

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Марина С. Павловић

**УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈА УДАЉЕНИХ
ГАЛАКСИЈА НА ЊИХОВО
НЕТЕРМАЛНО РАДИО-ЗРАЧЕЊЕ**

докторска дисертација

Београд, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MATHEMATICS

Marina S. Pavlović

**INFLUENCE OF INTERACTIONS OF
DISTANT GALAXIES ON THEIR
NON-THERMAL RADIO-EMISSION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

Ментор:

др Тијана ПРОДАНОВИЋ, ванредни професор
Универзитет у Београду, Математички факултет

Чланови комисије:

др Драгана ИЛИЋ, ванредни професор
Универзитет у Београду, Математички факултет

др Дејан УРОШЕВИЋ, редовни професор
Универзитет у Београду, Математички факултет

др Мајда СМОЛЕ, научни сарадник
Астрономска опсерваторија, Београд

Датум одбране:

Захваљујем се мојој менторки проф. др Тијани Продановић, на њеном знању, добрим идејама и њеном саветовању на разумевању и савладавању. Велико хвала др. Дарку Донеvском, проф. др Драгани Илић, проф. др Дејану Урошевићу и др. Мајди Смоле на конструктивним коментарима који су ово истраживање подигли на виши ниво. Неизмерно хвала Мици Ракић која је имала одличне савете током израде ове докторске дисертације и давала неограничену подршку током студија. Посебно хвала мом тати Столеу и брату Александру чија је подршка увек била мотивација у тешким тренуцима.

За сећање и вечну љубав, мојој мами Јасмини.

Марина Павловић

Наслов дисертације: Утицај интеракција удаљених галаксија на њихово нетермално радио-зрачење

Резиме: Проучавања галаксија на великим црвеним помацима кључна су за разумевање еволуције галаксија кроз космичка времена. Како је овакве објекте тешко посматрати директно, они се углавном испитују помоћу емпиријски добијених алата као што су бројне корелације између њихових различитих параметарских карактеристика. Једна оваква линеарна зависност између далеког инфрацрвеног и радио-зрачења галаксија у којима се активно формирају звезде названа је далека инфрацрвена-радио (ДИР) корелација. Иако се сматрало да је корелација стабилна по питању линеарности скорашњи радови, који укључују галаксије на високим црвеним помацима ($0 < z < 6$), показали су одступање од корелације у овим системима. Циљ ове докторске дисертације јесте испитивање физичких процеса који доводе до оваквог понашања. Као могући узрок еволуције претпоставићемо по први пут, и испитати интеракције између галаксија (сударе и блиске пролазе). Интеракције доводе до појаве ударних таласа на великим скалама који могу да доведу до промена у односу између инфрацрвеног и радио-зрачења. Наша хипотеза тестирана је кроз неколико стадијума а главни резултати су следећи:

1. Развили смо моделе еволуције ДИР корелације са црвеним помаком у функцији од стопе интеракција галаксија. Моделе смо тестирали на узорку галаксија са одређеном морфологијом одвојено за дисколике галаксије и за галаксије које су скоро биле или су тренутно у интеракцији - неправилне галаксије.
2. На малом узорку који чине 34 галаксије који је био доступан у раду Miettinen et al. (2017), показали смо да постоји индикација да интеракција између галаксија може бити заслужна за евентуалну еволуцију корелације са црвеним помаком.
3. Следећа анализа спроведена је на већем узорку галаксија у којима се формирају звезде, преузетом из *COSMOS* прегледа нема. Резултати ове анализе нису показали никакву еволуцију корелације са црвеним помаком. Такође, показано је да је средња вредност параметра корелације нижа код неправилних галаксија у односу на дисколике.

Иако су скорија посматрања указивала на еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком, резултати ове докторске дисертације нису успели да репроду-

кују ту еволуцију већ су показали да је ДИР корелација стабилна са променом црвеног помака. Међутим, показало се и да је услед интеракције галаксија могућа појава еволуција параметра ДИР корелације уколико је заступљеност интерагујућих система у узорку већа.

Кључне речи: астрофизика, галаксије, галаксије: судари, нетермално зрачење: радио-зрачење

Научна област: астрономија

Ужа научна област: астрофизика

УДК број:

Dissertation title: Influence of interactions of distant galaxies on their non-thermal radio-emission

Abstract:

The study of galaxies through high redshifts are key to understanding the evolution of galaxies through cosmic times. As such objects are very difficult to observe directly, they are mainly examined using empirically derived tools such as the numerous correlations between their different parametric characteristics, one of them being the linear relationship between far-infrared and radio emission in star-forming galaxies, named the Far Infrared-Radio (FIR) Correlation. Although the correlation was considered to be stable in terms of linearity, recent works, which include galaxies at high redshifts ($0 < z < 6$), showed a large deviation from the correlation in these systems. The goal of this doctoral dissertation is an examination of the physical processes that lead to this kind of behavior. As a possible cause of this evolution, we will assume for the first time, and examine interactions between galaxies (collisions and close approaches). Interactions between galaxies lead to the formation of shock waves on large scales that can lead to changes in the relationship between infrared and radio emissions. Our hypothesis was tested in several stadiums and the main results are as follows: 1. We developed models of the evolution of the FIR correlation with redshift as functions of the galaxy interaction rate. We tested the models on a sample of galaxies with an already determined morphology separately for disc galaxies and for galaxies that have recently been or are currently interacting - irregular galaxies.

2. In a small sample of 34 galaxies that we took from paper Miettinen et al. (2017), it was shown that there is an indication that the interaction between galaxies can be responsible for the evolution of the correlation with the redshift.

3. The next analysis was performed on a much larger sample of star-forming galaxies taken from COSMOS field, where we did not find any evolution of correlation with the redshift. Also, it was shown that the mean value of the correlation parameter is lower in irregular galaxies than in disk galaxies.

Although recent observations indicated an evolution of the FIR correlation with redshift, the results of this research failed to reproduce that evolution and showed that the FIR correlation is stable with redshift. However, it was also shown that due to the interaction of galaxies, the evolution of the FIR correlation is possible if the representation of interacting systems in the sample is higher.

Keywords: astrophysics, galaxies, galaxies: mergers, non-thermal radiation: radio emission

Research area: astronomy

Research sub-area: astrophysics

UDC number:

Садржај

1	Увод	1
1.1	Ширење Универзума и црвени помак	2
1.2	Потрага за далеким галаксијама	6
1.3	Субмилиметарске галаксије	9
1.3.1	Спектрална енергетска расподела	10
1.3.2	Маса субмилиметарских галаксија и стопа формирања звезда	12
1.3.3	Расподела по црвеном помаку	14
1.3.4	Значај субмилиметарских галаксија	16
1.4	Далека инфрацрвена - радио корелација	17
1.4.1	Физички узрок појаве и значај корелације	23
1.4.2	ДИР корелација у локалном свемиру	24
1.5	Циљеви и структура докторске дисертације	26
2	ДИР корелација код субмилиметарских галаксија	27
2.1	Еволуција ДИР корелације са црвеним помаком	28
2.2	Параметар ДИР корелације у интерагујућим системима	31
2.2.1	Развој физичких процеса кроз различите стадијуме судара	33
2.2.2	Еволуција параметра корелације у различитим стадију- мима судара	35
2.3	Еволуција ДИР корелације код сфероидних галаксија и код га- лаксија у чијој морфологији доминира диск	37
2.4	Зависност параметра ДИР корелације од звездане масе галаксије	38
3	Анализа могућих проблема	42
3.1	Искључивање АГЈ	43
3.1.1	Специфичности рендгенског зрачења АГЈ	45

3.1.2	Донли критеријум	48
3.1.3	Моделовање СЕД криве АГЈ	53
3.1.4	Радио-зрачење активних галаксија	56
3.2	Морфологија галаксија	57
3.2.1	Тумров низ - морфологија галаксија по стадијумима судара	58
3.2.2	Концентрација	59
3.2.3	Асиметрија	60
3.2.4	Грудвичастост	63
3.2.5	Цини коефицијент	64
3.2.6	Параметар M20	66
4	Утицај интеракције галаксија на параметар ДИР корелације	68
4.1	Модел еволуције ДИР корелације са црвеним помаком	69
4.2	<i>AzTEC/COSMOS</i> узорак - тест узорак	77
4.3	Зависност ДИР корелације од морфологије галаксија	82
4.4	Интеракција и ДИР корелација - <i>COSMOS</i> узорак	86
4.5	Морфологија галаксија	88
4.6	Детектовање и одстрањивање активних галаксија из узорка	88
4.7	Фотометријски и спектроскопски црвени помаци	89
4.8	Одређивање густине флукса у инфрацрвеном и радио - подручју спектра	92
5	Резултати и дискусија	97
5.1	Отворена питања и будући рад	103
6	Резиме и закључак	106
	Библиографија	118

Глава 1

Увод

Једна од фундаменталних предвиђања теорије великог праска, која је пронашла емпиријски доказ детекцијом космичког позадинског зрачења (енг. *Cosmic Microwave Background Radiation - CMB*, Penzias and Wilson 1965) и открићем да се свемир шири, јесте да се у почетку своје еволуције Универзум састојао само од материје и зрачења у термодинамичкој равнотежи, хомогено распоређених у простору (Sunyaev, 1974). Знамо да је данас свемир на малим скалама изузетно нехомоген и да је у њему материја организована у хијерархију структура попут звезда, галаксија, јата и суперјата галаксија (Liddle, 2003). Разумевање механизма који су довели до преласка из хомогеног Универзума до овог садашњег којег ми видимо, је од централног значаја како за космологију тако и за фундаменталну физику.

Тренутне идеје о формирању космолошких структура приписују се дејству гравитације, која је појачавала првобитне флуктуације у густини, све до колапса под сопственом гравитацијом и настанка првих структура. Прве галаксије ће кроз своју еволуцију пролазити кроз низ судара и блиских пролаза са другим галаксијама и на тај начин повећавати своју масу и формирати велике масивне галаксије које видимо у данашњем свемиру (Khochfar and Burkert, 2003; Springel and Hernquist, 2005; Schaye et al., 2015; Pillepich et al., 2018). Један од главних корака у проучавању космичке еволуције јесте препознавање првих галаксија које су се формирале у Универзуму и проучавање њихових својства у тренутку формирања (Liddle, 2003).

1.1 Ширење Универзума и црвени помак

Једно од највећих научних открића у астрономији у прошлом веку јесте ширење Универзума (Friedmann, 1999; Hubble, 1929; Livio, 2011). Ширење Универзума доводи до тога да се галактичка јата и галаксије у свемиру удаљавају једни од других (Friedmann, 1999). Радијална брзина удаљавања објеката v_r је, по Хабл-Леметровом закону, све већа што се посматрани објекти налазе на већој удаљености D (Hubble, 1929, 1936; Lemaître, 1931b):

$$v_r = H_0 D, \quad (1.1)$$

где је H_0 константа пропорционалности и носи назив Хаблова константа. Хаблова константа нам говори о брзини ширења простора између објеката. Мерења ове константе дају вредности између 60 и 70 $\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ ($1\text{Mpc} = 3.1 \times 10^{22}\text{m}$), што одговара старости Универзума између 10 и 15 милијарди година (Hubble, 1929; Lemaître, 1931a; Livio, 2011; Livio and Riess, 2013). Посматрањем анизотропије космичког позадинског зрачења помоћу Планковог телескопа дошли смо до вредности Хаблове константе која износи $H_0 = 66.93 \pm 0.62 \text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (Planck Collaboration et al., 2016).

Ширење Универзума и константна брзина светлости, доводе до тога да посматрач који се налази у некој другој галаксији (на пример Млечни Пут), детектује са удаљених објеката светлост неке таласне дужине (λ_0) на већим таласним дужинама од емитоване (λ_e). Ово ће изазвати „ширење” у таласној дужини, то јест померање ка већим (црвенијим) таласним дужинама. Ову промену таласне дужине између емитоване и посматране, називамо црвеним помаком z (Huggins, 1868), који се може изразити једначином 1.2. Што је таласна дужина коју меримо већа, то је црвени помак већи, а самим тим и удаљеност између две галаксије. Црвени помак дефинишемо на следећи начин:

$$z \equiv \frac{\lambda_0}{\lambda_e} - 1. \quad (1.2)$$

У космологији космолошки црвени помак повезан је са фактором скалирања $a(t)$ који означава „величину” Универзума, односно епоху Универзума. За објекат на црвеном помаку z важиће:

$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t_e)}. \quad (1.3)$$

где $a(t_0)$ представља скалу (односно величину) Универзума у времену када је емитована светлост детектована, а $a(t_e)$ представља величину Универзума када је објекат емитовао дату светлост.

Једна од најпрецизнијих техника мерења црвеног помака јесте испитивање спектра удаљених објеката. У самом спектру идентификују се спектралне линије (апсорпционе и емисионе) и њихов положај се упоређује са лабораторијски добијеним таласним дужинама датих линија (Oesch et al., 2015). Одступања ће, код далеких објеката, зависити само од црвеног помака. Ово је уједно и најтачнија метода одређивања црвених помака галаксија и других удаљених објеката у Универзуму. Мерени црвени помак ће се у сваком случају састојати од космолошког црвеног помака који произилази од ширења универзума и од црвеног помака који настаје од сопственог кретања објеката које посматрамо.

Поред ове, користи се и такозвана фотометријска метода одређивања црвеног помака која је доста несигурнија. Фотометријски црвени помак може бити одређен на два начина. Прва метода заснива се на снимању галаксије кроз различите фотометријске филтере, од којих сваки пропушта широк опсег таласних дужина светлости (Cunha et al., 2014). Битно је нагласити да се користи што више филтера зато што различите врсте галаксија имају другачије спектралне карактеристике дуж електромагнетног спектра. На пример, галаксије које имају велике заступљености прашине, биће уочљивије на црвеном филтеру него на филтерима који снимају објекте у оптичком делу спектра. Уз помоћ тест узорка који има снимљене спектре и измерене спектроскопске црвене помаке, прави се емпиријска релација између магнитуде галаксије у неком филтеру и црвеног помака. Ова метода има велику предност јер не захтева познавање спектра нити физичких процеса иза еволуције галаксија на великом црвеном помаку које желимо да опишемо. Међутим, она није универзална за све типове галаксија, јер како смо рекли, неке ће бити много светлије у црвеном филтеру у односу на UV део спектра и обрнуто, те се ова емпиријска релација између црвеног помака и привидних величина мора рачунати сваки пут за сваки различити узорак галаксија, што захтева познавање њихових спектра како би се направио тест узорак. Са друге стране, тест узорак се углавном састоји од објеката највећег сјаја из узорка, јер су погодни за снимање спектра, што значи да могу да се направе грешке приликом одређивања црвеног помака за објекте слабог сјаја када се претпостави

да се ради о истим типовима објеката, односно ако се претпостави да објекти високог сјаја имају исте спектралне карактеристике као и објекти ниског сјаја (Bolzonella et al., 2000).

Други начин одређивања фотометријског црвеног помака заснива се на ефикасности фитовања целокупног спектра објекта на свим таласним дужинама и на детекцији изражених спектралних карактеристика. Добијена фотометријска енергетска расподела спектра упоређује се са референтним спектром од којих спектар са најбољим поклапањем даје фотометријски црвени помак објекта (Bolzonella et al., 2000). У оба случаја за одређивање фотометријског црвеног помака потребни су референтни узорци који се углавном састоје од најлуминознијих објеката у главном узорку који се поистовећују са свим осталим, мање луминозним објектима за које није могуће снимити спектре.

До сада најпрецизнија истраживања дају разлику између спектроскопског z_{spec} и фотометријског црвеног помака z_{phot} од око ~ 0.014 до црвеног помака $z = 4.5$ (Salvato et al., 2009, 2019). У недостатку телескопског времена, али и немогућности снимања спектра далеких галаксија, фотометријска метода одређивања црвеног помака биће доминантна, и уносиће додатне несигурности приликом проучавања ових система. Више о овоме биће речено у поглављу 4.7.

