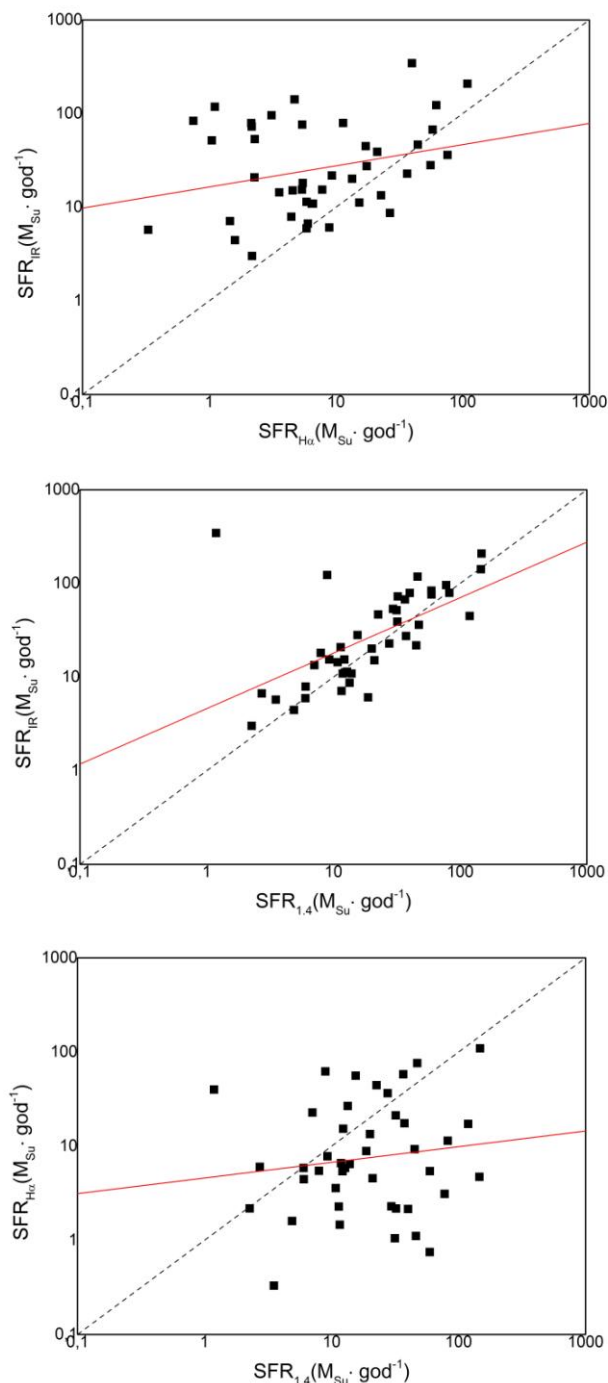
Tabela 2: U prvoj i drugoj koloni nalazi se redni broj galaksije koji je korišćen radi lakšeg praćenja galaksija tokom analize, odnosno njen naziv u IRAS Point Source katalogu. U trećoj, četvrtoj i petoj koloni nalaze se vrednosti odnosa dva SFR-a na osnovu njihovih vrednosti iz tabele 1.

6.1. Poređenje SFR-a različitih markera

U narednom tekstu dati su grafici na kojima se porede SFR kalibrisani preko različitih markera koji su nacrtani na osnovu tabele 1. Očekuje se da ovi grafici treba da izgledaju jednako za sva tri poređenja, odnosno svi SFR kalibrisani preko različitih markera bi trebalo da daju jednake rezultate. To bi dovelo do toga da grafici izgledaju kao proste linearne funkcije ($y=x$). Međutim, uvek postoje određena odstupanja. Radi lakšeg poređenja i određivanja ovog odstupanja na svakom grafiku je iscrtana isprekidanom linijom funkcija $y=x$, koja predstavlja idealni slučaj. Crvena puna linija predstavlja linearan fit datih podataka. Takođe, radi lakšeg poređenja, vrednosti skala su logaritamske. Za određivanje korelacije između tačaka na grafu koristi se Pearsonov koeficijent korelacije (u daljem tekstu samo koeficijent korelacije). Vrednosti ovog koeficijenta se kreću u granicama od 1 do -1. Tako recimo tačke kod kojih ovaj koeficijent ima vrednost 1 ili -1 su u idealnoj korelaciji tj. antikorelaciji, dok tačke kod kojih je vrednost ovog koeficijenta 0 nisu u nikakvoj korelaciji. U ovom radu uzete su samo apsolutne vrednosti ove veličine. Pored Pearsonovog koeficijenta korelacije, upoređivan je i položaj linije linearnog fita naspram linije idelanog odnosa na osnovu njenog nagiba i preseka sa ordinatom.

6.1.1. Poređenja u svih pet faza sudara galaksija

Na slici 4 predstavljeni su grafici međusobnog poređenja SFR na svim upotrebljenim markerima u svih pet faza sudara, zajedno. Na gornjem grafu slike 4 porede se SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$. Kao što se da primetiti, prisutna je izuzetna raspršenost tačaka iako značajan broj tačaka dobro prati liniju idealnog odnosa. Takođe, kod određenog broja tačaka odnos markera značajno odstupa od očekivanog odnosa, pa se određeni broj tačaka nalazi izrazito iznad idealne linije, a ispod njih nema nijedna izrazito udaljena. Ovo je posledica toga što SFR_{IR} ima veće vrednosti od $SFR_{H\alpha}$. Generalno ako se posmatra ovaj graf kao celina, moglo bi se zaključiti da između SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ postoji neka slaba korelacija. Koeficijent korelacije ima vrednost 0,27, dok linija idealnog fita ima nagib 0,23 i presek sa ordinatom u tački 1,22. Najveće odstupanje od linije idealnog odnosa javlja se kod objekta sa rednim brojem 3, gde je vrednost SFR_{IR} veća od $SFR_{H\alpha}$ čak 112 puta, dok najmanja razlika se javlja kod objekta sa rednim brojem 9, gde se SFR razlikuju 1,01 puta. SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ se u proseku razlikuju 12,56 puta, kada se uzorak gleda u celini. Međutim, ono što je posebno uočljivo ovde, je da postoje dve grupe tačaka. Grupa tačaka koja izuzetno dobro prati liniju idealnog odnosa, tj. kod kojih se javlja veoma dobra korelacija između markera i druge grupe koja se nalazi dalje od linije idealnog odnosa, kod koje se naslućuje neka korelacija, koje prate idealnu liniju, ali daju veće vrednosti u korist SFR_{IR} . Na osnovu ovih grupa može se izvršiti podela tačaka na one gde se SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ uglavnom razlikuju manje od četiri puta i one gde se SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ uglavnom razlikuju više od četiri puta. Tako u prvu mogu da uvrste 28 sudarajućih galaksija, dok u drugoj grupi ostaje 15 sudarajućih galaksija.



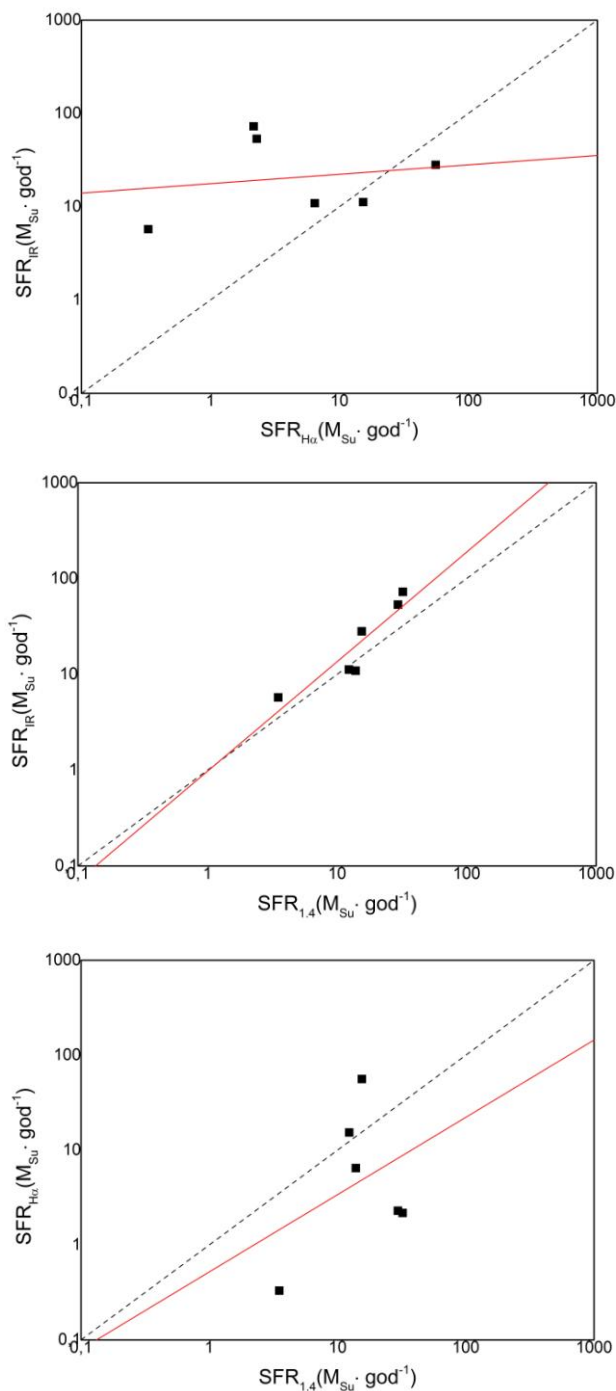
Slika 4: Grafici poređenja SFR-a u svim fazama sudara.