Објекти на великом црвеном помаку су објекти које посматрамо у њиховој далекој прошлости, те представљају јединствен прозор у рану епоху еволуције свемира. Претпоставимо да је Универзум раван, у коме Хаблова константа има вредност $H_0 = 66.93 \pm 0.62 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Planck Collaboration et al., 2016), то јест да је старост Универзума максимално $t_0 = 14 \times 10^9$ година. У том случају би црвени помак $z = 1$ значио да гледамо $t \sim 7 \times 10^9$ година у прошлости, док би црвени помак $z = 3$ значио да посматрамо $t \sim 11 \times 10^9$ година у прошлости.

У астрофизици на далеким црвеним помацима је веома битно дефинисати растојање које се узима у разматрање из разлога јер се свемир шири. Једно од основних растојања које користимо је такозвано **покретно растојање** (енг. *comoving distance*). У космологији, покретно растојање повезано је са **правим растојањем** између објеката. Право растојање између обајеката зависиће од епохе у којој га посматрамо и мењаће се током времена због ширења Универзума. Право растојање је оно растојање на ком би се дати објекат налазио у

тачно дефинисаном времену када га посматрамо. Покретно растојање, између два објекта у Универзуму је растојање између њих које остаје константно кроз посматрану епоху, ако се они крећу по Хабловом закону, односно неће се мењати услед ширења свемира. Другим речима покретно растојање је тачно оно растојање између два објекта у тренутку када га ми меримо подељено са фактором скалирања, односно то је право растојање између два објекта помножено фактором $(1 + z)$. Укупно покретно растојање χ добијамо интегралом инфинитезималних покретних растојања од црвеног помака $z = 0$ све до објекта који посматрамо и може се представити једначином:

$$\chi = \int_{t_e}^{t_0} c \times \frac{dt}{a(t)}, \quad (1.4)$$

где је t_e време у ком је објекат емитовао светлост коју посматрач детектује, t_0 је време у коме се светлост детектује, док је c брзина светлости.

Једно од често коришћених растојања која се углавном користе у локалном Универзуму јесте **угловно растојање** (D_A), које представља однос физичке величине посматраног објекта и угловне величине објекта у радијанима. На пример на црвеном помаку $z = 1$ угловно растојање од 1 лучне секунде одговара физичком растојању од 5 крс.

За сам крај битно је поменути и такозвану **луминозну удаљеност** (D_L), која зависи од болометријског флукса (укупног интегралног флукса по свим таласним дужинама) S и болометријске луминозности L као:

$$D_L \equiv \sqrt{\frac{L}{4\pi S}}. \quad (1.5)$$

Међутим, у астрономији, поготово када радимо са објектима на великим црвеним помацима, често уместо укупног флукса имамо диференцијални флукс S_ν и луминозност L_ν на тачно одређеној мереној фреквенцији ν (односно таласној дужини). У овим случајевима мора се увести такозвана k -корекција за флукс и луминозност, из разлога што посматрани удаљени објекат емитује дати флукс на различитој фреквенцији од оне коју ми меримо. Веза између диференцијалног флукса и диференцијалне луминозности је следећа:

$$S_\nu = (1 + z) \frac{L_{(1+z)\nu}}{4\pi D_L^2}, \quad (1.6)$$

где нам фактор $1 + z$ представља k -корекцију која ће нам диференцијални флуks (или луминозност) дати на емитованој таласној дужини (односно фреквенцији) која је у односу на мерену померена ка плављем делу спектра због удаљености.

1.2 Потрага за далеким галаксијама

Иако галаксије на великим црвеним помацима генерално имају веће вредности апсолутне луминозности од локалних галаксија, због њихове велике удаљености, посматрачу се углавном чине као објекти слабог сјаја. Међутим, и када користимо дубоке прегледе неба¹, веома мали број објеката слабог сјаја заиста представља галаксије на великим црвеним помацима. Ово је последица тога што галаксије генерално имају велике опсеге апсолутне луминозности у Универзуму, а притом су галаксије мање луминозности много заступљеније од великих луминозних галаксија (Bouwens et al., 2021). То значи да ће дубоки прегледи неба бити у великој мери презасићени објектима слабог сјаја из локалног Универзума, док ће број луминозних удаљених галаксија у поређењу са њима бити веома мали, што ће их уједно чинити веома захтевним за детектовање.

Критеријуме за детектовање галаксија на великим црвеним помацима, даће нам теоријска предвиђања механизма који доводе до формирања сфероидних (елиптичних) галаксија и дисколикних (спиралних) галаксија. Елиптичне галаксије садрже најстарије звезде у Универзуму, и код ових галаксија не постоји индикација значајне тренутне активности по питању формирања нових звезда. Ове чињенице указују нам на то да су елиптичне галаксије одавно прошле фазу рапидног формирања звезда, у веома раним епохама формирања Универзума, за кратко време (Crocker et al., 2011). Ова епоха данас је у космологији позната као епоха формирања галаксија. То би значило да је галаксија прошла фазу са огромном стопом формирања звезда ($\sim 10^3 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$), и овакве галаксије називамо звездородним галаксијама (енг. *Starburst galaxies*, Elbaz et al. 2018). Када галаксија пролази кроз ову фазу, интензивно емитује UV зрачење, и додатно показује јаку емисиону линију на таласној дужини од $\lambda_{\alpha} = 1216\text{\AA}$, познату као Лајман алфа линија во-

¹Дубоки прегледи неба означавају дуготрајна посматрања једног региона на небу у циљу детектовања објеката слабог сјаја. Што је посматрање „дубље”, односно што је дуже време експозиције, могуће је посматрати објекте све слабијег сјаја.

доника (*Lyman- α*). Ова линија настаје рекомбинацијом водоникових атома (преласком електрона са првог на основни ниво), односно гаса који је веома заступљен у раном Универзуму у галаксијама у којима се формирају звезде, а који се јонизује овим јаким UV зрачењем младих масивних звезда (Latif et al., 2011).

Са друге стране, семи-аналитички модели са почетка овог века (Khochfar and Burkert, 2003) и скорашње хидродинамичке симулације (Schaye et al., 2015; Pillepich et al., 2018) предвиђају формирање елиптичних галаксија кроз сударе масивних сфероидних галаксија. Како бисмо што боље разумели како настају велике масивне галаксије које видимо у локалном свемиру, битно је испитати и које су галаксије преци ових масивних галаксија. Теорија предвиђа да су ови објекти заправо далеке прашинасте галаксије назване субмилиметарским галаксијама (Hopkins et al., 2009; González et al., 2011). О физичким карактеристикама ових галаксија причаћемо у наредном поглављу. Као последица судара, доћи ће до прилива гаса и прашине, те и до формирања звезда у новонасталој елиптичној галаксији (Martin et al., 2017). Ови модели нам говоре о хијерархијском настанку и еволуцији елиптичних галаксија. Међутим, упркос огромној количини рада и на теоријској и на посматрачкој страни, дебата о две конкурентске теорије за формирање елиптичних галаксија и даље остаје отворена. У скорије време, као алат за праћење стопе формирања звезда код елиптичних галаксија коришћене су и супернове колапсирајућих звезда, која подржавају хипотезу хијерархијског настанка елиптичних галаксија (Sedgwick et al., 2021), и оваква истраживања ће се наставити са коришћењем инструмената нове генерације. Међутим на великим црвеним помацима не постоји могућност одређивања броја судара галаксија коришћењем посматрачких карактеристика галаксија, већ се оваква истраживања углавном заснивају на симулацијама (Bertone and Conselice, 2009; Bell et al., 2017; Ventou, 2018; Pearson et al., 2019). Из овог разлога веома је битно пронаћи алат за праћење стопе судара галаксија на различитим црвеним помацима.

Што се тиче процене старости звезда у спиралним галаксијама, стопа рађања звезда достиже максимум на црвеним помацима између $2 < z < 4$ (Robertson et al., 2010). UV део спектра ових галаксија умерен је као оптичком и блиском инфрацрвеном делу и може се детектовати телескопима на Земљи. На пример, Лајман алфа линија спиралне галаксије која се налази на црвеном помаку $z = 3.5$ детектује се на таласној дужини од $\lambda_{\text{obs}}(1 + z)\lambda_{\alpha} \sim 5500 \text{ \AA}$,

што је тачно на средини оптичког подручја (Dobbs, 2014).

Потрага за Лајман алфа емитерима на великим црвеним помацима започета је још раних 1980. година, када су традиционалне фото плоче за снимање заменили дигитални детектори такозвани CCD (енг. *Charged-Coupled Devices*) електронски уређаји, који су превазишли лимитирајућу сензитивност и потешкоће са калибрисањем фото плоча. Раних 1990. година, направљени су CCD детектори који су радили и у инфрацрвеном делу спектра, а своју популарност доживљавају крајем прошлог века када су уграђени у Хаблов свемирски телескоп (енг. *Hubble Space Telescope*²).

Веома занимљива чињеница је да предвиђен број Лајман алфа емитера у раном Универзуму није детектован, сем код пар бледих објеката (Ouchi et al., 2020). Ово је довело до потврде, до тада хипотетичких модела о настанку спиралних галаксија који се не заснивају на гравитационом колапсу. Ови модели предвиђају настанак спиралних галаксија кроз хијерархију судара мањих галаксија, тзв. прото галаксија. Ове мање галаксије су формиране гравитационим колапсом пре него што су се спојиле са другим малим галаксијама (Springel and Hernquist, 2005). Како су овакви објекти много мањи од данашњих спиралних галаксија, имали би ниже вредности апсолутне луминозности, што би их чинило веома захтевним за детектовање. Ово нам указује на то да је и у случају проучавања формирања и еволуције спиралних галаксија, веома битно да одредимо да ли је стопа судара мањих галаксија у далеком свемиру довољна за објашњавање броја масивних спиралних галаксија у локалном Универзуму, која још увек није одређена са потпуном сигурношћу.

Крајем прошлог века, захваљујући одличној сензитивности великих телескопа као што је Кек (енг. *Keck*³) телескоп са пречником од 10 m, успели смо да детектујемо Лајман алфа емитере на великим црвеним помацима (Hu et al., 1998; Khusanova et al., 2020). Када је детектован довољан број ових галаксија да се њихова заступљеност у свемиру може представити функцијом луминозности (Schechter, 1976; Cooray, 2005)) са довољном прецизношћу, постало је јасно да је број галаксија довољно луминозних на великом црвеном помаку, да могу да представљају претке данашњих спиралних галаксија, веома мали у односу на предвиђени број.

²hubblesite.org

³keckobservatory.org

Основни закључак до кога долазимо јесте да за разумевање раста великих структура морамо што боље проучити галаксије на великим црвеним помацима које представљају претке садашњих масивних галаксија. Као могуће кандидате, у овој докторској дисертацији проучићемо далеке прашинасте галаксије које ће детаљно бити описане у наредном поглављу. Са друге стране битно је проучити да ли је стопа судара далеких галаксија довољна за објашњење раста великих структура. Као што смо рекли, ово није тривијално одредити и потребан нам је нови алат за проучавање судара и интеракција на великим црвеним помацима. Као један од алата за проучавање удаљених галаксија користи се корелација између термалног инфрацрвеног зрачења и радио-зрачења галаксија. Ова корелација биће главни предмет истраживања ове докторске дисертације, а детаљно ће бити описана у поглављу 1.4. Судари галаксија могу драстично да утичу и на термално и на нетермално зрачење самих галаксија у интеракцији (Murphy et al., 2009; Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015)⁴, што може довести до одступања од поменуте корелације. У овом раду главни фокус истраживања биће посвећен утицају интеракција галаксија на њихово нетермално радио-зрачење, и какве нам то последице може оставити на промени поменуте корелације између инфрацрвеног и радио-зрачења код удаљених галаксија. Са друге стране, ако покажемо да судари могу да доведу до промене у корелацији, то значи да бисмо баш те промене могли да користимо за праћење броја судара кроз различите епохе формирања галаксија.

1.3 Субмилиметарске галаксије

Пре нешто више од две деценије SCUBA (енг. *Submillimeter Common User Bolometer Array*) инфрацрвена посматрања са Џејмс Кларк Максвел телескопа (енг. *James Clerk Maxwell Telescope*⁵), открила су неочекивану популацију нових објеката на великим црвеним помацима ($z > 2$), названим субмилиметарске (СМ) галаксије (Smail et al., 1997). СМ галаксије су далеке, прашином богате галаксије, које показују слаби сјај на скоро свим таласним дужинама осим у инфрацрвеном делу и у субмилиметарском делу спектра (на таласним дужинама од 0.3 до 1mm), те су по томе и добиле име. Ове галак-

⁴Референцу (Donevski and Prodanović, 2015) ћемо на даље у тексту означавати као D15.

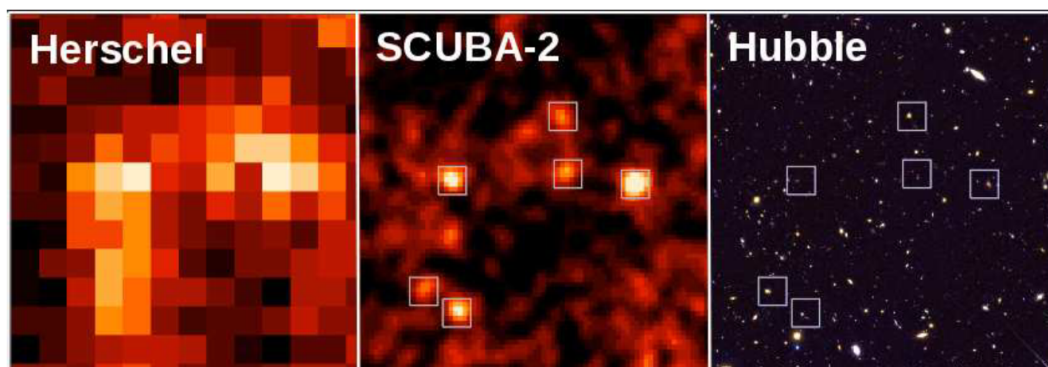
⁵www.eaobservatory.org/jcmt/about-jcmt/

сије показале су веома велике луминозности у инфрацрвеном делу спектра које се некада називају и ултрасјајне (енг. *Ultraluminous Infrared Galaxies* - *ULIRGs*) и хиперсјајне галаксије (енг. *Hyperluminous Infrared galaxies* - *HLIRG*), што је указивало на то да су то масивне и гасом богате галаксије које су тек у стадијуму формирања, или да су делови система у интеракцији. Пример 6 CM галаксија из SCUBA дубоког поља приказан је на слици 1.1 у милиметарском делу спектра (бела боја на средњој слици), у инфрацрвеном делу спектра снимљене Хершел (енг. *Herschel space telescope*⁶) свемирским телескопом (слика лево) и у оптичком делу на десној слици, снимљене Хабл свемирским телескопом. На слици можемо видети да се CM галаксије због своје велике луминозности у инфрацрвеном и субмилиметарском делу спектра јасно уочавају на сликама, док их је у оптичком делу спектра веома тешко детектовати. Ултрасјајне и хиперсјајне галаксије дефинишу се преко своје луминозности у инфрацрвеном делу спектра L_{IR} које се крећу у опсегу $10^{12}L_{\odot} \leq L_{\text{IR}} < 10^{13}L_{\odot}$ и $10^{13}L_{\odot} \leq L_{\text{IR}}$, респективно (Lonsdale et al., 2006). Овако екстремно луминозни инфрацрвени објекти имају велики значај на космолошким помацима $z > 1$, и могу бити заслужни за високе стопе формирања звезда у првој половини историје нашег Универзума (Blain et al., 2002; Ivison et al., 2010).

1.3.1 Спектрална енергетска расподела

У овом делу осврнућемо се на изглед спектралне енергетске расподеле (енг. *Spectral Energy Distribution* - СЕД) CM галаксија. Како смо рекли у претходном поглављу, овај тип галаксија је најлуминознији у инфрацрвеном и субмилиметарском делу спектра, па ћемо и у случају СЕД криве причати о овим таласним дужинама. Како су ово прашином богате галаксије, UV фотони које емитују звезде у галаксијама бивају апсорбовани на прабини која се загрева и затим реемитује термално зрачење у инфрацрвеном делу спектра које достиже максимум на таласним дужинама око $\lambda \sim 60 - 100 \mu\text{m}$ (Smolčić et al., 2015). Спектрална енергетска расподела CM галаксија у инфрацрвеном и субмилиметарском делу може се представити модификованом расподелом зрачења црног тела представљеног зеленом линијом на слици 1.2. На истој слици приказана је и СЕД крива локалне ултралуминозне галаксије - црна

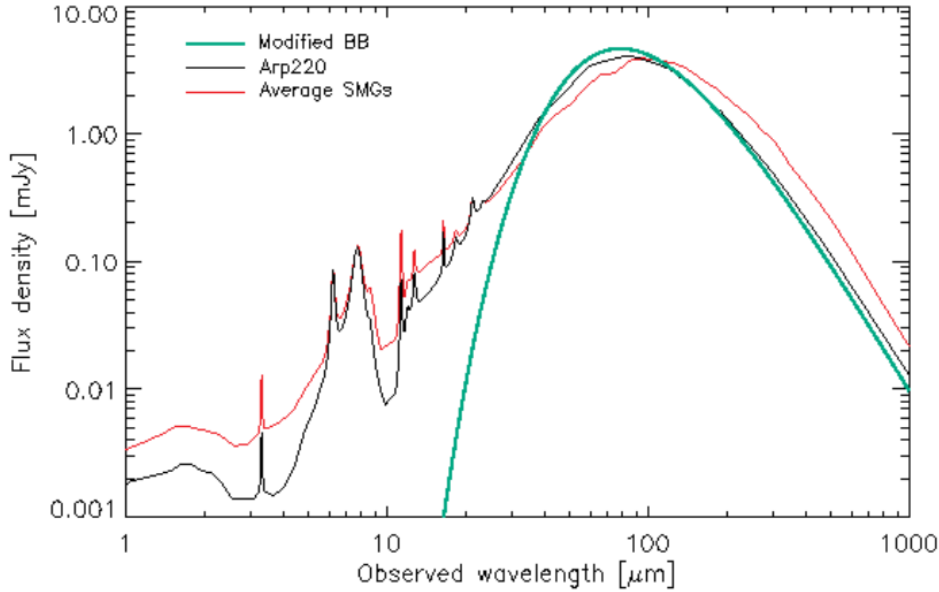
⁶herchel.caltech.edu



Слика 1.1: SCUBA дубоко поље на коме је јасно видљиво 6 СМ галаксија које у милиметарском делу спектра показују веома велике луминозности - бела боја на средњој слици. Ради поређења лево је приказана слика истих СМ галаксија у инфрацрвеном делу снимљене Хершел свемирским телескопом, на којој се види да ове галаксије интензивно зраче и у инфрацрвеном делу спектра. На десној слици приказане су позиције у оптичком делу спектра снимљене Хабл свемирским телескопом. Галаксије су уоквирене на свим сликама ради лакшег поређења, јер је у оптичком делу веома тешко раздвојити СМ галаксије због њихове слабе луминозности. Слика преузета из рада Демпси са сарадницима, 2012, (Dempsey J.T. et al., 2012).

линија (Vega et al., 2009), и средња спектрална енергетска расподела СМ галаксије добијена теоријским путем - црвена боја (Michałowski et al., 2010).

На слици 1.3 приказана је ради поређења СЕД крива у инфрацрвеном делу спектра код нормалне спиралне галаксије - црном линијом, као суперпозиција термалног зрачења прашине у облацима у којима се тренутно рађају звезде - зелена крива, и термалног зрачења дифузно распоређене међузвездане прашине - црвена крива (da Cunha et al., 2008). Када упоредимо слике 1.2 и 1.3 можемо видети да на мањим таласним дужинама, код нормалних спиралних галаксија долази до појаве јаких емисионих линија које углавном потичу од ПАХ (енг. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*) једињења, док су код СМ галаксија ове емисионе линије доста слабије. Овако јаке емисионе линије се углавном користе приликом одређивања спектроскопског црвеног помака код галаксија, што нам указује на потешкоће у одређивању спектроскопског црвеног помака код СМ галаксија у недостатку јасних спектралних карактеристика.



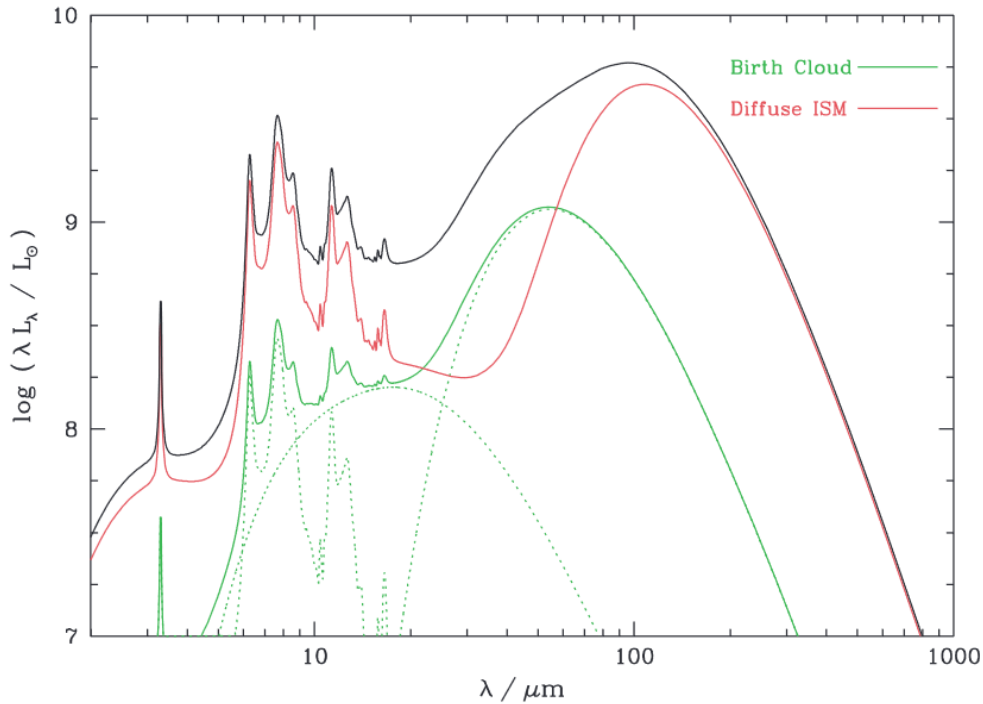
Слика 1.2: Приказ криве спектралне енергетске расподеле за СМ галаксију добијена теоријским путем - црвена боја. Поред ње је црном бојом приказана иста расподела локалне ултралуминозне галаксије - црном бојом (Vega et al., 2009). Зелена боја приказује зрачење модификованог црног тела. Слика преузета из рада Мишаловски са сарадницима, 2010, (Michałowski et al., 2010).

1.3.2 Маса субмилиметарских галаксија и стопа формирања звезда

Уочени тренд слабе луминозности СМ галаксија у X-подручју указује на то да њихова луминозност потиче искључиво од процеса формирања звезда, односно од високе стопе формирања звезда (енг. *Star Formation Rate - SFR*), која код ових система може да достигне и вредност $> 1000 M_{\odot}/\text{yr}$ (Blain et al., 2002). Стопа формирања звезда код СМ галаксија може се израчунати из луминозности у инфрацрвеном делу спектра (L_{IR}), ако се претпостави да она потиче искључиво од реемитованог зрачења прашине загрејане UV зрачењем звезда. Још крајем прошлог века постављена је релација (Kennicutt, 1998) која повезује стопу формирања звезда и луминозност у инфрацрвеном подручју спектра, у облику:

$$\text{SFR}[M_{\odot}\text{yr}^{-1}] = 4.5 \times 10^{-44} L_{\text{IR}}[\text{ergs}^{-1}] = 1.7 \times 10^{-10} L_{\text{IR}}[L_{\odot}]. \quad (1.7)$$

Показало се да је удео СМ галаксија у густини стопе формирања звезда



Слика 1.3: Приказ спектралне енергетске расподеле код нормалне спиралне галаксије у инфрацрвеном делу спектра добијене сумирањем црвене и зелене линије - црна линија. Зелена линија представља допринос термалном зрачењу од прашине која се налази у облацима у којима се рађају звезде док црвена крива представља допринос емисије дифузно распоређене међузвездане прашине. Слика преузета из рада Чана са сарадницима, 2008, (da Cunha et al., 2008).

у Универзуму веома велики. На црвеним помацима $1 < z < 2$ удео ових галаксија у густини стопе формирања звезда износи $\geq 20\%$, док на црвеним помацима $2 < z < 3$ овај удео достиже чак и $\sim 50\%$ (Casey et al., 2013). За проучавање стопе формирања звезда веома је битно да са што већом сигурношћу одредимо луминозности у инфрацрвеном делу спектра ових галаксија. Ова луминозност мери се помоћу свемирских телескопа будући да наша атмосфера углавном не пропушта инфрацрвено зрачење и мерене вредности углавном имају значајне инструменталне грешке. Радио-посматрања су много прецизнија и у последње време се све више разматрају приликом израчунавања стопе формирања звезда (Bell, 2003; Murphy, 2013; Wang, 2019). Међутим, овакве анализе захтевају јасну и тачну везу између радио и инфрацрвеног зрачења код галаксија у којима имамо појачано формирање звезда. Ако дође

до одступања у овој зависности, на пример као последица судара галаксија, онда нам радио-зрачење не може бити корисно за праћење стопе формирања звезда код интерагујућих система. Зато морамо што боље испитати како се инфрацрвено и радио-зрачење мењају код галаксија у интеракцији на великим црвеним помацима.

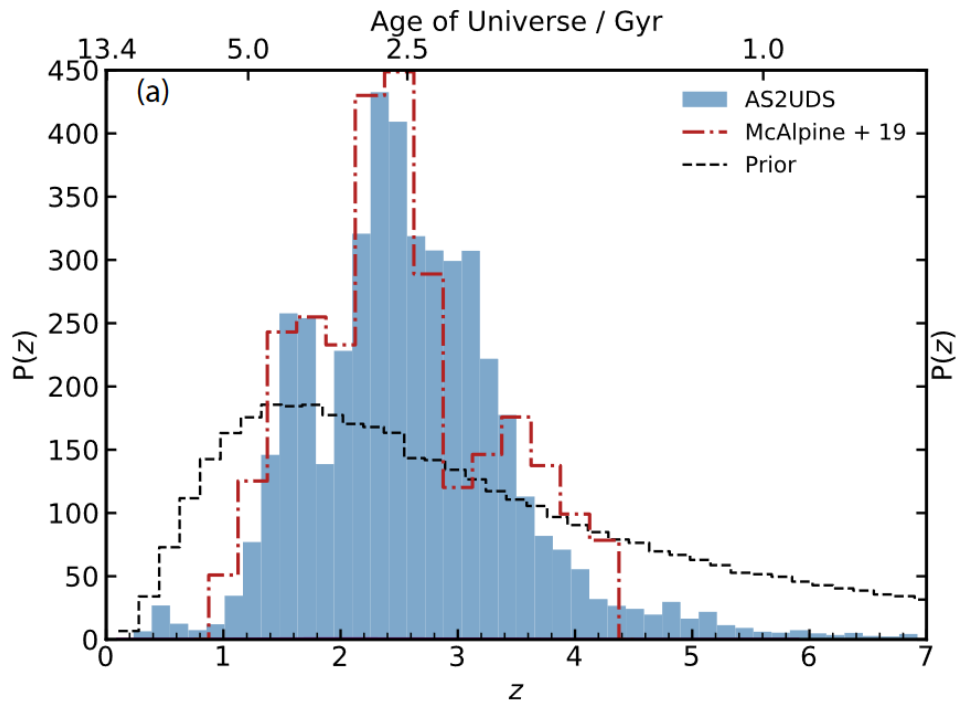
Поред високе стопе формирања звезда код СМ галаксија, оне поседују и веома високе вредности масе прашине M_d . Средња вредност масе прашине код СМ галаксија износи око $M_d = 5.6 \pm 1.0 \times 10^8 M_\odot$ (da Cunha et al., 2015), док маса гаса у овим галаксијама достиже вредности $M_{\text{gas}} = 5.3 \pm 1.0 \times 10^{10} M_\odot$ (Bothwell et al., 2013). Проучавања металичности СМ галаксија показују да се у овим галаксијама налази и високи проценат звездане масе ($\sim 10^{11} M_\odot$) (da Cunha et al., 2015). Овако високе вредности стопе формирања звезда и звездане масе сврставају СМ објекте у веома масивне галаксије на црвеним помацима $z \sim 2 - 3$, у којима се брзо и ефикасно формирање звезда вероватно подстиче сударима и блиским пролазима са другим галаксијама (Blain et al., 2002), што нам опет указује на потребу да се интеракције ових галаксија морају што боље проучити, како бисмо могли на сигуран начин да проучавамо и физичка својства самих галаксија.

1.3.3 Расподела по црвеном помаку

Разумевање физичких процеса који се дешавају у СМ галаксијама је отежано највише због њиховог слабог сјаја на краћим таласним дужинама. Фотометријска истраживања показују да је средњи црвени помак СМ галаксија између $z \sim 2.5 - 3$, што се поклапа са проценом средњег црвеног помака израчунатом на узорку мање популације галаксија које су биле доступне оптичкој спектроскопији, који износи $z \sim 2.2$ (Simpson et al., 2014). Међутим, и поред свих напора, расподела СМ галаксија по црвеним помацима, није одређена са сигурношћу, пре свега због немогућности одређивања спектроскопског црвеног помака за све објекте и због непоузданости фотометријске анализе, поготово када говоримо о галаксијама у којима се активно формирају звезде. Нормалне галаксије у својој спектралној енергетској расподели показују значајне карактеристике (емисионе и апсорпционе линије) на таласним дужинама у субмилиметарском и инфрацрвеном делу спектра, као што можемо видети на слици 1.3, док је спектрална расподела код СМ галаксија много глађа и тешко је уочити специфичне карактеристике на овим таласним

дужинама (Quadri and Williams, 2010), видети слику 1.2.

Резултати скоријег рада Дадзевичи са сарадницима, 2020, (Dudzevičiūtė et al., 2020) где је анализирано 707 СМ галаксија детектованих ALMA телескопом (енг. *The Atacama Large Millimeter Array*⁷) показали су да како се у узорку галаксија повећава број објеката којима је црвени помак одређен фотометријском методом коришћењем спектралне енергетске расподеле, расподела СМ галаксија по црвеном помаку постаје шира (на слици 1.4 видимо реп ка већим црвеним помацама), а вредност фотометријског црвеног помака постаје несигурнија. Расподела СМ галаксија из овог узорка по црвеном помаку приказана је на слици 1.4 плавим хистограмима, а средња вредност црвеног помака је $z = 2.61 \pm 0.08$. На истој слици црвеном испрекиданом линијом је приказана и теоријска расподела СМ галаксија по црвеним помацама добијена из симулација (McAlpine et al., 2019).



Слика 1.4: Расподела СМ галаксија по црвеном помаку одређена на узорку од 707 галаксија посматраних ALMA телескопом - плавим хистограмима (Dudzevičiūtė et al., 2020). Црвена испрекидана линија представља теоријску расподелу СМ галаксија по црвеном помаку из рада Мек Алпајн са сарадницима, 2019, (McAlpine et al., 2019).

⁷almaobservatory.org

1.3.4 Значај субмилиметарских галаксија

Како бисмо што боље разумели еволуцију галаксија и историју формирања звезда кроз различите епохе на различитим црвеним помацима морамо истражити фазу СМ галаксија у еволуцији галаксија, као и њихове потомке. У овом контексту кључно је разматрати везу између СМ галаксија и других типова галаксија. Једна класа објеката, најближа СМ галаксијама су галаксије са активним галактичким језгром - АГЈ (енг. *Active Galactic Nuclei*). Ове галаксије показале су сличне карактеристике по питању интензитета нетермалног радио-зрачења са СМ галаксијама што је пронађено у раду Делхеиз са сарадницима, 2017, (Delhaize et al., 2017)⁸, а са друге стране њихова расподела по црвеним помацима се добро поклапа са расподелом СМ галаксија (Vito et al., 2018), што указује на то да су ова два типа галаксија повезана еволуционо. Највећа разлика између ових објеката јесте у природи њиховог зрачења које код СМ галаксија највећим делом потиче од процеса формирања звезда, док код АГЈ израчена енергија углавном води порекло од акреције материје у црну рупу (Gebhardt et al., 2000; Ferrarese, 2002; Gültekin et al., 2009). Са друге стране, проучавање временских скала трајања фазе АГЈ нам даје величине од око 40 Муг (Schawinski et al., 2015) док је за фазу СМ галаксија процењено време од око 200 – 400 Муг (Simpson et al., 2012), што указује на могућност да су активне галаксије потомци СМ галаксија. Још једна могућност јесте да постоји поткласа СМ галаксија која еволуира временом у активну галаксију (Charman et al., 2005).