Za razliku od gornjeg grafa, na grafu u sredini slike 4, na kome se porede SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$, odnosi ovih veličina izuzetno dobro se poklapaju sa linijom idealnog odnosa. Izuzev dve tačke sa ovog grafa koje pripadaju objektima sa rednim brojevima 29 i 35. Svi ostali se nalaze izuzetno blizu idealnoj liniji, tj. raspršenost podataka je mala. Uopšteno gledano, s obzirom da se SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ izuzetno dobro poklapaju, korelacija između njih je dobra u ovom uzorku sudarajućih galaksija. Koeficijent korelacije u ovom slučaju ima vrednost 0,58. Nagib linije linearnog fita ima vrednost 0,59 a ordinatu seče u tački 0,66. SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ se u proseku razlikuju 8,59 puta.

Donji graf na slici 4 poređi SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$. Prisutno je izuzetno rasturanje podataka većeg stepena nego na prethodna dva grafa sa slike. Sa grafa se ne primećuje višestruko grupisanje tačaka kao na gornjem grafu. Na osnovu sveobuhvatne slike može se zaključiti da ne postoji korelacija između $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$. Koeficijent korelacije ima vrednost 0,14. Linija idealnog fita ima nagib 0,17 a presek sa ordinatom je u tački 0,66. Međutim, sa grafa se vidi da se veći broj tačaka nalazi ispod idealne linije, tj. da $SFR_{H\alpha}$ češće ima manje vrednosti od $SFR_{1,4}$. U ovom slučaju $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$ razlikuju se u proseku 9,29 puta.

6.1.2. Prva faza sudara

Na slici 5 predstavljeni su grafici poređenja svih SFR-a međusobno, u prvoj fazi sudara. Na gornjem grafu na slici 5, porede se SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$. Tačke na grafu su prilično raspršene. Korelacioni koeficijent ima vrednost 0,18, što ukazuje na vrlo slabu korelaciju između SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$. Linija idealnog fita ima nagib 0,1 a ordinatu seče u tački 1,25 pa se slabo poklapa sa linijom idealnog odnosa. Međutim, vidi se da objekti sa rednim brojevima 19, 25 i 37 vrlo dobro prate idealne vrednosti odnosa $SFR_{IR}/SFR_{H\alpha}$. Objekti sa rednim



Slika 5: Grafici poređenja SFR-a u prvoj fazi sudara.

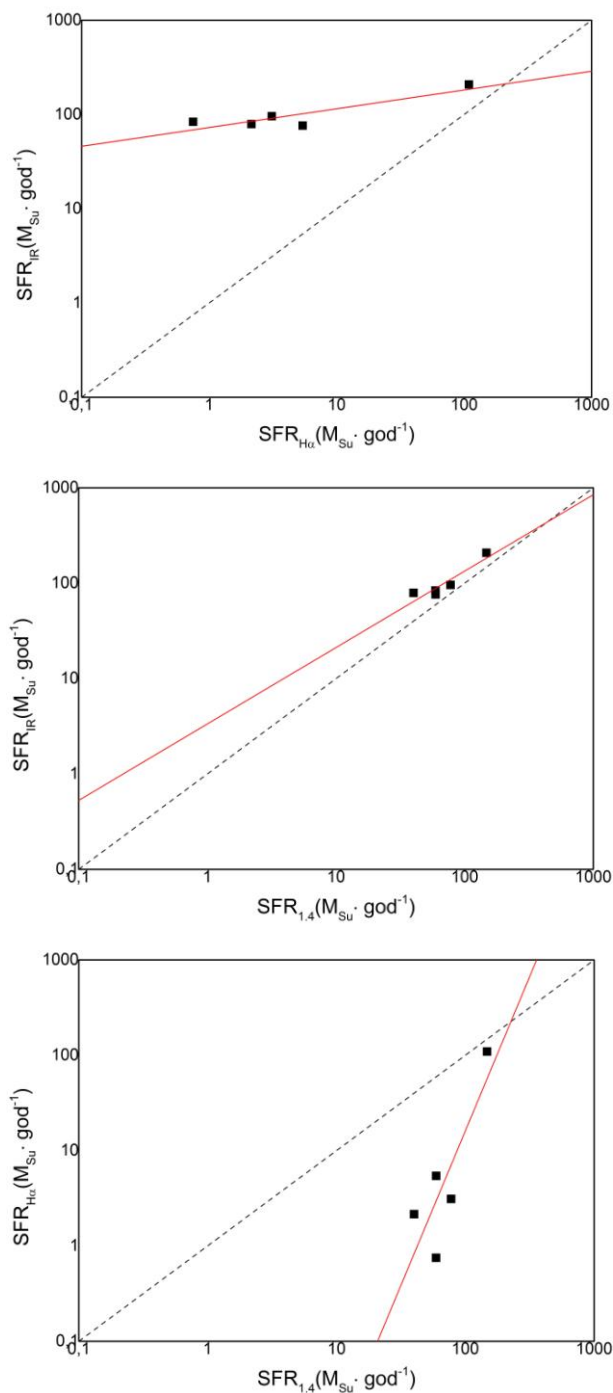
brojevima 12, 22 i 43 odskachu od očekivanih vrednosti. U ovoj fazi sudara SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ razlikuju se u proseku 13,18 puta, gde SFR_{IR} uglavnom ima veće vrednosti od $SFR_{H\alpha}$.

Na grafu u sredini na slici 5 porede se SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$. Koeficijent korelacije ima vrednost 0,91 što znači da su SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ u snažnoj korelaciji. Nagib linije linearnog fita ima vrednost 1,14 a ordinatu seče u tački -0,01. To govori da izmerene vrednosti SFR-a se odlično poklapaju sa idealnim vrednostima. SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ se u ovoj fazi sudara razlikuju u proseku 1,64 puta.

Na donjem grafu slike 5 porede se $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$. Tačke su prilično rasute, o čemu svedoči i koeficijent korelacije koji ima vrednost 0,37. Na osnovu toga zaključuje se da su $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$ u slaboj korelaciji. S obzirom da nagib linije linearnog fita ima vrednost 0,81 i da ova kriva ordinatu preseca u tački -0,28, govori nam da postoji tendencija da vrednosti $SFR_{1,4}$ imaju veće vrednosti od $SFR_{H\alpha}$, pri čemu se ta razlika povećava sa povećanjem vrednosti SFR. Maksimalno odstupanje od idealne vrednosti javlja se kod objekta sa rednim brojem 22. U prvoj fazi sudara $SFR_{1,4}$ i $SFR_{H\alpha}$ razlikuju se u proseku 7,57 puta.

6.1.3. Druga faza sudara

Na slici 6 predstavljeni su odnosi SFR-a u drugoj fazi sudara. Bez obzira na to što u ovoj fazi ima najmanji broj predstavnika, ono što je zanimljivo za nju je da na svakom od tri grafa sa slike 6, postoje veoma jake korelacije između SFR-a. Tako pri poređenju SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ na gornjem grafu slike 6, koeficijent korelacije ima vrednost 0,89, što predstavlja snažnu korelaciju. Sa grafa u sredini slike 6 koeficijent korelacije ima vrednost 0,92 što govori da su vrednosti SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ u veoma snažnoj korelaciji, dok su $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$, sa donjeg grafa u snažnoj korelaciji, s obzirom da kod njih ovaj koeficijent ima vrednost 0,83. S druge strane poklapanje sa idealnim vrednostima nije tako snažno. Izrazita razilaženja linije