Тренутна општа слика еволуције галаксије јесте да су СМ галаксије преци масивних елиптичних галаксија у локалном Универзуму. Масивне, гасом богате галаксије на великим црвеним помацима пролазе кроз више судара са другим галаксијама који покрећу фазе формирања звезда, повећавају своју масу и на крају постају црвеније и прелазе у масивне елиптичне галаксије (Hopkins et al., 2009; González et al., 2011). Са друге стране, сличност у површинској густини звездане масе СМ галаксија и масивних компактних галаксија у локалном Универзуму наводи на то да су СМ галаксије преци масивних елиптичних галаксија које видимо данас (Ricciardelli et al., 2010). Како смо већ раније нагласили, број судара и интеракција на великим црвеним помацима није лако одредити. Тренутно се овај број рачуна помоћу симулација (Bertone and Conselice, 2009; Rodriguez-Gomez et al., 2015; Bell

⁸Референцу на даље позивамо са D17

et al., 2017; Ventou, 2018; Pearson et al., 2019; Ferreira et al., 2020), али не постоји ниједан физички параметар који можемо да меримо а који ће нам дати ове информације.

За боље разумевање позиције СМ галаксија у хијерархији раста великих структура и формирање масивних галаксија акрецијом гаса и сударом са мањим галаксијама, потребно је што боље изучити посматрачке карактеристике као што је расподела њихових црвених помака која представља један од највећих проблема приликом проучавања ових галаксија у недостатку спектроскопске анализе (McAlpine et al., 2019). Са друге стране одређивање њихове просторне густине подложно је преклапању са другим објектима (Miller et al., 2015) највише због лоше резолуције телескопа који су посматрали СМ галаксије до сада, а нова нада биће свакако нови инструменти. Сличност у природи радио-зрачења ових објеката са АГЈ представља веома велику препреку за препознавање СМ галаксија и њихово раздвајање (Hogan et al., 2015), и оваква истраживања се тренутно заснивају на детекцији зрачења у X-подручју спектра јер СМ галаксије имају веома малу луминозност на овим таласним дужинама (Smolčić et al., 2017a) за разлику од активних галаксија. Овако екстремни објекти као што су СМ галаксије могу нам послужити за праћење еволуције масивних галаксија са укупном масом од $\sim 10^{11} M_{\odot}$ (González et al., 2011), како на великом црвеном помаку, тако и за брзи раст масивних елиптичних галаксија које су ближе нама. Инфрацрвена спектроскопија, и посматрања на оптичким и радио таласним дужинама могу да играју кључну улогу у разумевању природе ових прашинастих СМ галаксија и могу бити добар алат за проучавање најранијих и најдраматичнијих стадијума еволуције галаксија (Ricciardelli et al., 2010).

1.4 Далека инфрацрвена - радио корелација

Још 1980. године је уочено да постоји јасна линеарна зависност између густине флукса далеког инфрацрвеног зрачења ($42 \mu\text{m} - 122 \mu\text{m}$) и густине флукса радио-зрачења на 1.4 GHz. Ова зависност названа је далека инфрацрвена - радио корелација - ДИР корелација (енг. *Far Infrared - Radio (FIR) correlation* van der Kruit 1971; Helou et al. 1985; Condon et al. 1991; Yun et al. 2001; Bell 2003; Sargent et al. 2010; Delhaize et al. 2017; Gürkan et al. 2018;

Molnár et al. 2018; Algera et al. 2020; Delvecchio et al. 2021⁹). У неким случајевима се уместо густине флукса у далеком инфрацрвеном делу спектра користи луминозност у целом опсегу инфрацрвеног зрачења (од 8 – 1000 μm) такозвана тотална луминозност, и у овим сличајевима ћемо корелацију називати тотална инфрацрвена радио - ТИР корелација. На слици 1.5 приказана је прва детекција ДИР корелације на посматрачком узорку спиралних галаксија у Virgo јату (Helou et al., 1985).

ДИР корелација се дефинише преко параметра корелације q_{FIR} , који представља однос густине флукса далеког инфрацрвеног зрачења и густине флукса радио-зрачења као:

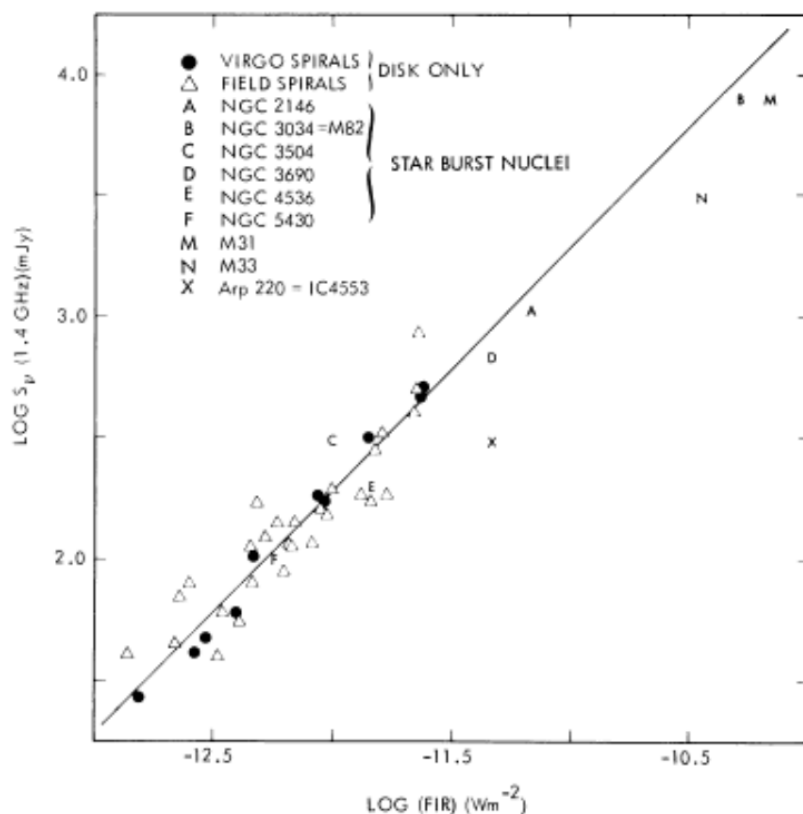
$$q_{\text{FIR}} = \log \left(\frac{\text{FIR}}{3.75 \times 10^{12} \text{Wm}^{-2}} \right) - \log \left(\frac{S_{1.4\text{GHz}}}{\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}} \right), \quad (1.8)$$

где нам FIR представља густину флукса инфрацрвеног зрачења у опсегу од 42 μm до 122 μm . $S_{1.4\text{GHz}}$ је густина флукса радио-зрачења на 1.4 GHz (Helou et al., 1985). Константа 3.75×10^{12} је уведена из димензионих разлога и представља средњу фреквенцију инфрацрвеног зрачења (на 80 μm).

Ова корелација се користи као моћно средство за проучавање многих астрофизичких проблема. Инфрацрвено зрачење је зрачење термалне природе, и доминантно потиче од прашине загрејане UV зрачењем младих звезда. Са друге стране, радио-зрачење које посматрамо је нетермално зрачење, где је доминантно зрачење електрона космичког зрачења убрзаних у остацима супернових (Condon et al., 1991). Како обе компоненте, и инфрацрвено и радио-зрачење, воде порекло од масивних звезда, јасно је да се корелација може користити приликом проучавања процеса формирања звезда. У локалном делу свемира, корелација се користи да би се емпиријски калибрисала радио - луминозност као индикатор стопе формирања звезда, под претпоставком да нетермално радио-зрачење потиче искључиво од остатака супернових (Condon, 1992; Bell, 2003; Murphy, 2013; Wang et al., 2019). Методе које се сада користе за праћење стопе формирања звезда, као што су $\text{H}\alpha$ емисија или UV зрачење, трпе апсорпцију на прашини чију корекцију је тешко одредити, те због тога дају веома несигурне резултате. Некада се у ову сврху користи и зрачење у средњем инфрацрвеном делу спектра (8 μm – 42 μm), које није подложно апсорпцији, али за сада подразумева посматрање из све-

⁹Референце (Yun et al., 2001), (Molnár et al., 2018) и (Delvecchio et al., 2021) ћемо на даље у тексту означавати као Y01, M18 и D21, респективно.

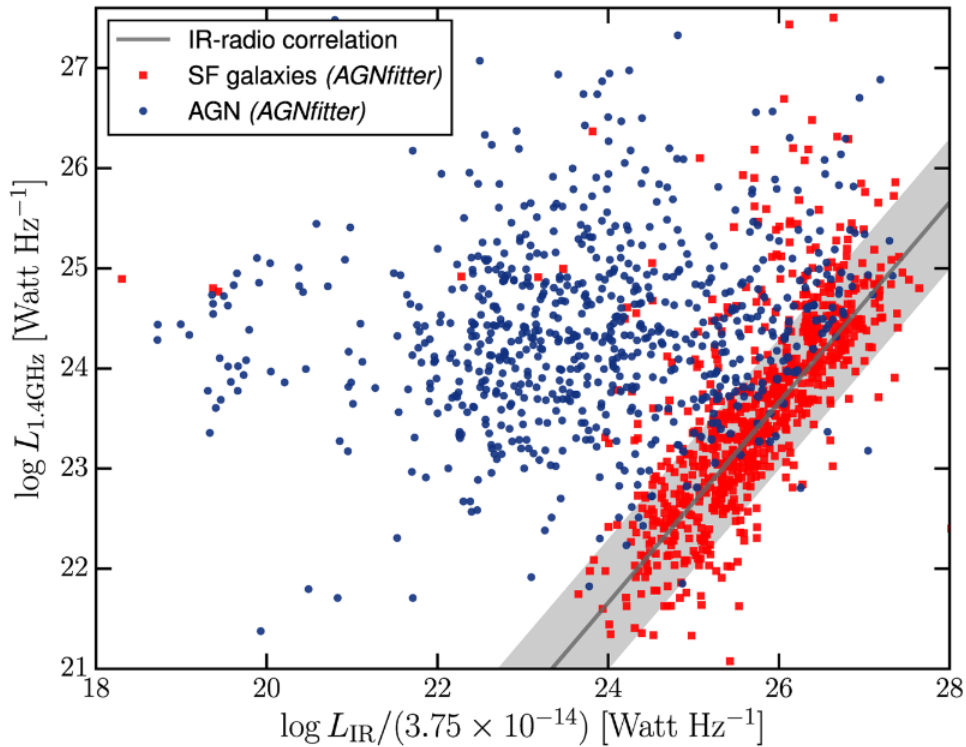
мира помоћу свемирских телескопа као што су Спитцер (енг. *Spitzer*¹⁰) и Хершел телескопи, што аутоматски значи мању угловну резолуцију у односу на телескопе на Земљи. радио-зрачење заобилази оба поменута проблема: посматрања се врши са Земље помоћу радио-интерферометра што даје добру угловну резолуцију, а такође није подложно апсорпцији од стране прашине, те је јасно зашто може да представља веома добар алат за праћење стопе формирања звезда у далеким галаксијама. Међутим у случају да постоје физички процеси који утичу на радио-зрачење, као што су галактичке интеракције или присуство АГЈ у центру галаксије, код којих очекујемо појачано синхротронско радио-зрачење, коришћење радио-зрачења за праћење процеса формирања звезда губи на поузданости и значају.



Слика 1.5: Зависност између густине флуksа нетермалног радио-зрачења на 1.4GHz од густине флуksа далеког инфрацрвеног зрачења названа далека инфрацрвена - радио ДИР корелација, први пут детектована посматрањем спиралних галаксија у Virgo галактичком јату. Слика преузета из рада Хелоу са сарадницима, 1985, (Helou et al., 1985).

¹⁰spitzer.caltech.edu

Са друге стране, ова корелација може да нам помогне при детекцији галаксија са активним галактичким језгром, које показују већу густину флукса у радио-подручју у односу на инфрацрвени (Donley et al., 2005; Norris et al., 2006; Park et al., 2008; Del Moro et al., 2013; Calistro Rivera et al., 2017). На слици 1.6 приказана је ДИР корелација (пуна сива линија) на узорку од 758 галаксија у којима се активно формирају звезде (црвени квадрати) и 784 галаксија које садрже АГЈ (плави кругови), преузетих из LOFAR¹¹ (енг. *Low Frequency Array*) прегледа неба (Calistro Rivera et al., 2017). Са слике се јасно уочава да галаксије са АГЈ не прате линеарну ДИР корелацију док се све галаксије код којих зрачење потиче од процеса формирања звезда налазе у оквиру корелације.



Слика 1.6: Приказ одступања галаксија са АГЈ (плави кругови) од ДИР корелације (сива линија). Црвени квадрати представљају галаксије у којима се активно формирају звезде. Узорци су преузети из LOFAR прегледа неба. Слика преузета из рада Калистро Ривера са сарадницима, 2017, (Calistro Rivera et al., 2017).

¹¹<https://lofar-surveys.org/>

ДИР корелација је нашла употребу и у одређивању удаљености до галаксија на великим црвеним помацима $z > 1$ (Condon, 1992; Bell, 2003; Murphy et al., 2012) користећи спектрални индекс $\alpha_{1.4}^{350}$ између 1.4 и 350 GHz. Спектрални индекс α дефинишемо на основу промене густине флукса на више посматраних фреквенција S_ν као $S_\nu \propto \nu^\alpha$. Посматрани флукс радио-зрачења на одређеној фреквенцији повезан је са стопом формирања звезда (SFR) (Condon, 1992) као:

$$S_\nu = 4 \times 10^{28} \left[\frac{(1+z)^{1+\alpha_\nu}}{4\pi D_L^2} \right] \left[\frac{\nu}{1.4 \text{ GHz}} \right]^{\alpha_\nu} \times \text{SFR} [\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}], \quad (1.9)$$

где је D_L луминозно растојање до галаксије у см. У истом раду испитана је и зависност густине флукса у субмилиметарском подручју (на 350 GHz, односно $\sim 850 \mu\text{m}$) S_{sub} са стопом формирања звезда, када се спектар галаксије у којој се формирају звезде апроксимира спектром оближње галаксије M82 као:

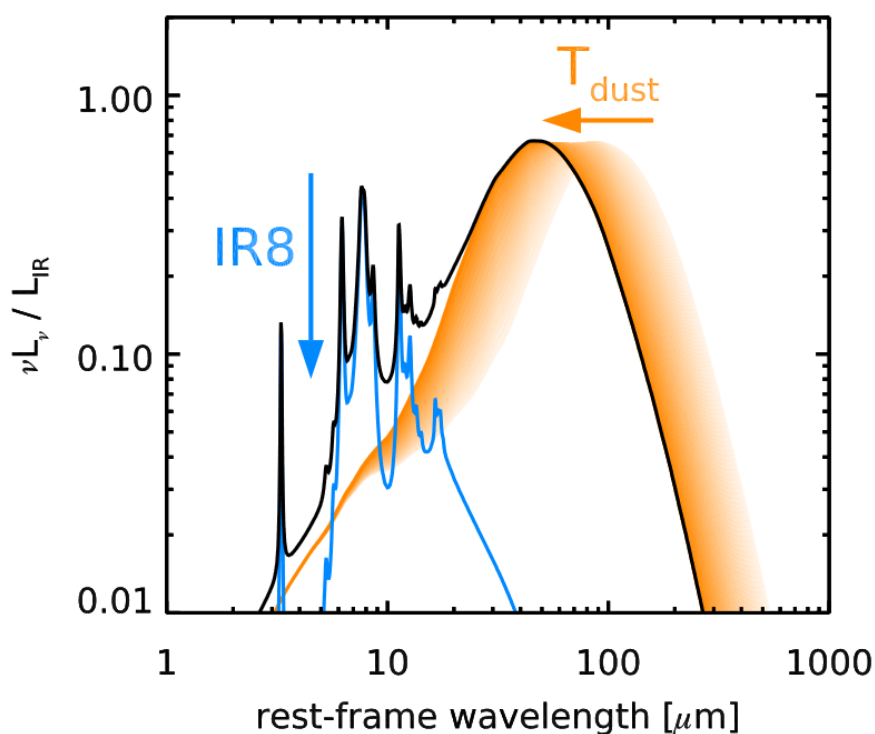
$$S_{\text{sub}} = 1 \times 10^{28} \left[\frac{(1+z)^{1+\alpha_{\text{sub}}}}{4\pi D_L^2} \right] \left[\frac{\nu}{350 \text{ GHz}} \right]^{\alpha_{\text{sub}}} \times \text{SFR} [\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}]. \quad (1.10)$$