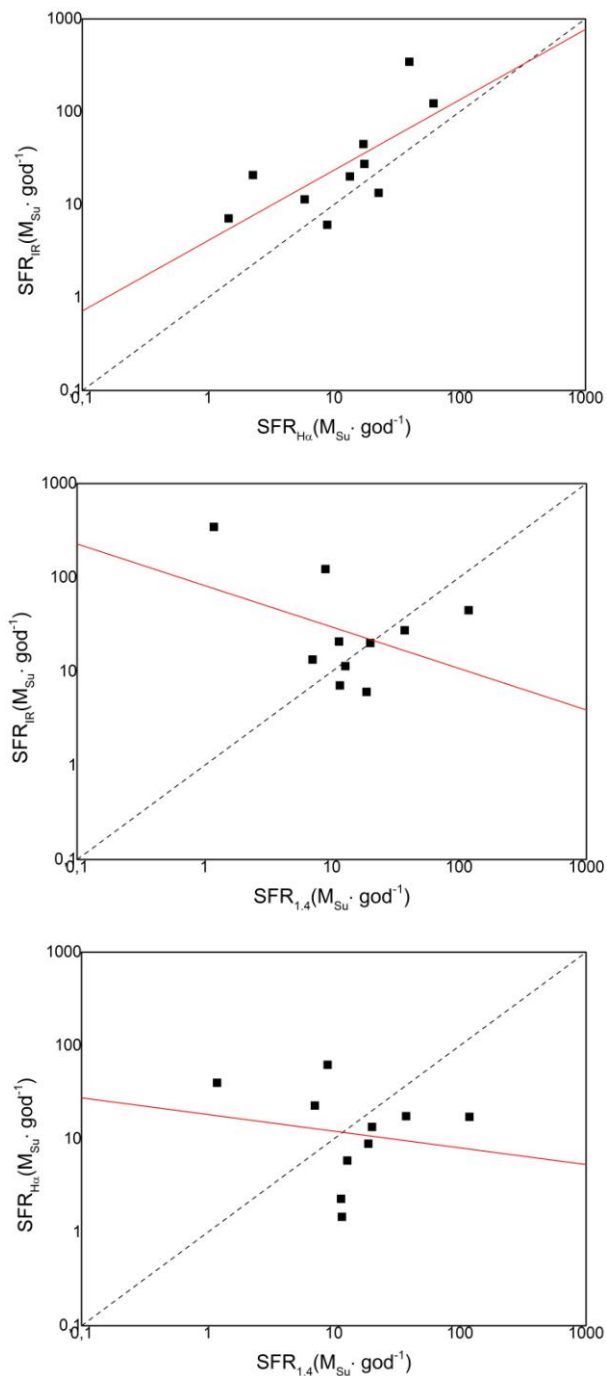
Slika 6: Grafici poređenja SFR-a u drugoj fazi sudara.

idealnog odnosa i linije linearnog fita prisutna je u gornjem i donjem grafu slike 6, tj. tamo gde se javlja $SFR_{H\alpha}$. Tako na gornjem grafu vidi se da razlika između idealne i izmerene vrednosti odnosa $SFR_{IR}/SFR_{H\alpha}$ se povećava sa smanjenjem vrednosti SFR-a, pošto linija idealnog fita ima nagib sa vrednošću 0,2 a ordinatu seče u tački 1,86. U proseku vrednosti SFR_{IR} su 39 puta veće od $SFR_{H\alpha}$. Veoma slična situacija prisutna je i kod odnosa $SFR_{1,4}/SFR_{H\alpha}$ na donjem grafu slike 3. Vrednosti $SFR_{1,4}$ su u proseku 27,02 puta veće od $SFR_{H\alpha}$. Linija linearnog fita ima nagib sa vrednošću 3,24 a ordinatu seče u tački -5,27 pa se smanjenjem vrednosti SFR-a i razlika između očekivane vrednosti i izmerene vrednosti odnosa $SFR_{H\alpha}/SFR_{1,4}$ povećava. Za razliku od njih, kod poređenja $SFR_{1,4}$ i SFR_{IR} linija linearnog fita i idealne vrednosti se odlično preklapaju, pogotovo na velikim vrednostima SFR-a s obzirom da nagib ima vrednost 0,80 i presek sa ordinatom u tački 0,52, tako da su vrednosti SFR_{IR} u proseku 1,46 puta veće od vrednosti $SFR_{1,4}$.

6.1.4. Treća faza sudara

Poređenja SFR-a u trećoj fazi sudara predstavljani su na slici 7. U ovoj fazi najveća odstupanja od idealnih vrednosti vezuju se za $SFR_{1,4}$. Tako na gornjem grafu slike 7, vidi se da su SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ u vrlo dobroj korelaciji, s obzirom da koeficijent korelacije ima vrednost 0,71. S obzirom na vrednost nagiba, odnosno mesta preseka ordinate (0,76 odnosno 0,61) vidi se da je linija linearnog fita u vrlo dobroj korelaciji sa linijom idealne vrednosti. Na osnovu njihovog međusobnog položaja primećuje se tendencija smanjenja razlike između vrednosti SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ sa povećanjem vrednosti SFR-a. Uglavnom vrednosti SFR_{IR} imaju veće vrednosti od $SFR_{H\alpha}$. U proseku, ove veličine se u ovoj fazi razlikuju 3,54 puta.

Ono što se beleži na srednjem i donjem grafu slike 7, dijametralno je suprotno od onog što se očekuje. Na srednjem grafu dobijeni koeficijent korelacije ima vrednost 0,41 što predstavlja slabu korelaciju vrednosti SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$. Suprotno očekivanjima, linija linearnog fita umesto da raste, intenzivno opada (presek sa ordinatom u tački 1,92 a nagib -0,44). Samim tim položaj linije



Slika 7: Grafici poređenja SFR-a u trećoj fazi sudara.

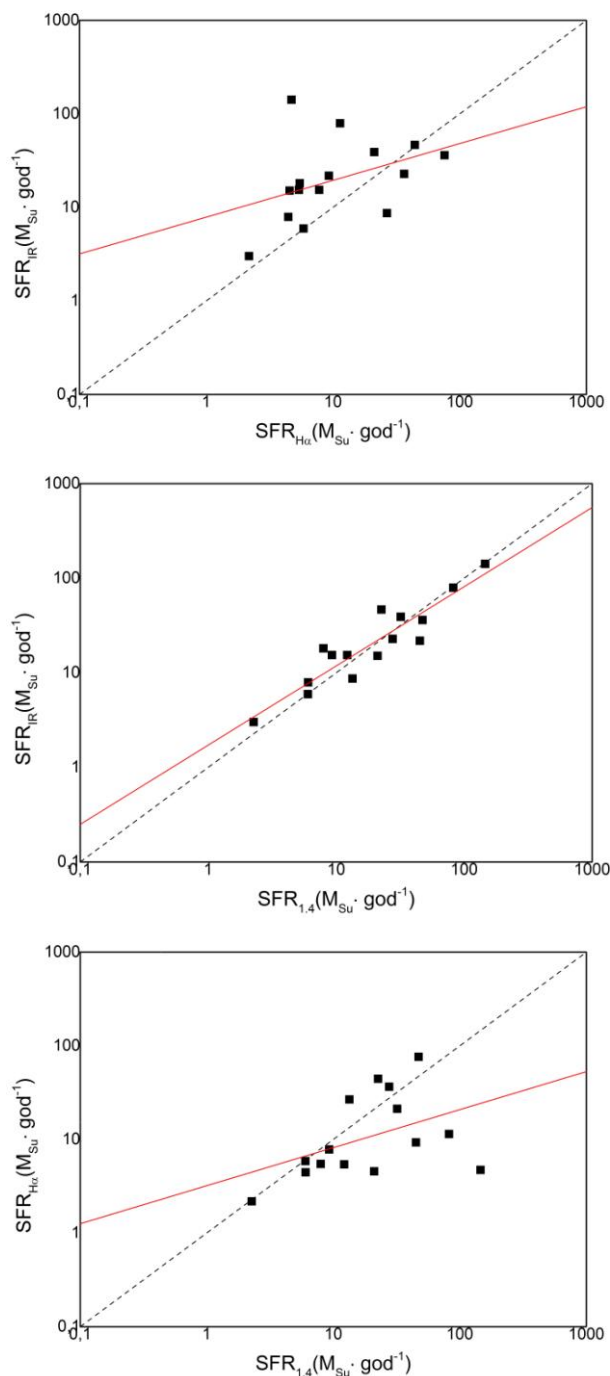
linearnog fita govori da sa povećanjem vrednosti $SFR_{1,4}$, vrednost SFR_{IR} se smanjuje. Ono što se na ovom grafu još primećuje je da postoje dve grupe tačaka. U jednu grupu spadaju one koje se grupišu u okolini linije idealnog odnosa, dok u drugu spadaju tačke objekata 35 i 29, koje su značajno udaljene od idealne linije. U ovoj fazi sudara $SFR_{1,4}$ i SFR_{IR} razlikuju se u proseku 31,83 puta.

Situacija je slična i na donjem grafu slike 7 tj. i ovde linija linearnog fita opada (nagib sa vrednošću -0,18 sa presekom ordinate u tački 1,26), što je u kontradikciji sa onim što se očekuje. Međutim, tačke na ovom grafu su prilično rasute, odnosno $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$ su u vrlo slaboj korelaciji, o čemu svedoči i koeficijent korelacije koji ima vrednost 0,18. Vrednosti $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$ razlikuju se u proseku 7,14 puta.

6.1.5. Četvrta faza sudara

Grafici na slici 8 porede vrednosti SFR-a u četvrtoj fazi sudara. Na gornjem grafu gde se porede SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ koeficijent korelacije ima vrednost 0,40, što predstavlja slabu korelaciju između ovih veličina. S obzirom na položaj linije linearnog fita (nagib 0,39; presek sa ordinatom 0,90), ona se dobro poklapa sa linijom idealnog odnosa. I ovde se mogu tačke podeliti u dve grupe. U prvu grupu mogu ubaciti objekti sa r.b. 28 i 33 kod kojih su vrednosti SFR_{IR} veće od $SFR_{H\alpha}$ više od četiri puta. U drugu grupu mogu da se uvrste svi ostali objekti iz ove faze s obzirom da se kod njih SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$ razlikuju manje od četiri puta. U proseku, ove dve vrednosti u četvrtoj fazi se razlikuju 4,3 puta, gde SFR_{IR} imaju uglavnom veće vrednosti od $SFR_{H\alpha}$.