Дељењем претходне две једначине долазимо до зависности између спектралног индекса између субмилиметарског и радио дела спектра, за који се подразумева да има константну вредност, од црвеног помака као:

$$\alpha_{1.4}^{350} = -0.24 - [0.42 \times (\alpha_\nu - \alpha_{\text{sub}}) \times \log(1+z)]. \quad (1.11)$$

Једна од веома битних примена ДИР корелације јесте у одређивању температуре прашине (T_{dust}) луминозних звездородних галаксија. Као што смо рекли у поглављу 1.3.1 СЕД крива СМ галаксија у средњем инфрацрвеном делу спектра може се апроксимирати зрачењем црног тела. Ова апроксимација долази из разлога што термално зрачење у овом делу спектра долази примарно од реемитоване енергије са загрејане прашине. Прашина у СМ галаксијама углавном садржи велика зрна, чије зрачење је веома слично зрачењу црног тела (Jones et al., 2013). То значи да максимум зрачења у инфрацрвеном делу спектра (посебно у далеком инфрацрвеном делу) можемо аутоматски повезати са температуром прашине код СМ галаксија као што можемо видети на слици 1.7 (Smith et al., 2014; Schreiber et al., 2018). На овој слици

илустрована је СЕД крива у инфрацрвеном делу спектра за прашинасте галаксије, чије термално зрачење потиче од великих зрна прашине загрејаних UV зрачењем младих звезда - наранџасти део криве. На мањим таласним дужинама долази до појаве слабих емисионих и апсорпционих линија ПАХ једињења састављених од угљеника и водоника - плава линија. Црна линија представља коначну СЕД криву која садржи утицај свих компоненти зрачења у инфрацрвеном делу спектра. Са слике можемо видети да како максимум криве заузима место на краћим таласним дужинама, тако температура прашине код СМ галаксија опада (Schreiber et al., 2018).



Слика 1.7: Илустрација СЕД криве СМ галаксија у инфрацрвеном делу спектра - црна линија. Наранџасти део представља термално зрачење великих зрна прашине, апроксимирано зрачењем црног тела. Удео зрачењу у инфрацрвеном делу на мањим таласним дужинама које долази од ПАХ једињења представљено је плавом линијом. Слика преузета из рада Шрибер са сарадницима, 2018, (Schreiber et al., 2018).

1.4.1 Физички узрок појаве и значај корелације

Као што смо поменули, и инфрацрвено и радио-зрачење које посматрамо код ДИР корелације воде порекло од масивних звезда, те се сматра да је и узрок овако емпиријски дефинисане корелације, процес формирања масивних звезда. Масивне звезде ($M > 8M_{\odot}$) су један од главних извора загревања прашине путем UV зрачења, како локалне у Н II регионима, тако и дифузне међузвездане прашине. Овако загрејана прашина реемитује термално зрачење у далеком инфрацрвеном делу спектра. Ове масивне звезде су такође узрок емитовања радио-зрачење и то на два начина: масивне звезде емитују фотоне који јонизују средину и производе закочно зрачење, а са друге стране, када масивна звезда дође до краја свог живота, и експлодира у виду супернове, њен остатак у којем се јављају ударни таласи, убрзава електроне космичког зрачења, који у међузвезданом магнетном пољу емитују синхротронско радио-зрачење (Condon et al., 1991).

Иако је на први поглед веза између формирања звезда и радио-зрачења са једне стране и инфрацрвеног зрачења са друге стране линеарна, битно је нагласити да ови процеси нису директни, већ да морамо узети у разматрање многе друге физичке процесе који могу да утичу на обе компоненте зрачења. Главни параметар који морамо узети у обзир када посматрамо инфрацрвено зрачење, јесте непрозрачност средине. На пример, за разлику од патуљастих галаксија, које имају веома мало прашине, галаксије у којима се активно формирају звезде, имају веома дебео слој прашине, који ће у великој мери утицати на интензитет емитованог инфрацрвеног зрачења (Casey et al., 2014). Ово нам говори да ће се ДИР корелација разликовати у односу на тип галаксија које се посматрају. У овом раду, задржаћемо се на проучавању ове корелације код СМ галаксија и код галаксија у којима се активно формирају звезде.

Са друге стране, компонента радио-зрачења зависи од још комплекснијих процеса. У овом случају, морамо испитати двојну природу самог зрачења која настаје у потпуно различитим процесима: синхротронско зрачење које ће бити најзначајније у овој анализи, настаје зрачењем релативистичких електрона у магнетном пољу. Друга компонента је закочно зрачење термалних електрона у Н II регионима, коју морамо да одстранимо (D17). На фреквенцијама реда 1GHz, на којима ћемо и вршити истраживање, синхротронско зрачење је заступљеније. Процес настајања ове компоненте зрачења обухвата убрзавање

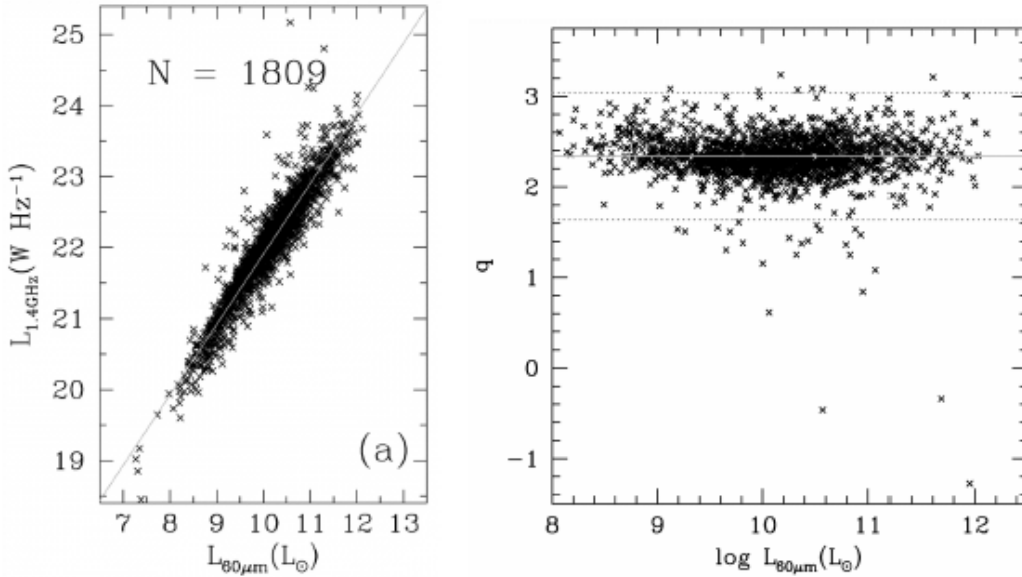
електрона у ударним таласима насталим у остацима супернових, који у међузвезданом магнетном пољу губе енергију и као резултат долази до емисије синхротронског радио-зрачења (Kotarba et al., 2010; Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015). Међутим, када су у питању звездорodne галаксије, које поседују огромне количине гаса, и које имају велику стопу формирања звезда, губљење енергије на адијабатске процесе као што је ширење врелог гаса који може да достигне брзине довољно велике да у виду ветра напусти галаксију (Romero et al., 2018), на закочно зрачење као и на јонизацију, постаје изражено (Elbaz et al., 2018). Физички параметри које морамо узети у обзир када посматрамо емисију синхротронског зрачења јесу и сама густина гаса у међузвезданој средини, и његове дифузне и конвекционе брзине, али и јачину магнетног поља кроз које се крећу убрзани електрони. Када се у обзир узму све ове комплексне зависности, веома је тешко разумети како је корелација између инфрацрвеног и радио-зрачења толико универзална, односно одржава се код свих галаксија у којима се формирају звезде, не зависи од стопе формирања звезда и не зависи од морфолошког типа галаксија у локалном свемиру, и постојана тј. показује веома мало одступање од линеарности у свим посматраним системима у локалном свемиру осим код галаксија са АГЈ.

Далека инфрацрвена - радио корелација пронашла је многе примене у проучавању удаљених галаксија (Murphy, 2013; Calistro Rivera et al., 2017; Schreiber et al., 2018; Wang, 2019). Само праћење процеса раста структура кроз сударе и блиске пролазе, у различитим епохама еволуције свемира умногоме зависи од тачности одређивања стопе формирања звезда у галаксијама. Међутим, исте интеракције које доводе до раста великих структура, утицаће и на нетермално зрачење које користимо као алат за проучавање далеких система. Из поменутог разлога веома је битно истражити како судари утичу на различите компоненте зрачења код галаксија.

1.4.2 ДИР корелација у локалном свемиру

Почетком овог века, ДИР корелација је испитана на различитим типовима галаксијама у локалном Универзуму ($z < 1$) и резултати су показали да не долази до одступања од параметра корелације код свих галаксија у којима се формирају звезде без обзира на њихову стопу формирања звезда или на њихов морфолошки тип (Yun et al., 2001). Изузеци код којих је дошло до девијације

од линеарности у корелацији представљале су галаксије у којима се космичко зрачење може убрзавати ван остатака супернових, као што су галаксије са активним галактичким језгром (D17) или галаксије у интеракцији (Donevski and Prodanović, 2015).



Слика 1.8: Пример ДИР корелације (Lisenfeld et al., 2015). Слика лево представља зависност радио луминозност на 1.4 GHz од инфрацрвене луминозности ($60 \mu\text{m}$). На слици десно приказана је расподела величине q_{FIR} у зависности од инфрацрвене луминозности на $60 \mu\text{m}$. Пуна линија представља средњу вредност параметра са својом стандардном девијацијом представљеном испрекиданом линијама. Слика преузета уз рада Јун са сарадницима, 2001, (Y01).

На слици 1.8 представљен је један пример ДИР корелације. На левом графику можемо видети зависност луминозности радио-зрачења на 1.4 GHz од инфрацрвене луминозности на $60 \mu\text{m}$ преузете из IRAS¹² базе података, за узорак од 1809 локалних галаксија преузетих из VLA¹³ (енг. *Very Large Array*) прегледа неба (Yun et al., 2001). Узорак углавном садржи нормалне спиралне галаксије (око 98%) и веома мали проценат галаксија са активним галактичким језгром ($\sim 1\%$). Битно је нагласити да на ниским луминозностима ситуација није баш најјаснија али су истраживања показала да се ДИР

¹²<https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/iras.html>

¹³<https://science.nrao.edu/science/surveys/vlass>

корелација одржава чак и код неких патуљастих галаксија (Schleicher and Beck, 2016). На графику десно је приказана зависност параметра корелације q_{FIR} , од луминозности у инфрацрвеном зрачења на $60 \mu\text{m}$ (пуна линија $q_{\text{FIR}} = 2.34$ (Y01)), са својом стандардном девијацијом $\delta = 0.26$, (две испрекидане линије). Галаксије које се налазе испод доње испрекидане линије, показују вишак радио-зрачења у односу на инфрацрвено и вероватно потичу од галаксија са активним галактичким језгром (Y01).

1.5 Циљеви и структура докторске дисертације

Циљ ове докторске дисертације јесте испитивање утицаја интеракција СМ галаксија на њихово нетермално радио-зрачење. Највећа пажња посветиће се далекој инфрацрвеној - радио корелацији у овим системама и одступању од корелације услед појачаног нетермалног радио-зрачења код галаксија у интеракцији. Основна хипотеза којом смо се водили јесте да су интеракције између галаксија заслужне за вишак синхротронског зрачења код ових галаксија које потиче од убрзавања наелектрисаних честица у ударним таласима који се јављају у мосту између галаксија приликом судара (Lisenfeld and Völk, 1993; Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015). У глави 2 биће детаљно описана најновија истраживања ДИР корелације код удаљених галаксија. Глава 3 садржаће опис проблема са којима смо се сусрели приликом наше анализе и начин на који смо их решили. У глави 4 биће описани подаци коришћени у тези као и целокупна анализа утицаја интеракција галаксија на ДИР корелацију одрађена у овом раду, анализа коришћених узорака и постављање параметрских модела. Глава 5 садржи резултате које смо добили, дискусију као и опис нашег будућег рада. У 6. глави дат је резиме и преглед главних закључака ове докторске дисертације.

Глава 2

ДИР корелација код субмилиметарских галаксија

Упркос многим истраживањима која указују да је ДИР корелација углавном линеарна са малим расејањем (van der Kruit, 1971; Helou et al., 1985; Condon et al., 1991; Lisenfeld et al., 2015), постоји неколико посматрања, како на великим тако и на малим црвеним помацима, која нису у сагласности са овом констатацијом (Delhaize et al., 2017; Molnár et al., 2018; Delvecchio et al., 2021). Посматрања галаксија која се налазе у богатим јатима показују да линеарна ДИР корелација у овим системима варира (Miller and Owen, 2001). У овом случају показано је да повећано радио-зрачење код галаксија које се налазе у јату не потиче од галаксија које имају АГЈ, већ да искључиво зависи од околине у којој се галаксије налазе (Miller and Owen, 2001). Ово је у сагласности са нашом хипотезом да интеракција између галаксија доводи до вишка синхростронског зрачења у односу на нормалне галаксије, јер су интеракције и судари у богатим галактичким јатима честа појава. Такође, посматрања далеких галаксија у којима се активно формирају звезде као и субмилиметарских галаксија указују на повећану радио-луминозност у односу на локалну ДИР корелацију (Donevski and Prodanović, 2015; Delhaize et al., 2017). Све ово нам говори да се ДИР корелација у неким системима, као што су галаксије у јатима или галаксије које имају АГЈ, не одржава. Разлог за овакав исход може да потиче од младих активних галактичких језгара (Sajina et al., 2008; Magnelli et al., 2010), од јаких магнетних поља која су присутна у галаксијама у којима се активно формирају звезде (Kotarba et al., 2010), али и од галаксија које су у судару или блиском пролазу са другим пратиоцима,

што јесте главна тема истраживања ове дисертације (Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015).

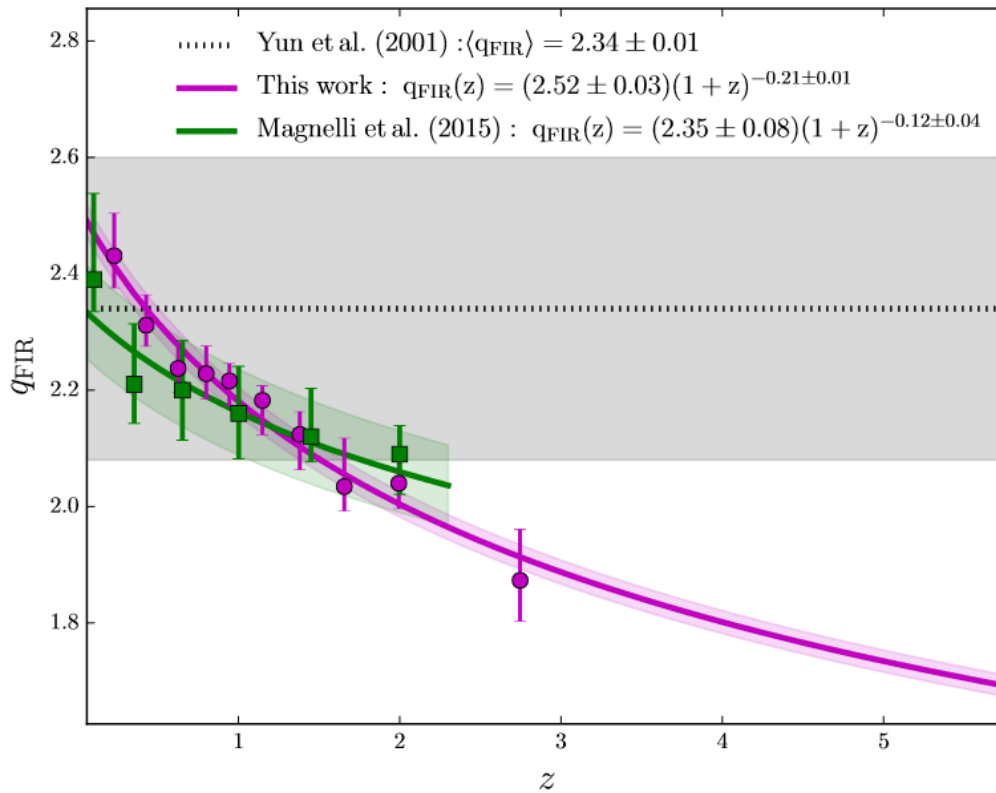
2.1 Еволуција ДИР корелације са црвеним помаком

Велики значај далеке инфрацрвене - радио корелације огледа се у њеној великој стабилности код различитих морфолошких типова галаксија, као и веома великом опсегу апсолутне луминозности, али и у јакој линеарности коју показује у локалном Универзуму. Међутим, аспект стабилности ДИР корелације који је за сада најмање поуздан и испитан јесте њена стабилност ка великим црвеним помацима. Питање ове стабилности још више се намеће у истраживању из 2017. године (D17).

У свом истраживању D17 које се заснива на проучавању ДИР корелације код СМ галаксија, користили су узорак од 12333 галаксије из *COSMOS* (енг. *The Cosmic Evolution Survey*¹) прегледа неба, посматраних на 3 GHz VLA телескопом у радио-подручју и Хершел свемирским телескопом у инфрацрвеном делу спектра (од 8 μm до 1000 μm), до црвеног помака $z < 6$. Испитивање је извршено на два подузорка, у галаксијама где зрачење првобитно долази од процеса формирања звезда (СМ галаксије) и у активним галаксијама. Овде ћемо приказати резултате анализе добијене на галаксијама са великом стопом формирања звезда, будући да су оне од интереса за наше истраживање.

Главни резултати рада D17 приказани су на слици 2.1. На графику је уцртана зависност параметра ДИР корелације (q_{FIR}) од црвеног помака (z), за цео узорак галаксија у којима се формирају звезде (љубичаста пуна линија). Ради лакшег тумачења резултата и прегледности графика, нису уцртане све галаксије из узорка. Црна испрекидана права линија и осенчани део представљају стандардну вредност параметра корелације из рада Y01, са његовом стандардном девијацијом. График садржи и резултате ранијег испитивања корелације али до црвеног помака $z = 2.5$ (Magnelli et al., 2015), ради поређења.

¹cosmos.astro.caltech.edu



Слика 2.1: Зависност параметра ДИР корелације од црвеног помака $q_{\text{FIR}}(z)$ за узорак галаксија у којима се активно формирају звезде до црвеног помака $z < 6$ - љубичаста линија (D17). Зелена линија представља резултате из рада Магнели са сарадницима, 2015, (Magnelli et al., 2015) за исти тип објеката до црвеног помака $z = 2.5$. Средња вредност параметра ДИР корелације са својом стандардном девијацијом која је усвојена као стандард за описивање ДИР корелације (Y01), приказана је црном испрекиданом линијом и сенчаном облашћу, респективно. Слика је преузета из рада D17.

Изненађујући резултат до којег се дошло јесте да ДИР корелација еволуира са црвеним помаком код галаксија у којима се формирају звезде, односно да како се крећемо ка већем црвеном помаку, параметар корелације опада као $q_{\text{FIR}}(z) = (2.52 \pm 0.03)(1+z)^{-0.21 \pm 0.01}$ (D17). Овакав резултат може да значи само две могућности: како се крећемо ка већим црвеним помацима, или долази до смањења термалног инфрацрвеног зрачења, или до повећања нетермалног радио-зрачења, или се ове промене дешавају истовремено. Битно је нагласити да је посматрани узорак садржао углавном веома далеке, ма-

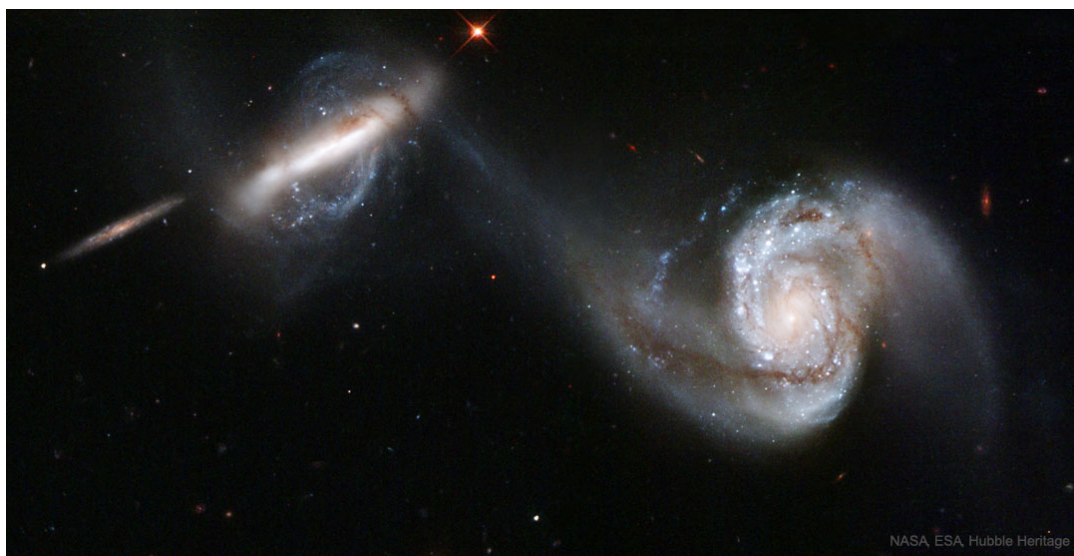
ГЛАВА 2. ДИР КОРЕЛАЦИЈА КОД СУБМИЛИМЕТАРСКИХ ГАЛАКСИЈА

сивне прашинасте галаксије, које показују велике апсолутне луминозности у инфрацрвеном делу спектра (детаљнији опис овог типа галаксија налази се у поглављу 1.3). Ова чињеница нам указује на то да већу пажњу у овом тренутку морамо посветити радио-зрачењау и објашњавању пораста овог зрачења са порастом црвеног помака. Један од разлога оваквог понашања ДИР корелације на већим црвеним помацима може да буде контаминација галаксијама које садрже АГЈ, које нису могле бити детектоване ниједним коришћеним критеријумом (D17). Међутим, постоји и други разлог који је могао да доведе до овакве природе ДИР корелације, као што је интеракција (судари и блиски пролази) између галаксија на великим црвеним помацима (D15). Код система у интеракцији уочава се вишак нетермалног радио-зрачења који може да потиче од убрзавања наелектрисаних честица у јаким ударним таласима који се јављају приликом судара (Lisenfeld and Völk, 2010; Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015). Посматрана еволуција ДИР корелације са црвеним помаком (D17), и проналазак вишка нетермалног радио-зрачења код галаксија у интеракцији (Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015) послужили су као главна мотивација за анализу утицаја интеракција галаксија на великим црвеним помацима на еволуцију ДИР корелације, што је главни циљ испитивања ове докторске дисертације.

Еволуција ДИР корелације са црвеним помаком, пронађена у раду D17 за собом повлачи велике последице када желимо да корелацију користимо за проучавање удаљених галаксија. Доводи се у питање да ли је можемо употребити за рачунање удаљености до галаксија на великим црвеним помацима, а њена најзначајнија примена приликом проучавање стопе формирања звезда у раним епохама формирања галаксија, губи на вредности. Баш из ових разлога је веома битно пронаћи физичке процесе који воде еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. Ако се покаже да су за овакво понашање корелације заслужне интеракције између галаксија, не само да ће се примена корелације вратити на снагу, већ би то значило да ДИР корелација добија још једну значајну примену, а то је детекција интерагујућих система, што на великим црвеним помацима није лако одредити и за сада не постоји ни један физички параметар који се користи у ове сврхе.

2.2 Параметар ДИР корелације у интерагујућим системима

Одступање од типичне ДИР корелације уочено је и у такозваним „Taffy” системимашту су заправо галаксије у интеракцији између којих се налази мост јаке емисије синхротронског зрачења. На слици 2.2 можемо видети један овакав систем у оптичком делу спектра снимљен Хабл свемирским телескопом. У питању је галаксија NGC 3808, која се налази у сазвежђу Лав и чине је две галаксије: спирална галаксија NGC 3808А и мања неправилна галаксија NGC 3808В. На слици се јасно види мост гаса и прашине који спаја ове две галаксије, настао њиховом интеракцијом. Код оваквих објеката уочен је вишак нетермалне радио-емисије (Braine et al., 2003). Претпоставља се да вишак радио-зрачења потиче од убрзавања наелектрисаних честица у ударним таласима који се јављају у мосту између галаксија (Lisenfeld and Völk, 2010; Murphy, 2013).

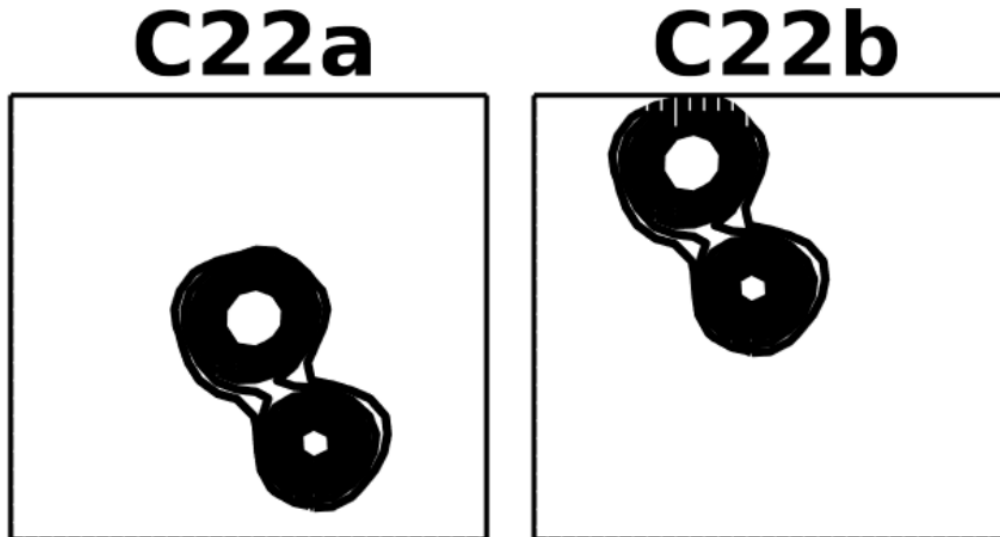


Слика 2.2: Приказ „Taffy” галаксије NGC 3808 у оптичком делу спектра, снимљене Хабл свемирским телескопом. Слика преузета са hubblesite.org/contents/news-releases/2007/news-2007-36.html

Радио-зрачење једног таквог система приказано је на слици 2.3. У питању су СМ галаксије С22а и С22б из *COSMOS* прегледа неба. На слици су приказане контуре радио-зрачења на 3 GHz снимљене VLA телескопом. Галаксије се налазе у интеракцији и између њих се уочава мост нетермалне радио-

ГЛАВА 2. ДИР КОРЕЛАЦИЈА КОД СУБМИЛИМЕТАРСКИХ ГАЛАКСИЈА

емисије (Miettinen et al., 2017). Ове конкретне галаксије биће укључене и у нашу анализу проучавања утицаја интеракција галаксија на еволуцију ДИР корелације.



Слика 2.3: Контуре радио-зрачења на 3GHz снимљене VLA телескопом за галаксије C22a и C22b које се налазе у интеракцији, из COSMOS прегледа неба. Слика преузета из рада Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017).

Познато је да ударни таласи који се формирају у интерагујућим системима (судари и блиски пролази), могу да подстакну формирање звезда у самим галаксијама, па чак и да доведу до фазе такозване звездородне галаксије (Sanders and Mirabel, 1996). Са друге стране, плимски ударни таласи могу да доведу до појаве нове популације, такозваних плимских космичких зрака (Prodanović et al., 2013; Donevski and Prodanović, 2015). Поред тога што би ово могло да доведе до подстицања формирања лаких хемијских елемената као што је литијум (Prodanović et al., 2013), додатна популација космичких зрака би појачала и нетермалну радио-емисију у оваквим областима (Prodanović et al., 2013). Као последица, галаксије у интеракцији би имале већа одступања од ДИР корелације у односу на нормалне спиралне галаксије.

У раду D15 показало се да постојање плимских ударних таласа код галаксија у интеракцији у којима је формирање звезда подстакнуто интеракцијом, утиче на дисперзију параметра ДИР корелације од већ одређене стандардне вредности (Y01). Са друге стране СМ галаксије се налазе на великим цр-

веним помацима и представљају старије системе од локалних галаксија, што нам указује и на то да ће заступљеност метала у овим системима бити нижи у односу на нама блиске галаксије (Bouché et al., 2005; Rowlands et al., 2014; Bothwell et al., 2016). Параметар ДИР корелације код галаксија које имају ниску металичност (локалне патуљасте галаксије) такође је нижи од стандарде вредности овог параметра (Schleicher and Beck, 2016).

Све наведене чињенице нам указују да би СМ галаксије требало да имају нижи параметар корелације од локалних спиралних галаксија у којима се формирају звезде, што је нама послужило као мотивација за проучавање утицаја интеракција далеких СМ галаксија на њихово нетермално радио-зрачење, а самим тим и на снижавање параметра ДИР корелације како се крећемо ка већем црвеном помаку. У овом поглављу описаћемо главне резултате рада D15, који говори о директном утицају различитих стадијума судара галаксија у локалном Универзуму на параметар ДИР корелације. Резултати D15 рада су засновани на узорку од 43 луминозне и ултралуминозне галаксије у локалном свемиру преузетих из NASA/IPAC² вангалактичке базе података (Dopita et al., 2002; Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015) које су тренутно у судару и блиском пролазу. Ове галаксије су једне од најлуминознијих галаксија на таласној дужини од 60 μm и налазе се на удаљеностима од ~ 50 Мрс до 100 Мрс од нас. Главни циљ рада D15 јесте био да се испита утицај постојања плимских ударних таласа код интерагујућих система на њихово нетермално радио-зрачење, а самим тим и на параметар ДИР корелације код галаксија у којима се активно формирају звезде. Како интеракција између галаксија није тренутни процес, физички процеси који ће бити последица плимских ударних таласа, ће се смењивати како судар напредује. Из тог разлога, у раду D15, интеракција између галаксија је подељена на три главна стадијума, који ће укратко бити објашњени у овом поглављу.

2.2.1 Развој физичких процеса кроз различите стадијуме судара

У раним стадијумима судара, очекује се да ће доћи до појаве плимских ударних таласа у међузвезданом простору који ће почети да загревају гас и прашину. Ово загревање ће се огледати у томе што ће прашина емитовати

²<https://ned.ipac.caltech.edu/>

ГЛАВА 2. ДИР КОРЕЛАЦИЈА КОД СУБМИЛИМЕТАРСКИХ ГАЛАКСИЈА

појачано инфрацрвено зрачење. Са друге стране, исти процеси ће довести до разарања прашине. У зависности од јачине ударних таласа, величине самих зрна прашине, као и густине међузвезданог простора, време које ће бити потребно за уништење зрна прашине ће варирати од неколико хиљада до више десетина милиона година (Tielens, 1998; Dwek and Arendt, 1992; Lau et al., 2015). Типична временска скала за убрзавање електрона у ударним таласима код остатака супернових је 10^5 година, што зависи од временског периода живота самог остатка (Strong et al., 2007). Из овога можемо закључити да би се космички зраци убрзавали док год трају ови ударни таласи код интеракција галаксија, што може да буде и до 10^9 година (D15). То значи, да ће у првим стадијумима интеракције галаксија, од неколико хиљада па до милион година, термално зрачење загрејане прашине бити повећано у односу на неинтерагујуће галаксије. Ови процеси би довели до повећања вредности параметра корелације q_{FIR} . Са друге стране, очекујемо да ће притом доћи и до смањења средњег спектралног индекса, који указује на доминантно термално зрачење, што би опет утицало на понашање ДИР корелације (D15).