Na grafu u sredini na slici 8, porede se SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$. Tačke sa grafa su u vrlo snažnoj međusobnoj korelaciji s obzirom da koeficijent korelacije ima vrednost 0,92. Pored toga, linija linearnog fita ima vrednost nagiba 0,84 i presek sa ordinatom u tački 0,23, pa se ona odlično preklapa sa linijom idealnih vrednosti. S obzirom da se tačke grupišu u okolini linije idealnog odnosa, vrednosti SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ razlikuju se u proseku 1,45 puta.



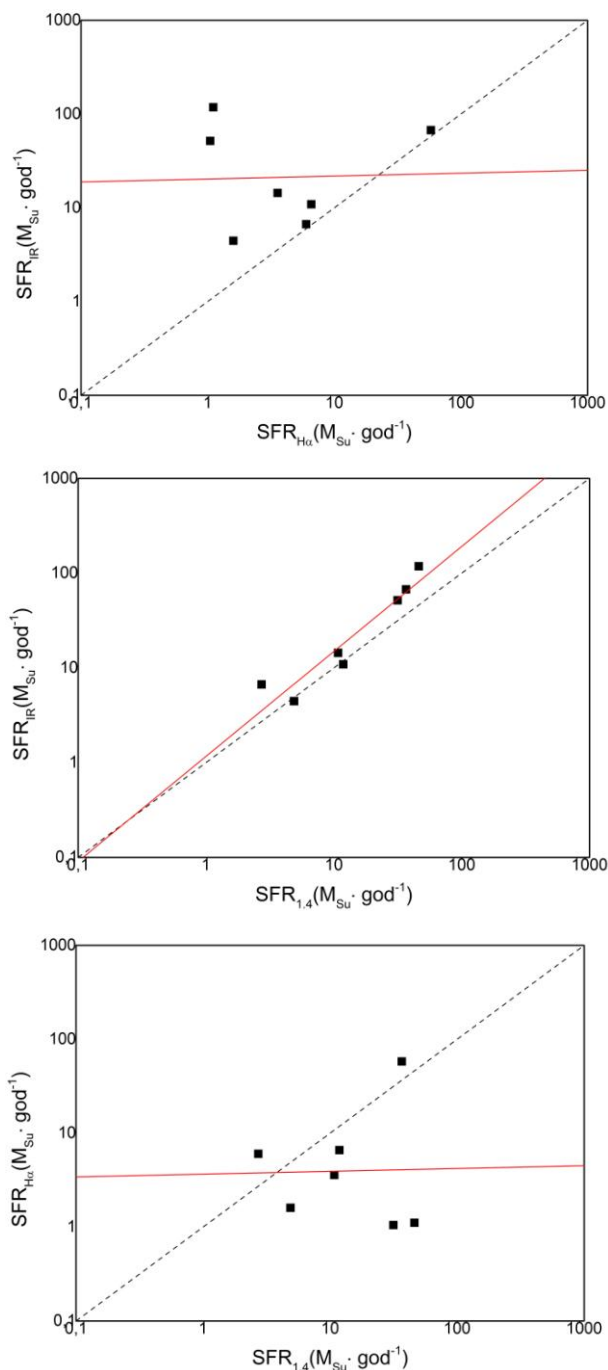
Slika 8: Grafici poređenja SFR-a u četvrtoj fazi sudara.

Kod tačaka na donjem grafu slike 8, postoji tendencija da budu više međusobno raspršene sa povećanjem vrednosti SFR-a. Koeficijent korelacije koji se odnosi na ceo uzorak, ima vrednost 0,44 što govori da su tačke na grafu u slaboj korelaciji. S obzirom na mesto preseka sa ordinatom i vrednost nagiba (0,51 odnosno 0,41), linija linearnog fita je u dobroj korelaciji sa linijom idealnih vrednosti. I ovde se primećuje izdvajanje grupe tačaka koje značajno odskaču od idealnih vrednosti. U ovu grupu mogu da se uvrste objekti sa rednim brojevima 13, 28, 33 i 38. U ovoj fazi vrednosti $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$ razlikuju se u proseku 1,52 puta, gde $SFR_{1,4}$ uglavnom ima veće vrednosti od $SFR_{H\alpha}$.

6.1.6. Peta faza sudara

Na slici 9 poredi se vrednosti SFR-a dobijeni u petoj fazi sudara galaksija. Gornji graf slike 9 poredi SFR_{IR} i $SFR_{H\alpha}$. S obzirom da koeficijent korelacije ima vrednost 0,03, može se reći da među tačkama na grafu nema korelacije. Linija linearnog fita ima nagib sa vrednošću 0,03 i ordinatu seče u tački 1,31, pa se njen položaj slabo poklapa sa linijom idealnih vrednosti. Takođe, sve tačke se nalaze iznad linije idealnog odnosa tako da SFR_{IR} imaju veće vrednosti od $SFR_{H\alpha}$. I ovde se primećuje grupisanje tačaka u dve grupe. Tačke objekata sa r.b. 1 i 5 mogu se svrstati u jednu grupu, pošto njihove vrednosti odnosa značajno odskaču od linije idealnog odnosa. U drugu grupu mogu se uvrstiti svi ostali objekti iz pete faze sudara, s obzirom da se oni prostiru duž linije idealne vrednosti. U proseku vrednosti SFR_{IR} su 23,74 puta veće od vrednosti $SFR_{H\alpha}$.

Na grafu u sredini slike 9 poredi se SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$. Među tačkama se javlja vrlo snažna korelacija sa koeficijentom korelacije vrednosti 0,95. Pored toga linija linearnog fita, sa nagibom vrednosti 1,11 i presekom sa ordinatom u tački 0,07 se skoro idealno poklapa sa linijom idealne vrednosti. Vrednosti dobijene sa ovog grafa veće su od idealnih u proseku 1,71 puta.



Slika 9: Grafici poređenja SFR-a u petoj fazi sudara.

Na donjem grafu slike 9, između tačaka nema korelacije s obzirom da koeficijent korelacije ima vrednost 0,02. Uzrok nedostatka korelacije su tačke koje pripadaju objektima sa rednim brojem 1 i 5 koje znatno odskaču od linije idealne vrednosti. Ostale tačke nalaze se u blizini idealne linije. Položaj linije linearnog fita (nagib sa vrednošću 0,03 i presekom ordinate u tački 0,56) je takav da se slabo poklapa sa linijom idealnog odnosa. Vrednosti $SFR_{1,4}$ u petoj fazi sudara razlikuju se od vrednosti $SFR_{H\alpha}$ u proseku 11,9 puta, s tim da vrednosti $SFR_{1,4}$ uglavnom imaju veće vrednosti.

7. DISKUSIJA

U daljem tekstu izvršena je redukcija galaksija (tj. njihovih tačaka sa grafa) kod kojih je bilo sumnje da daju neopravdano velike ili male vrednosti SFR-a na nekom od markera. To je izvršeno ne iz pretpostavke da je tokom određivanja dane vrednosti nastala neka greška, nego na osnovu pretpostavke da u nekim slučajevima vrednosti SFR-a mogu biti pod uticajem nekih procesa, koji značajno povećavaju zračenje na određenom markeru ili ga smanjuju, a da ta zračenja nisu povezana sa formiranjem zvezda. Takvi procesi mogu biti ekstinkcija zračenja usled prašine, uticaj plimskih sila i slično. Redukcija je izvršena na taj način da su iz uzorka izbačene one galaksije kod kojih se bilo koje dve vrednosti SFR-a značajno razlikuju (uglavnom gde je odnos dve vrednosti veći od četiri). Kod onih galaksija gde se sve tri vrednosti SFR-a određene preko tri različita markera međusobno ne razlikuju značajno (uglavnom gde razlika nije veća od četiri puta), smatrano je da ne podležu značajno uticajima koji nisu direktno povezani sa nastankom zvezda. Grafovi gde nije došlo do redukcije tačaka nisu predstavljeni u ovom poglavlju.

Na osnovu analize odnosa SFR preko tri navedena markera u prvoj fazi sudara sa slike 5, bilo je zaključeno da SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ se nalaze u snažnoj korelaciji. Ne treba zaboraviti da njihovi markeri nisu osetljivi na ekstinkciju zračenja. Kada je u pitanju $SFR_{H\alpha}$ a s obzirom da su vrednosti ove veličine značajno manje u poređenju sa SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ kod objekata sa rednim brojevima 12, 22 i 43 može se pretpostaviti da kod ovih objekata postoji značajna količina prašine. Prašina apsorbuje značajne količine $H\alpha$ zračenja, tako da samo mali deo uspe da napusti galaksiju, što dalje utiče na male vrednosti $SFR_{H\alpha}$. Da u ovim galaksijama možda postoji značajna količina prašine, ukazuje i parametar q_{IR} , čija srednja vrednost za prvu fazu sudara iznosi 2,47. Njegova vrednost ukazuje da FIR fluks ima veću vrednost od radio fluksa na frekvenciji 1,4 GHz.