Десетак милиона година након почетка интеракције и формирања плимских ударних таласа, започеће фаза убрзавања наелектрисаних честица. Нетермално радио-зрачење које потиче од овако убрзаних честица у плимским ударним таласима ће у екстремним случајевима моћи да надјача зрачење које потиче од галактичких космичких зрака. У овом случају бисмо очекивали смањење параметра ДИР корелације у односу на стандардну вредност због појачане нетермалне компоненте радио-зрачења. Као резултат, спектрални индекс би се такође променио, постао би блажи, и указивао на јаке ударне таласе који настају у овом стадијуму судара као и на старост популације космичког зрачења (D15).

Након неколико десетина до стотину милиона година од почетка интеракције, почиње формирање звезда као последица ударних таласа. Нове звезде биће у могућности да поново покрену загревање прашине, што би довело до повећања инфрацрвене компоненте зрачења. Као последица рађања нових звезда, параметар ДИР корелације ће почети да расте услед повећане инфрацрвене емисије. На самом крају интеракције, очекује се повећана стопа супернових насталих од новоформираних звезда, што ће довести до појаве нових остатака супернових који ће убрзавати честице космичког зрачења, те се у овој епохи судара очекује снижавање параметра корелације и враћање

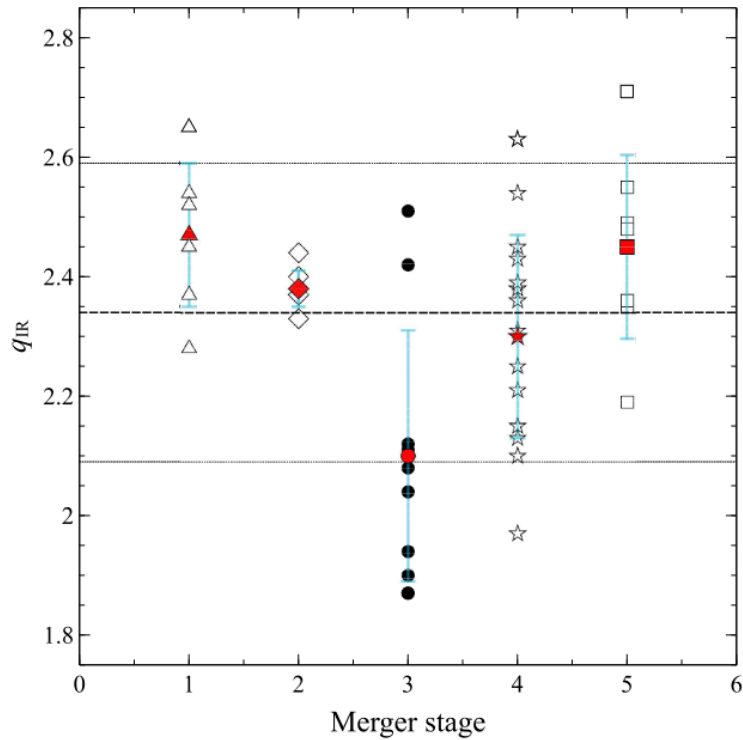
његове вредности на стандардну (D15). Битно је нагласити да ће се временске скале и трајање сваког од стадијума судара, разликовати како се крећемо ка већем црвеном помаку, због ниже концентрације прашине која ће директно утицати на нижу стопу формирања звезда, а самим тим и на стопу експлозија супернових (Pettini et al., 1997; Donevski and Prodanović, 2015; Maiolino and Mannucci, 2019; Shangguan et al., 2019).

2.2.2 Еволуција параметра корелације у различитим стадијумима судара

На узорку од 43 инфрацрвене галаксије у раду D15 тестирана је зависност параметра корелације од стадијума судара галаксија, где су галаксије на основу морфологије класификоване по стадијумима интеракције у 7 класа који чине тзв Тумров низ који ће детаљно бити објашњен у одељку 3.2.1:

- 0 - галаксије нису започеле интеракцију, потпуно су одвојене,
- 1 - стадијум пре самог почетка судара, галаксије су и даље одвојене и плимски ударни таласи се још увек нису развили,
- 2 - почетак судара, уочљиве су и даље све галаксије које учествују у судару,
- 3 - средњи стадијум судара, галаксије које су у судару спаја мост гаса и прашине,
- 4 - касни стадијум судара, уочљива једна галаксија са два или више језгара,
- 5 - стадијум након судара, уочљива једна галаксија, са једним језгром и препознатљивим реповима,
- 6 - касно после судара, уочљива је једна галаксија са једним језгром и занемаривим реповима.

На слици 2.4 можемо видети резултате из рада D15 као зависност параметра корелације q_{FIR} од задатих стадијума судара галаксија.



Слика 2.4: Еволуција параметра ДИР корелације са стадијумима судара галаксија. Испрекидана линија представља стандардну вредност параметра корелације код нормалних неинтерагујућих галаксија, док тачкасте линије представљају његову стандардну девијацију. Црвени испуњени симболи су средња вредност параметра ДИР корелације израчуната посебно за сваки стадијум судара за одабрани узорак од 43 галаксије. Симболи представљају различите стадијуме судара: троугао - стадијум 1, ромб - стадијум 2, круг - стадијум 3, звезда - стадијум 4 и квадрат - стадијум 5. Слика преузета из рада Донеvски и Продановић, 2015, (D15).

Резултати нам указују да системи који су у блиском пролазу или у ранијим стадијумима судара, имају нешто вишу вредност параметра q_{FIR} од стандардне вредности што је у складу са очекиваним појачаним инфрацрвеним зрачењем које постаје доминанто у односу на нетермално радио-зрачење, који у каснијим епохама интеракције полако опада и достиже минималну вредност у трећем стадијуму судара, након чега почиње опет да расте и враћа се на нормалну вредност након судара (D15). Резултати су у сагласности са ранијим истраживањем „Taffy” система (Murphy, 2013) који показују појачано нетермално радио-зрачење, што је у раду D15 представљено трећим стадијумом

судара где се такође очекује иста појава. Велика разлика која је овде показана јесте да ударни таласи настали интеракцијом неће бити значајни само у „Taffy” системима већ и у почетним и крајњим стадијумима интеракције када је морфологија галаксија непромењена и неправилна, респективно.

Ово нам говори да код неправилних галаксије које су последица интеракција са другим галаксијама можемо очекивати нижу вредност параметра ДИР корелације од стандардне вредности ($Y01$), док нормалне спиралне галаксије, које нису скоро биле у већој интеракцији не би требало да показују никаква одступања у ДИР корелацији, што је један од главних циљева испитивања у овој дисертацији. Пре него што пређемо на анализу нашег истраживања, накратко ћемо се окренути скорашњим радовима са којима ћемо упоредити наше резултате у одељку 5. Једно од значајних истраживања на ову тему јесте истраживање утицаја морфологије галаксија на ТИР корелацију до црвеног помака $z = 1.5$ (M18). У овом случају Т означава укупни (тотални) флуks инфрацрвеног зрачења, који поред далеког инфрацрвеног зрачења, укључује и средње и блиско инфрацрвено зрачење. Други релевантан рад заснива се на испитивању зависности параметра ТИР корелације од звездане масе галаксије (M_*) (D21), те ћемо укратко описати и резултате овог истраживања, а наше резултате ћемо упоредити са постојећим у одељку 5.

2.3 Еволуција ДИР корелације код сфероидних галаксија и код галаксија у чијој морфологији доминира диск

У циљу испитивања могућности што тачнијег коришћења радио луминозности као алата за проучавање стопе формирања звезда код удаљених галаксија, у раду Молнар са сарадницима, 2018, (Molnár et al., 2018) проучена је зависност ТИР корелације од различитих морфологија галаксија. За одређивање саме морфологије галаксија коришћен је Цирих (*Zurich*³) морфолошки каталог за *COSMOS*⁴ узорак. Посматрани узорак у овом истраживању састојао се од 6072 галаксије које су на основу морфолошких параметара класификоване као: 1. сфероидне галаксије, где су укључене све галаксије типа

³www.irsa.ipac.caltech.edu/data/COSMOS/gator_docs/cosmos_morph_zurich_colDescriptions

⁴<https://cosmos.astro.caltech.edu/>

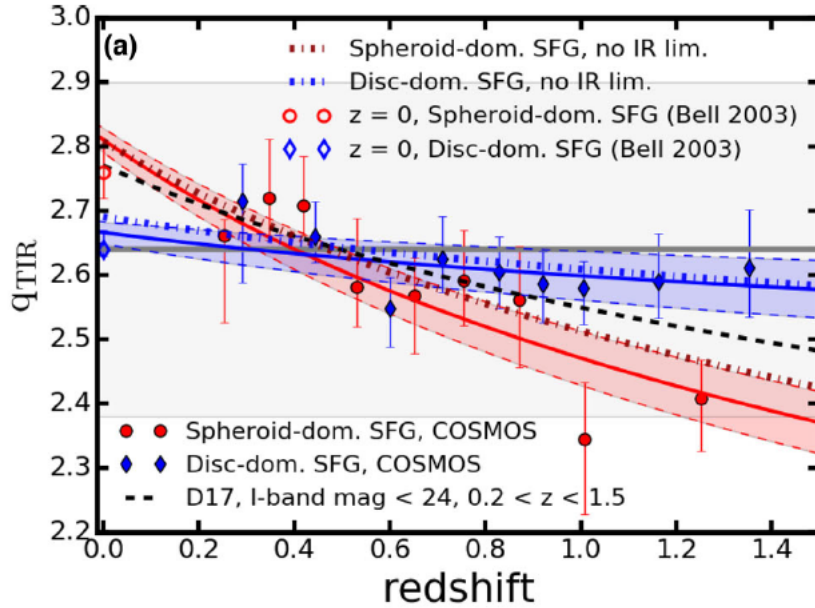
1 из Цирих каталога, односно све елиптичне галаксије, као и све дисколике галаксије које показују изражени централни део (Scarlata et al., 2007), и 2. дисколике галаксије које укључују галаксије у којима доминира диск, спиралне/дисколике галаксије и неправилне галаксије.

На слици 2.5 приказани су резултати рада M18. Зависност параметра ТИР корелације од црвеног помака за сфероидне галаксије (пуни црвени кругови) приказана је пуном црвеном линијом, док је за дисколике галаксије (пуни плави ромбови) приказана пуном плавом линијом. Ради поређења на графику су приказани и резултати рада Бел, 2003, (Bell, 2003) празним плавим ромбовима и црвеним круговима. Зависност параметра корелације од црвеног помака је одрађена као и у раду D17, у виду $q = a(1 + z)^b$, где је a константа фита а b је степени коефицијент.

Основни закључци овог истраживања, које можемо видети на слици 2.5 јесу да дисколике галаксије не показују (или показују веома слабу) еволуцију ТИР корелације са црвеним помаком, односно слабо опадање параметра ТИР корелације са повећањем црвеног помака. Са друге стране, сфероидне галаксије показују опадање параметра корелације са црвеним помаком, и то са $b = -0.19 \pm 0.02$, што је у складу са резултатима рада D17. Претпоставља се да је главни разлог за ниже вредности параметра ТИР корелације на већим црвеним помацима код сфероидних галаксије, заправо вишак нетермалног радио-зрачења, које може проистећи од контаминације самог узорка са АГЈ која су пропуштена коришћењем постојећих критеријумима за детектовање активних галаксија, међутим не треба да се искључе и други процеси који се дешавају у самим галаксијама који могу довести до емисије радио-зрачења (M18).

2.4 Зависност параметра ДИР корелације од звездане масе галаксије

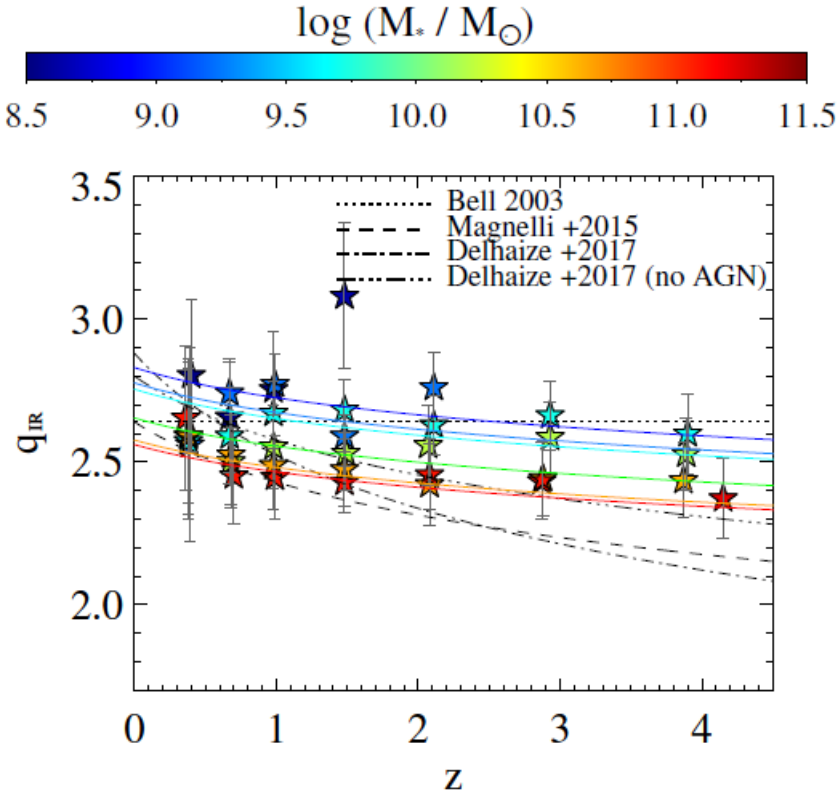
Још једна зависност која је такође испитана јесте утицај звездане масе (M_*) на ДИР корелацију. Управо овај параметар је био кључан у скорашњем истраживању одступања од ДИР корелације у раду Делвекио са сарадницима, 2021, (Delvecchio et al., 2021). У овом раду је по први пут испитана зависност параметра ДИР корелације од црвеног помака и од звездане масе симултано на узорку од > 400.000 галаксија у којима се активно формирају



Слика 2.5: Приказ еволуције параметра ТИР корелације са црвеним помаком у зависности од морфологије галаксија. Зависност за сфероидне галаксије (пуни црвени кругови) приказана је пуном црвеном линијом, док је иста зависност за дисколике галаксије (пуни плави ромбови) приказана пуном плавом линијом. Осенчени регион, оивичен пуним сивим линијама, представља стандардну девијацију параметра ДИР корелације (Y01). Морфологија галаксија одређена у односу на истраживање Bell, 2003, (Bell, 2003), је на графику представљена празним црвеним круговима и празним плавим ромбовима. Црна испрекидана линија представља зависност параметра корелације од црвеног помака за цео узорак који укључује све морфологије галаксија. Слика преузета из рада Молнар са сарадницима, 2018, (M18).

звезде преузетих из *COSMOS* прегледа неба. Идеја овог истраживања потиче од познате релације између стопе формирања звезда и звездане масе код галаксија у којима се активно формирају звезде, названа „главни низ” (енг. *main sequence* - *MS*). Показало се да је ова релација одржива у локалном Универзуму али и код галаксија до црвеног помака $z = 5$ (Brinchmann et al., 2004; Schreiber et al., 2015; Lee et al., 2015). Зависност параметра ДИР корелације од црвеног помака и звездане масе је испитана на галаксијама у опсегу црвених помака $0 < z < 4.5$ и звезданих маса $10^8 < M_*/M_\odot < 10^{12}$.