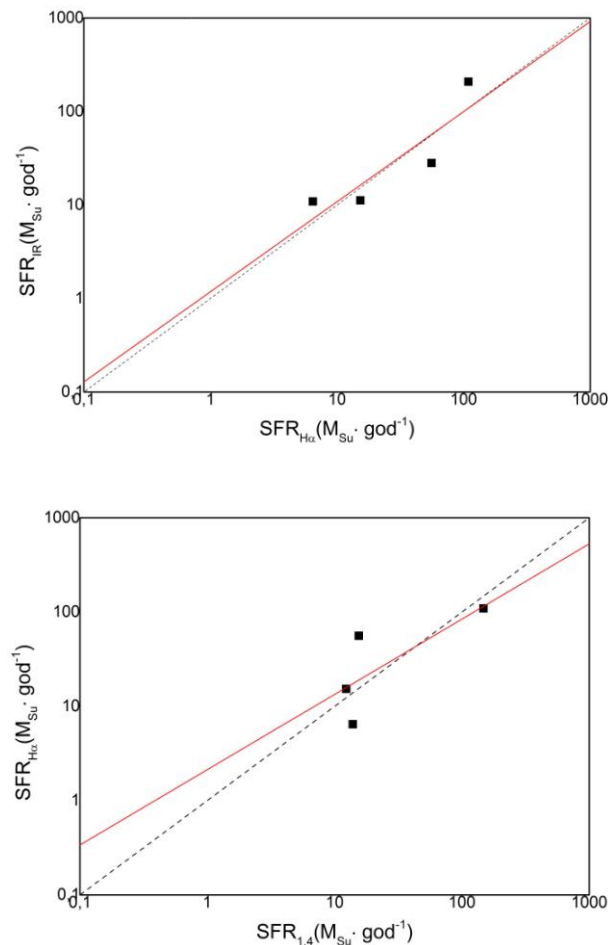
U drugoj fazi sudara $SFR_{1,4}$ i SFR_{IR} takođe podležu korelaciji, a parametar q_{IR} ima srednju vrednost 2,38. To znači da i tokom ove faze FIR fluks ima veću vrednost od radio fluksa na frekvenciji 1,4 GHz. Na grafovima gde se upoređuje $SFR_{H\alpha}$ na slici 6, vidi se da se sve tačke grupišu, osim tačke koja predstavlja objekt sa rednim brojem 18. Međutim, neopravdano je njegovo izbacivanje iz uzorka zbog toga što je njegova vrednost $SFR_{H\alpha}$ manja od ostale dve vrednosti približno dvaput, tako da se može smatrati da kod ove galaksije vrednosti SFR-a nisu pod uticajem nekih procesa koji nisu povezani sa formiranjem zvezda. Takođe, neopravdano je izbaciti ostale tačke zbog toga što se one nalaze u snažnoj korelaciji. Međutim zbog izabrane metodologije na grafu bi ostala samo tačka galaksije sa r. b. 18. Kao i u prvoj fazi može se pretpostaviti da je uzrok ovakve razlike vrednosti $SFR_{H\alpha}$ u odnosu na $SFR_{1,4}$ i SFR_{IR} , ekstinkcija.

Pregledom beleški o ovim galaksijama preko NED⁷ baze podataka, uočeno je da kod većine ovih galaksija se beleži snažno FIR i radio zračenje koje dolazi iz jezgra galaksije. Ova zračenja autori uglavnom pripisuju slabom aktivnom galaktičkom jezgru (AGJ) ili galaksiji u “starburst” fazi. AGJ predstavlja jednu fazu evolucije galaksije koja se odlikuje snažnim zračenjem galaksije iz njenog jezgra. Ono je mnogo intenzivnije od zračenja koje dolazi iz ostalog dela galaksije, i ovakvo zračenje nije posledica formiranja zvezda. Ono nastaje kad ogromne količine gasa i prašine ulaze u jezgro galaksije i pri tome dolazi do njihove akrecije na crnoj rupi, usled čega se one ubrzavaju, zagrevaju i zrače. Spektralne linije su im relativno široke i uglavnom imaju snažno radio zračenje. Ova zračenja mogu biti intenzivna i na talasnim dužinama koje se koriste kao marker za određivanje SFR-a. To krajnje nepovoljno utiče na njegovu vrednost, uglavnom tako što ga značajno povećava, a da to povećanje nije rezultat nastajanja zvezda.

U ovoj fazi sudara galaksije su jako blizu jedna drugoj, što plimske sile čini znatno intenzivnijim nego u prvoj fazi sudara. Može se pretpostaviti da pod njenim dejstvom gas počinje da se nakuplja u jezgru ili grupiše duž diska galaksije, formirajući tako krakove. Na ovim mestima gustina gasa se poveća pa to bi moglo biti okidač “starburst” faze. Dakle, može se pretpostaviti da ova zračenja potiču od formiranja zvezda a da $SFR_{H\alpha}$ i ovde ima slabu vrednost usled ekstinkcije.

S druge strane grafovi na slici 1 uglavnom ne predviđaju značajno povećanje vrednosti SFR-a pre treće faze sudara. Usled toga, moguće je razlike među SFR-a objasniti i na sledeći način, koji je zbog toga prihvatljiviji.

U ranim fazama sudara u kojima se galaksije još nisu sudarile, što odgovara prvoj i drugoj fazi, očekuje se pojava plimskih uticaja u međuzvezdanoj sredini galaksija usled narušavanja gravitacionog potencijala, koji dovode do zagrevanja gasa i prašine. Zagrevanje se odvija putem međusobnih sudara čestica, usled čega one emituju FIR zračenje. Međutim, pod uticajem ovih procesa, zrnca prašine počinju da se raspadaju. Vreme potrebno za dezintegraciju prašine kreće se u intervalu 10^3 - 10^7 godina. Takođe, javlja se i ubrzavanje elektrona (iz kosmičkih zraka) putem ovih talasa, koji daju netermalno sinhotronsko zračenje. Ubrzavanje može da traje od 10^5 godina do kraja kretanja plimskog talasa kroz MZS, što se procenjuje na 10^9 godina. Dakle, plimski talasi u ranim fazama interakcije,



Slika 10: Prva i druga faza sudara posle izvršene korekcije

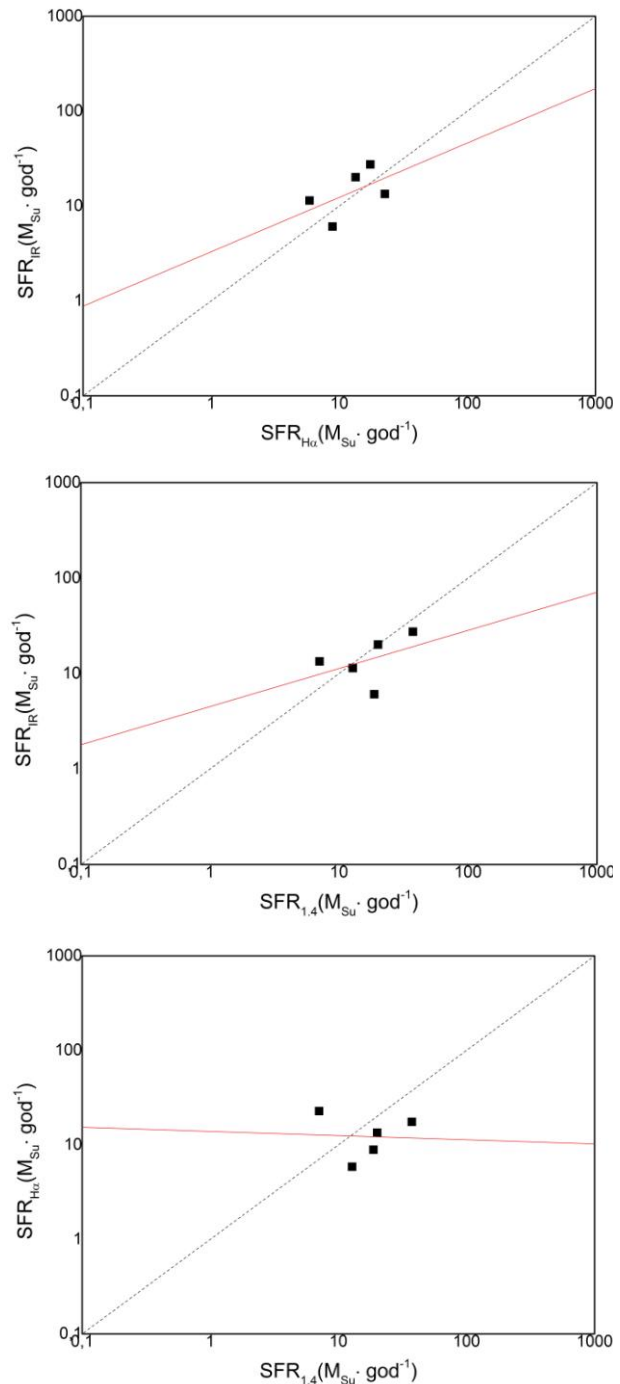
⁷ Skraćenica od NASA/IPAC Extragalactic Database

povećavaju intenzitet zračenja u FIR i radio domenu, s tim da se FIR zračenje povećava više u prve dve faze sudara i ono ima veći intenzitet u odnosu na radio zračenje, tj. ono je dominantno zračenje u ovim fazama (Donevski, Prodanović 2015).

Ovu činjenicu podupiru i vrednosti u tabeli 2, gde su brojačano predstavljeni odnosi SFR-a, gde u prvoj i drugoj fazi se vidi da uglavnom važi $SFR_{1,4}/SFR_{IR} < 1$, tj. vrednosti SFR_{IR} su veće od $SFR_{1,4}$ usled intenzivnijeg FIR zračenja. Može se onda zaključiti da će ovi procesi uticati na vrednosti SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$, tako što će ih značajno povećavati u odnosu na $SFR_{H\alpha}$ usled čega se i javljaju značajne razlike u prvoj, a pogotovo u drugoj fazi sudara. Ovde treba imati u vidu da ovi procesi mogu da nastanu usled plimskih sila a ne kao rezultat zračenja masivnih mladih zvezda. Zbog toga ih je potrebno smatrati kao smetnju pošto ne daju realnu sliku o brzini nastanka zvezda.

Ako se objekti sa r.b. 12, 22 i 43 iz prve faze kao i svi objekti iz druge faze osim galaksije sa r.b. 18 izbrišu, crtanjem grafova zajedničkih za prvu i drugu fazu zbog malog broja preostalih tačaka, korelacije između $SFR_{H\alpha}$ i SFR_{IR} odnosno $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$, se povećavaju (slika 10). Tako u prvom slučaju koeficijent korelacije ima vrednost 0,88 što predstavlja snažnu korelaciju između $SFR_{H\alpha}$ i SFR_{IR} , dok u drugom ima vrednost 0,75 što je snažna korelacija između $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$. Sem toga, linija linearnog fita (sa nagibom 0,96 i presekom sa ordinatom u tački 0,07) kod poređenja $SFR_{H\alpha}$ i SFR_{IR} skoro idealno se poklapa sa linijom idealnog odnosa. Takođe linija linearnog fita poboljšava svoj položaj u odnosu na idealnu liniju kod poređenja $SFR_{H\alpha}$ i $SFR_{1,4}$ sa vrednošću nagiba 0,80 i presekom sa ordinatom u tački 0,33.

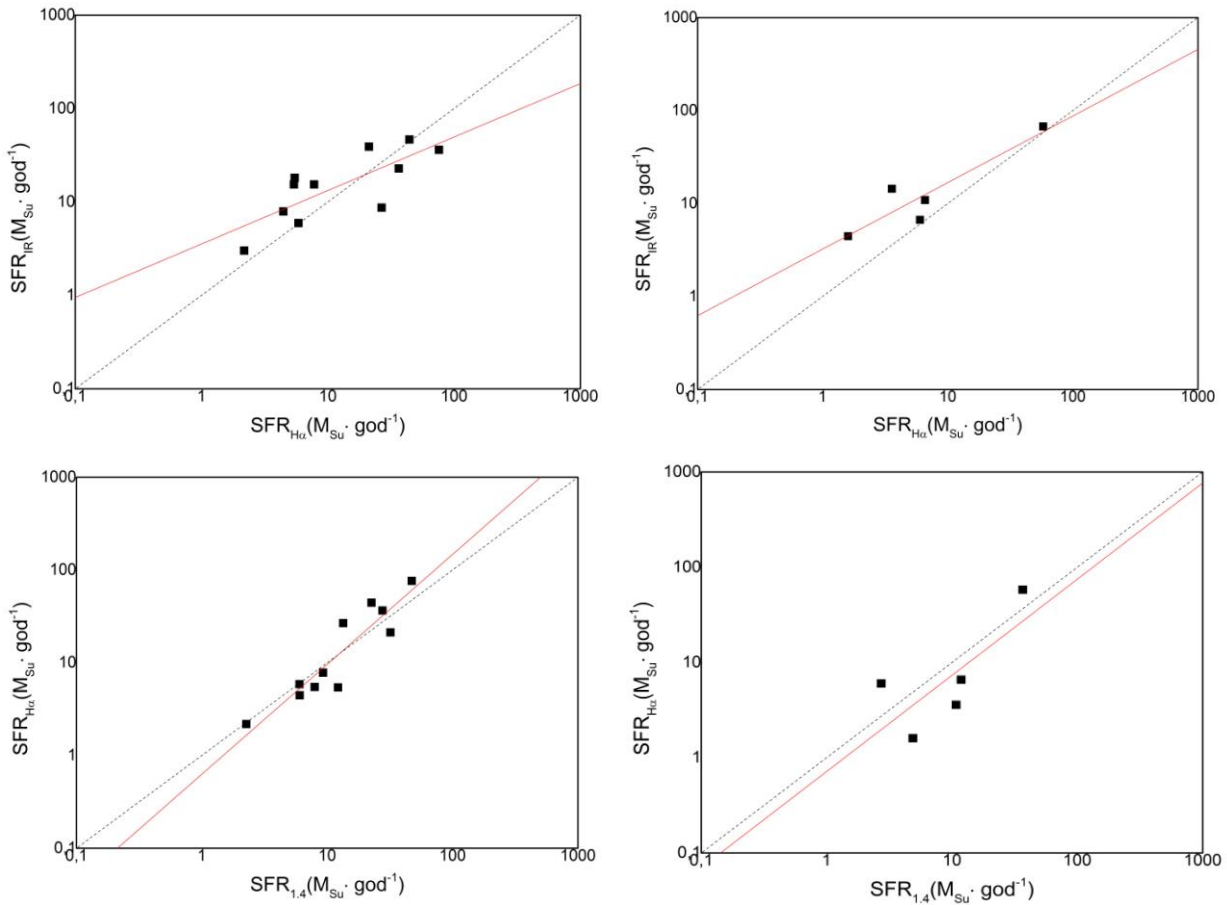
U trećoj fazi sudara za dve galaksije sa rednim brojevima 29 i 35 se sumnja da poseduju AGJ. Podaci NED baze podataka o galaksiji sa r.b. 29 sugerišu da možda pripada podgrupi galaksija sa AGJ koje se zovu Sajfertove galaksije tipa 2. Ove galaksije odlikuju se blago širokim linijama u spektru i mnoštvom zabranjenih linija. Široke linije su posledica velike brzine kretanja gasa i prašine oko crne rupe. U spektru ove galaksije uočene su intenzivne zabranjene linije kao što su:



Slika 11: Treća faza sudara posle izvršene korekcije

[OIII], [OI], [NII], [OII] i [SII], s tim da nisu izrazito široke u odnosu na linije normalne galaksije. Pošto ih se lako može pomešati sa “starburst” galaksijama, često se koristi uslov za detekciju Sajfert galaksija u obliku $[OIII]/H\beta > 3$, tj. intenzitet emisione linije [OIII] je tri puta veći od intenziteta emisione linije $H\beta$. Na osnovu spektra ove galaksije iz NED baze podataka, odnos intenziteta ove dve linije procenjen je da ima vrednost 4,2. Dakle, može se smatrati da značajni deo zračenja ove galaksije je posledica AGJ.

Što se tiče objekta sa r.b. 35 za njega se pretpostavlja da je LINER⁸ galaksija. Tačna definicija ovakvih galaksija nije određena, s obzirom da ih neki svrstavaju u galaksije sa AGJ koje imaju slabu luminoznost, dok drugi ih povezuju sa “starburst” galaksijama. Spektralno ove galaksije liče na Sajfert 2 galaksije samo što su im linije jednom jonizovanih elemenata relativno intenzivne. Uvidom u spektar ove galaksije preko NED baze podataka može se videti da ove



Slika 12: Četvrta (grafovi levo) i peta (grafovi desno) faza sudara posle izvršene korekcije

linije nisu izrazito intenzivne. Međutim, ako se uporede sve tri vrednosti SFR-a kod galaksija sa r.b. 29 i 35, primećuje se slična tendencija povećanja vrednosti SFR-a, pa se može pretpostaviti da i kod ove galaksije značajni deo zračenja je posledica AGJ.

S druge strane galaksija sa r.b. 2 ima najveću vrednost $SFR_{1,4}$ i kod većeg broja galaksija iz ove faze $SFR_{1,4}$ ima veću vrednost od SFR_{IR} .

⁸ Skraćenica od **L**ow **I**onization **N**uclear **E**mission **L**ine **R**egion

Posle nekoliko 10^7 godina od početka interakcije između galaksija, pod uticajem plimskih sila pretpostavlja se da su naelektrisane čestice gasa značajno ubrzane i počinju značajno da zrače netermalno u radio domenu. U tom periodu, mnoštvo čestica prašine koje su zračile u FIR domenu usled zagrevanja putem plimskih sila značajno je smanjen, pošto su se raspale usled međusobnog trenja. FIR zračenje koje potiče od prašine sada je posledica zagrevanja od novoformiranih zvezda. Usled toga u ovoj fazi sudara se očekuje da fluks zračenja u radio domenu ima veću vrednost od fluksa FIR zračenja, odnosno da parametar q_{IR} ima vrednost manju od 2,34. Izmerena srednja vrednost ovog parametra u trećoj fazi sudara iznosi 2,09 (Donevski, Prodanović 2015).

U prilog ovome idu poređenja brojeanih vrednosti SFR-a u trećoj fazi u tabeli 2, gde se vidi da kod većine galaksija važi $SFR_{1,4}/SFR_{IR} > 1$, tj. da $SFR_{1,4}$ ima veće vrednosti od SFR_{IR} .

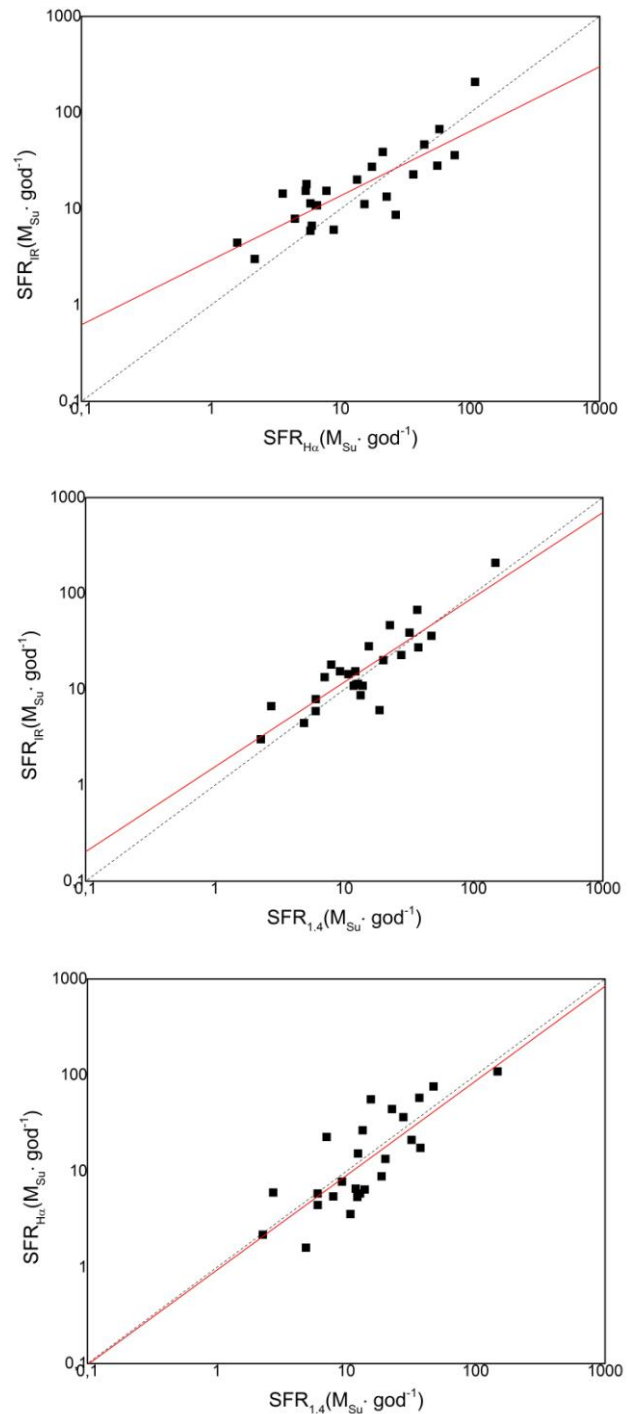
Zato se može pretpostaviti da kod većine galaksija iz treće faze sudara, a pre svega kod galaksije sa r.b. 2, vrednost $SFR_{1,4}$ je pod uticajem ovog povećanja sinhrotronskog zračenja.

Što se tiče objekata sa rednim brojevima 4 i 11, njihove vrednosti SFR_{IR} i $SFR_{1,4}$ se znatno ne razlikuju. Međutim, u poređenju sa $SFR_{H\alpha}$ daju veće vrednosti. Moguće je da su vrednosti $SFR_{H\alpha}$ umanjene usled ekstinkcije.

Na slici 11 predstavljeni su grafovi poređenja SFR u trećoj fazi, nakon odstranjivanja objekata sa rednim brojevima 35, 29, 11, 4 i 2. Međutim, ni posle odstranjivanja ne dolazi do popravljanja korelacije među vrednostima SFR-a.

U galaksijama iz četvrte faze sa r.b. 28 i 33 može se pretpostaviti da ima ekstinkcije, dok je u galaksijama sa r.b. 13 i 38 povećana razlika između markera usled povećanog sinhrotronskog zračenja, verovatno iz istog razloga kao što je opisano u trećoj fazi.

U kasnijim fazama sudara, (konkretno u četvrtoj), može se očekivati nastajanje novih masivnih zvezda. Masivne zvezde koje su nastale u ovoj fazi završavaju svoj život kao supernove, koje će dodatno ubrzavati



Slika 13: Sve faze sudara zajedno posle izvršene korekcije

naelektrisane čestice. Ovi procesi će doprineti da radio zračenje na frekvenciji 1,4 GHz u ovom slučaju bude posledica ubrzavanja usled supernovih i plimskih sila, pa će ovo zračenje u ovoj fazi biti dominantnije od FIR zračenja, čiji intenzitet se takođe povećao usled zračenja mladih zvezda. U četvrtoj fazi parametar q_{IR} ima srednju vrednost 2,31 što ide u korist predhodnoj konstataciji (Donevski, Prodanović 2015).

Pošto se i u ovoj fazi očekuje da FIR zračenje bude slabije od zračenja na frekvenciji 1,4 GHz, takođe se može očekivati i da će SFR_{IR} imati manje vrednosti od $\text{SFR}_{1,4}$, što se iz tabele 2 i vidi, tj. u četvrtoj fazi uglavnom važi $\text{SFR}_{1,4}/\text{SFR}_{\text{IR}} > 1$. Na slici 12 levo, predstavljeni su grafici zavisnosti SFR-a u četvrtoj fazi bez gore pomenutih galaksija. Na taj način koeficijent korelacije povećao se na vrednost 0,77 pri poređenju SFR_{IR} i $\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$. Presek linije linearnog fita sa ordinatom i nagib su se poboljšali u odnosu na liniju idealnog odnosa, dobivši vrednosti 0,55 odnosno 0,57. Koeficijent korelacije se znatno povećao i kod poređenja $\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$ i $\text{SFR}_{1,4}$ dobivši vrednost 0,92, kao i presek sa ordinatom i nagib linije linearnog fita sa vrednostima -0,20 odnosno 1,19.

U petoj fazi sudara galaksije sa r.b. 1 i 5 imaju znatno niže vrednosti $\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$ u odnosu na ostale dve vrednosti, što se s jedne strane može delimično opisati kao posledica ekstinkcije. S druge strane u NED bazi podataka galaksija sa r.b. 1 uglavnom je okarakterisana kao Sajfet 2 galaksija. Za galaksiju sa r.b. 5 u NED bazi nema detaljan opis, ali pošto njene vrednosti SFR-a imaju slične vrednosti kao kod galaksije sa r. b. 1, opravdano je pretpostaviti da se radi o galaksiji sa AGJ.

Rezultati simulacija na sva tri grafa u poglavlju 4.1. na slici 2 predviđaju da u petoj fazi može doći do drastičnog povećanja vrednosti SFR-a.

U ovoj fazi očekuje se “starburst” faza, pa zbog nastajanja novih zvezda parametar q_{IR} počinje da raste usled povećanja FIR zračenja. Srednja vrednost parametra q_{IR} u petoj fazi sudara ima vrednost 2,44 (Donevski, Prodanović 2015).

Dakle FIR zračenje je u ovoj fazi intenzivnije od radio zračenja na 1,4 GHz, što u krajnjem slučaju deluje i na vrednosti SFR, pa se tako u tabeli 2 vidi da uglavnom važi odnos $\text{SFR}_{1,4}/\text{SFR}_{\text{IR}} < 1$.

Usled nastajanja novih masivnih zvezda i zračenje na $\text{H}\alpha$ liniji postaje intenzivnije, pa $\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$ ima veće vrednosti u odnosu na ostala dva markera u poslednjim fazama, što na kraju dovodi do toga da se i vrednosti SFR-a međusobno za jednu galaksiju u poslednjim fazama uglavnom ne razlikuju drastično.

Na slici 12 desno, predstavljeni su grafici poređenja SFR-ova u petoj fazi, bez dve gore pomenute galaksije. Tim postupkom drastično je povećana korelacija i popravio se nagib prave linearnog fita u odnosu na liniju idealnog odnosa. Na gornjem grafu desno, na slici 12, gde se porede $\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$ i SFR_{IR} koeficijent korelacije ima vrednost 0,92. Prava linearnog fita seče ordinatu u tački 0,51 a njen nagib je 0,72. Na donjem grafu desno, slike 12, gde se porede $\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$ i $\text{SFR}_{1,4}$ koeficijent korelacije ima vrednost 0,91. Linija idealnog fita seče ordinatu u tački 0,18 a nagib joj ima vrednost 0,96.

Na slici 13 nalaze se grafovi poređenja SFR-a u svih pet faza sudara zajedno, nakon izvršene redukcije. Time se drastično povećala korelacija između tačaka, ali i položaj linije linearnog fita u odnosu na idealnu liniju. Sa grafa poređenja $\text{SFR}_{\text{IR}}/\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$ koeficijent korelacije povećao se na 0,82. Linija linearnog fita dobila je tačku preseka u 0,47 i nagib 0,67.

Korelacija tačaka na grafu $\text{SFR}_{\text{IR}}/\text{SFR}_{1,4}$ povećala se na 0,87 a presek i nagib linije linearnog fita na 0,19 odnosno 0,88.

Najveće povećanje koeficijenta korelacije na 0,80, nastalo je pri poređenju $SFR_{H\alpha}/SFR_{1,4}$. Linija linernog fita praktično ima idalnu poziciju sa presekom ordinate u tački -0,03 i nagibom 0,98.

Dakle, pošto se posle izvršene redukcije galaksija, linije linearnog fita i linije idealnih vrednosti odnosa, skoro idealno poklapaju na slici 13, može se smatrati da su u uzorku ostale samo one galaksije kod kojih se vrednosti SFR-a ne nalaze značajno pod dejstvom procesa u galaksiji koji nisu u vezi sa formiranjem zvezda. Analizirajući ove i ostale grafove u ovom i prethodnom poglavlju kao i tabele, zapaža se da se vrednosti SFR unutar svake faze sudara znatno menjaju od jedne do druge galaksije na jednom te istom markeru. Ova pojava nije vezana za određenu fazu nego se pojavljuje u svim fazama sudara. Takođe, ne primećuje se značajno povećanje vrednosti SFR tokom određene faze. Na osnovu toga može se za ovaj uzorak galaksija reći da tokom njihovih sudara generalno dolazi do povećanja vrednosti SFR, ali da se ono ne pojavljuje tokom određene faze.

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analize i diskusije mogu se izvući sledeći zaključci:

1. $SFR_{H\alpha}$ uglavnom ima manje vrednosti u odnosu na $SFR_{1,4}$ i SFR_{IR} . Jedan mogući uzrok ovog je ekstinkcija $H\alpha$ zračenja, i ovaj efekat je zastupljen u svim fazama sudara u manjoj ili većoj meri. Drugi mogući uzrok je povećanje vrednosti $SFR_{1,4}$ i SFR_{IR} usled dejstva plimskih sila.
2. U prve dve faze sudara, pogotovo u drugoj fazi, pošto se u njima generalno ne očekuju pojave snažnih “starburst” faza, velike vrednosti $SFR_{1,4}$ i SFR_{IR} nisu posledica dejstva masivnih mladih zvezda, već posledica uticaja plimskih sila, pod čijim dejstvom se čestice prašine i gasa zagrevaju i ubrzavaju. Zagrevanje u ovim fazama je intenzivnije od ubrzavanja usled čega u ovim fazama termalno zračenje je dominantno, pa u ovim fazama važi $SFR_{1,4}/SFR_{IR} < 1$.
3. U trećoj fazi dostiže se maksimum ubrzanja naelektrisanih čestica, pa one u ovoj fazi utiču na povećanje sinhrotronskog zračenja. S druge strane, prašinu počinju da greju mlade zvezde a zagrevanje usled plimskih sila se smanjuje. Usled toga u ovoj fazi netermalno zračenje je uglavnom dominantno, usled čega važi $SFR_{1,4}/SFR_{IR} > 1$.
4. U četvrtoj fazi uglavnom važi odnos $SFR_{1,4}/SFR_{IR} > 1$ što je posledica udruženog dejstva ubrzavanja čestica pod dejstvom plimskih sila i supernovih.
5. U petoj fazi sudara uglavnom važi odnos $SFR_{1,4}/SFR_{IR} < 1$ usled povećanog formiranja zvezda i povećanja FIR zračenja.
6. Na osnovu grafova i tabela u poglavlju 6 i 7, vidi se da se vrednosti SFR-a određeni preko svih markera drastično menjaju unutar svih faza. Vrednosti SFR-a generalno se povećavaju tokom sudara galaksija, ali se na osnovu vrednosti ne može primetiti značajno povećanje tokom određene faze sudara.

LITERATURA

1. Bournaud F., *Star Formation and Structure Formation in Galaxy Interactions and Mergers*, (2010), dostupno na <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/2010ASPC..423..177B>
2. Bournaud F. et al., *Star formation in galaxy mergers: ISM turbulence, dense gas excess, and scaling relations for disks and starbursts*, arXiv:1012.5227v1
3. Calzetti D., *Star Formation Rate Indicators*, arXiv:1208.2997v1
4. Corbett E. A. et al., *First Results from the COLA Project- the Radio-FIR Correlation and Compact Radio Cores in Southern COLA Galaxies*, arXiv:astro-ph/0109012v1
5. Cram L. E., *The Global Star Formation Rate from the 1.4 GHz Luminosity Function*, arXiv:astro-ph/9808228v2
6. Cram L. E. et al., *Star Formation Rates in Faint Radio Galaxies*, arXiv:astro-ph/9805327v1
7. Ćirković M., *Uvod u vangalaktičku astronomiju*, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad (2008)
8. Di Matteo P. et al., *On the frequency, intensity and duration of starburst episodes triggered by galaxy interactions and mergers*, arXiv:0809.2592v1
9. Donevski D., Prodanović T., *Possible Breaking of the FIR-Radio Correlation in Tidally Interacting Galaxies*, arXiv:1501.06910v2
10. Dopita M. A. et al., *Star Formation Rates in Interacting Starburst Galaxies*, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 143, Issue 1, pp. 47-72, (2002)
11. Haan S. et al., *The Nuclear Structure in Nearby Luminous Infrared Galaxies: Hubble Space Telescope NICMOS Imaging of the GOALS Sample*, arXiv:1012.4012v1
12. Jansen R. A. et al., *[O II] as a tracer of current star formation*, arXiv:astro-ph/0012485v1
13. Kennicutt R. C., *Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequenc*, arXiv:astro-ph/9807187
14. Kewley L.J. et al., *The H-alpha and Infrared Star Formation Rates for the Nearby Field Galaxy Survey*, arXiv:astro-ph/0208508v2
15. Mo H., Bosch F., White S., *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge University Press (2010)
16. Muxlow T. W. B. et al., *Starburst Galaxies*, arXiv:astro-ph/0611951v1
17. Murphy E. J. et al., *Calibrating Extinction-Free Star Formation Rate Diagnostics with 33GHz Free-Free Emission in NGC6946*, arXiv:1105.4877v1
18. Murphy E. J., *The Role of Merger Stage on Galaxy Radio Spectra in Local Infrared-Bright Starburst Galaxies*, arXiv:1308.4415v1
19. Prodanović T., *Uvod u spektroskopiju za astronome*, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad (2010)
20. Yun M. et al., *Radio Properties of Infrared Selected Galaxies in the IRAS 2 Jy Sample*, arXiv:astro-ph/0102154v2
21. <http://www.as.utexas.edu/astronomy/people/scalo/Scalo1986.IMF.FundCosPhys.pdf>
22. <https://ned.ipac.caltech.edu/>
23. https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay_liner.html
24. https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay_seyfert.html

BIOGRAFIJA AUTORA



Rođen sam 18. juna 1988. godine u Bačkoj Palanci. Osnovnu školu “Jan Kolar” sam završio u Selenči 2003. godine. Po završetku osnovne škole upisao sam srednju medicinsku školu “Dr. Ružica Rip” u Somboru. Nakon srednje škole 2007. godine upisao sam studije fizike, smer astronomija sa astrofizikom na Prirodno-Matematičkom fakultetu u Novom Sadu.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Završni rad

Vlasto Petraš

Prof. dr Tijana Prodanović

Uticaj sudara galaksija na brzinu formiranja zvezda

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2016.

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Broj poglavlja-8, broj strana- 30, broj referenci-24, broj tabela-2, broj slika-13

Fizika

Astrofizika

Brzina formiranja zvezda, sudari galaksija, funkcija inicijalne mase, plimske sile, ekstinkcija

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

U radu su predstavljene vrednosti brzine formiranja zvezda za 43 galaksije određene preko tri različita markera, koje se nalaze u pet različitih faza sudara. Akcenat u ovom radu dat je na ispitivanje uticaja faze sudara na vrednosti brzine formiranja zvezda.

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Prof. dr Miodrag Krmar

član:

Prof. dr Tijana Prodanović

član:

Prof. dr Igor Savić

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: Vlasto Petraš
AU

Mentor/comentor: Prof. dr Tijana Prodanović
MN

Title: The impact of the collision of galaxies on the star formation rate
TI

Language of text: Serbian (Latin)
LT

Language of abstract: English
LA

Country of publication: Serbia
CP

Locality of publication: Vojvodina
LP

Publication year: 2016
PY

Publisher: Author's reprint
PU

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

Physical description: Chapters-8, pages-30, references-24, tables-2, figures-13
PD

Scientific field: Physics
SF

Scientific discipline: Astrophysics
SD

Subject/ Key words: Star formation rate, collision of galaxies, initial mass function, tidal forces, extinction
SKW

UC

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

Note: none
N

Abstract: This paper presents values of star formation rate for 43 galaxies determined from three different markers. The galaxies in this sample are all interacting, but in 5 different interaction (collision) stages. The goal in this paper is to examine the effects of collision stages on measured values of star formation rate.
AB

Accepted by the Scientific Board:
ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Member:

Member:

Prof. dr Miodrag Krmar

Prof. dr Tijana Prodanović

Prof. dr Igor Savić