На слици 2.6 приказани су резултати рада D21. На y оси налази се параметар ДИР корелације док је на x оси црвени помак. Зависност параметра корелације испитана је и за различите опсеге звезданих маса (обојена трака),



Слика 2.6: Графички приказ зависности параметра ТИР корелације (q_{IR}) од црвеног помака, за 6 различитих вредности звезданих маса галаксија у *COSMOS* узорку (обојена трака) представљене пуним линијама. Ради поређења на слици су приказана и ранија испитивања еволуције ДИР корелације и то тачкастом црном линијом (Bell, 2003), испрекиданом линијом (Magnelli et al., 2015), и црта-тачка и тачка-тачка-црта линијом резултати рада D17, када се у узорку налазе и галаксије са АГЈ и без АГЈ, респективно. Слика преузета из рада (D21).

приказане пуним обојеним линијама. Црне линије приказују исту зависност само без освртања на вредност звезданих маса, пронађене у ранијим истраживањима (Bell, 2003; Magnelli et al., 2015; Delhaize et al., 2017). Параметар ДИР корелације одређен је истовремено од црвеног помака и звездане масе (D21) као:

$$q_{\text{IR}}(M_*, z) = (2.646 \pm 0.024)(1 + z)^{-0.023 \pm 0.008} - (\log M_*/M_\odot - 10)(0.148 \pm 0.013). \quad (2.1)$$

Као што се може видети са слике 2.6 а и у једначини 2.1, главни резултат

ГЛАВА 2. ДИР КОРЕЛАЦИЈА КОД СУБМИЛИМЕТАРСКИХ ГАЛАКСИЈА

оваквог истраживања јесте да је параметар ТИР корелације веома осетљив на звездану масу галаксије, односно има најниже вредности код галаксија са највећом масом звезда, али и да за разлику од претходних истраживања, не показује значајне промене са црвеним помаком (D21). Показало се такође да овакав тренд није узрокован присуством АГЈ у самом узорку, већ да је највероватнији узорк појаве зависности параметра ДИР корелације од звездане масе галаксије заправо појачање магнетних поља код масивних галаксија у којима се активно формирају звезде (D21). У раду D21 раније виђена еволуција ДИР корелације са црвеним помаком, интерпретира се недостатком галаксија са мањом звезданом масом у узорцима на великим црвеним помацима, јер их је теже детектовати. Са друге стране масивне галаксије воде порекло од судара мање масивних галаксија и за разлику од мање масивних, галаксије које имају веома велике звездане масе су током живота преживеле више интеракција и блиских пролаза (Conselice, 2007; Conselice et al., 2009; Bertone and Conselice, 2009), што може утицати на појачање нетермалног зрачења у овим системима, што је опет у сагласности са нашом претпоставком да интеракције између галаксија представљају главним узрок снижавања параметра ДИР корелације ка већим црвеним помацима. Из ових разлога, одлучили смо да урадимо сличну анализу на великом *COSMOS* узорку галаксија, а резултати нашег испитивања и поређење са радом D21 биће приказани у глави 5.

Глава 3

Анализа могућих проблема

У уводној глави ове дисертације упознали смо се са класом далеких праши-настих галаксија које показују веома велике луминозности у инфрацрвеном делу спектра, које називамо субмилиметарске галаксије. Такође видели смо да је за опште разумевање формирања и еволуције галаксија кроз различите епохе у еволуцији свемира, веома битно да проучимо где се у хијерархијској еволуцији галаксија налазе СМ галаксије. Како се ове галаксије налазе на великим црвеним помацима, и показују слабу луминозност на скоро свим таласним дужинама осим у субмилиметарском и инфрацрвеном подручју, њихово проучавање се у великој мери ослања на ДИР корелацију. Међутим, скорашњи радови показали су да се ова корелација не одржава код СМ галаксија и да еволуира са црвеним помаком (D17). Како бисмо наставили са истраживањем физичких процеса у СМ галаксијама, веома је битно разумети физичке узроке еволуције ДИР корелације са црвеним помаком. Штавише, одступање од ДИР корелације код галаксија на великим црвеним помацима може имати последице на одређивање стопе формирања звезда у овим галаксијама, која може бити прецењена. Инспирисани радом D15, одлучили смо да проверимо да ли еволуција ДИР корелације која је пронађена у раду D17 потиче од интеракција између галаксија, што представља главну тачку истраживања у овој докторској дисертацији. Јер ако су плимски ударни таласи услед интеракција узрок одступања параметра корелације од стандардне вредности, сама еволуција ДИР корелације би онда могла да се користи као алат за идентификовање интерагујућих система на великом црвеном помаку, где је то тешко учинити. Са друге стране може нам послужити и као алат за разумевање стопе судара у различитим етапама формирања Универзума и

еволуције галаксија.

У овој глави, описаћемо параметре који ће нам бити потребни за нашу анализу и који ће директно утицати на наше резултате, као и проблеме приликом прављења узорка за анализу наших претпоставки са којима бисмо могли да се сусретнемо.

- Ниске вредности параметра q_{FIR} очекиваће се и код галаксија са активним галактичким језгром и то баш због повећане нетермалне радио-емисије у овим системима. АГЈ могу контаминирати узорак и прикрити прави узрок еволуције корелације са црвеним помаком. Ово значи да је одстрањивање АГЈ из нашег узорка, кључна тачка за добијање релевантних резултата. У поглављу 3.1 детаљно ћемо објаснити критеријуме који се тренутно користе за идентификацију АГЈ на великим црвеним помацима и који ће бити искоришћени и у нашем истраживању, а такође приказаћемо и недостатке тих критеријума који би могли да утичу на коначне резултате.
- Морфологију сваке галаксије из нашег узорка ћемо користити као индикатор судара. Као што смо видели у раду D15, параметар ДИР корелације биће веома осетљив на стадијум судара између галаксија, што на великим црвеним помацима није тривијално одредити. Из тог разлога одлучили смо да детаљно проучимо садашње критеријуме који се користе за одређивање морфологије галаксија и они ће бити представљени у поглављу 3.2.

3.1 Искључивање АГЈ

У нашем раду, главни циљ јесте испитивање физичких процеса који покрећу еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. ДИР корелација потиче директно од процеса формирања звезда. Како нас у овој анализи посебно занимају галаксије на великим црвеним помацима, постоји ризик да ће неке од галаксија које имају појачано радио-зрачење имати и активно галактичко језгро, што може утицати на наше резултате и њихово погрешно тумачење. Код АГЈ додатно нетермално радио-зрачење долази од процеса акреције материје у црну рупу. АГЈ можемо поделити по изгледу спектра на АГЈ типа 1 и 2 (Osterbrock, 1991; Netzer, 2013; Popović, 2017). Ови типови АГЈ не значе

да су то различите врсте галаксија већ да их видимо под различитим углом. Ако АГЈ гледамо одозго, онда је то АГЈ типа 1, и у њиховим спектрима се углавном уочавају веома широке емисионе линије које указују на то да посматрамо врео гас ближи црној рупи. Ову врсту АГЈ није тешко препознати јер показује веома велике густине флуksа и у радио и у X-подручју спектра. Ако АГЈ гледамо са стране, торус прашине ће нам заклањати директан поглед на центар галаксије, те нећемо моћи да детектујемо зрачење које долази акрецијом материје у црну рупу и оваква АГЈ називамо АГЈ типа 2 и она су много тежа за детектовање. У спектру АГЈ типа 2 уочавају се уске али јаке емисионе линије (Роровић, 2017). Важно је напоменути да у случају постојања спектра галаксија које посматрамо, класификацију објеката можемо урадити преко односа јачина специфичних емисионих линија односно преко такозваног *BPT* дијагностичког дијаграма (Baldwin et al., 1981), који нам омогућује проверу да ли је зрачење које посматрамо термалне природе. Тренутно постоји више критеријума на основу фотометријских посматрања, који се користе за детектовање галаксија које поседују АГЈ, а то су:

- Донли критеријум, који класификује АГЈ ако галаксија показује степени закон у средњем инфрацрвеном делу спектра, што указује на присуство „торуса” прашине у АГЈ (Donley et al., 2012).
- Ако галаксија показује специфичне појаве у X-подручју спектра, односно има луминозност у овом делу $L_x > 10^{42} \text{ergs}^{-1}$ (Smolčić et al., 2017a).
- Добро поклапање са спектралном енергетском расподелом извора који садрже АГЈ (Delvecchio et al., 2017).
- Однос радио-луминозности на 1.4GHz и стопе формирања звезда у галаксији (Delvecchio et al., 2017).

Да бисмо били што конзервативнији, из узорка на ком смо радили испитивање, одбацили смо све галаксије које по било ком од поменутих 4 критеријума показују присуство АГЈ. Ови критеријуми биће кратко објашњени у наредним поглављима.

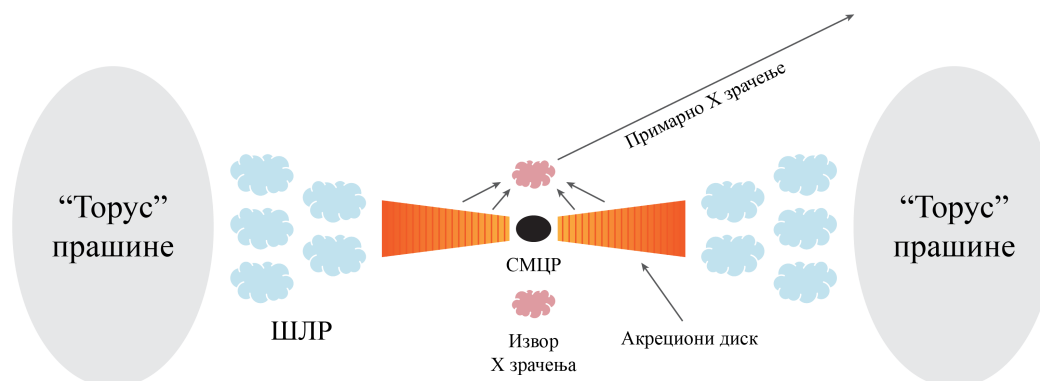
3.1.1 Специфичности рендгенског зрачења АГЈ

Емисија рендгенског (X) зрачења је неизбежна када су у питању АГЈ. Она настаје комптонизацијом оптичког/UV зрачења из диска, врелим електро-нима из короне (видети слику 3.1) која се налази изнад и испод супермасивне црне рупе. Комптонизацијом оптичких фотона, производи се рендгенско зрачење са степеним законом $I(E) \sim E^{-\Gamma}$ (Netzer, 2013), где $I(E)$ представља интензитет рендгенског зрачења на одређеној енергији, (на слици 3.2 је приказано црвеном тачка-тачка-црта линијом), где се степени индекс налази у опсегу $\Gamma \sim 1.8 - 2$ (Ricci et al., 2011). Део примарног рендгенског зрачења интерагује са молекулима торуса прашине, диска и широколинијског региона, што доводи до појаве рефлектованог рендгенског зрачења (слика 3.2 - испрекидана линија) које има максимум на око 30 – 40keV. Специфична карактеристика рендгенског спектра АГЈ јесте емисиона K_{α} линија (тачка-црта линија на слици 3.2) која се налази на 6,4keV (Popović, 2017). Ова линија настаје суперпозицијом широке и уске емисионе линије. Широка компонента ове линије углавном настаје рефлексијом о материјал самог диска, док уска линија настаје нешто даље, рефлексијом о широколинијски регион или торус. Велики број АГЈ показује вишак емисије на енергијама мањим од 2keV у односу на континуални спектар, тј. слабо рендгенско зрачење. Ово зрачење настаје различитим механизмима код АГЈ типа 1 и 2 (Popović, 2017), а неки од процеса који објашњавају појаву овог вишка зрачења су рефлексија са јонизованог диска као и такозвана замућена апсорпција од јонизованих ветрова (Ricci et al., 2011).

За разлику од оптичког или инфрацрвеног зрачења које је термалне природе, нетермално X зрачење има многе предности приликом проучавања астрономских појава, а поготово када говоримо о АГЈ, која показују значајну разлику у односу на галаксије код којих зрачење потиче углавном од процеса формирања звезда. На слици 3.3 приказана је оближња галаксија NGC 4051 која поседује АГЈ. Лево видимо зрачење које настаје акрецијом материје у црну рупу, у X-подручју спектра снимљеном *ROSAT High Resolution Imager*¹, док десно видимо зрачење у оптичком делу спектра са SDSS (енг. *The Sloan Digital Sky Survey*²) прегледа неба које искључиво потиче од процеса формирања звезда.

¹heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/roskof.html

²www.sdss.org



Слика 3.1: Графички приказ делова активног галактичког језгра. Сиви кругови представљају „торус” прашине који је извор континуалне инфрацрвене емисије. Плави облаци су извор широколинијског спектра. Акрециони диск (наранџасто) је главни извор оптичких и UV фотона, док је розе облачићима представљена корона која је главни извор примарног рендгенског зрачења.

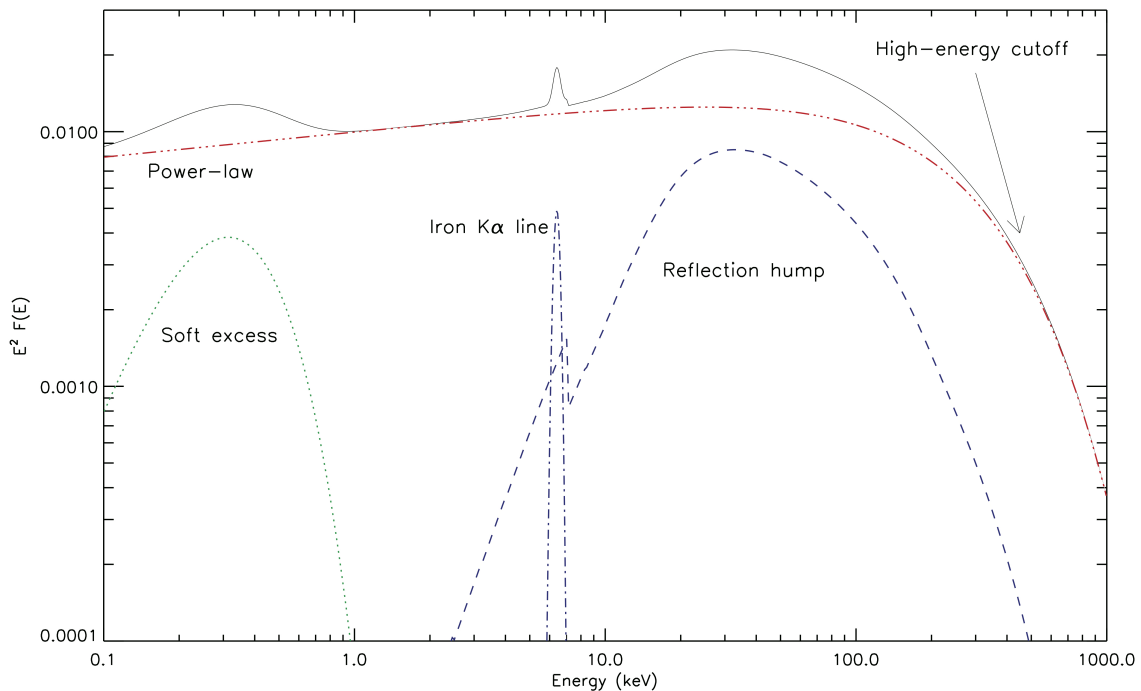
Технологија коју користе данашњи телескопи (Chandra³, XMM-Newton⁴) за посматрање неба у X-подручју спектра, имају велику осетљивост и прецизност. Угловна резолуција Чандра телескопа износи 0.5 arcsec што је хиљаду пута боља резолуција од првих свемирских телескопа који су снимали небо у X-подручју спектра, док овај број код ИксММ - Њутн телескопа достиже 6 arcsec. Извори зрачења у овом подручју спектра који имају опсег луминозности од $10^{42} - 10^{46} \text{ergs}^{-1}$ могу бити детектовани чак до црвеног помака $z \sim 3$ (Steffen et al., 2003). Битно је нагласити да ће истраживања АГЈ у рендген подручју спектра бити увелико побољшана када свемирски телескоп *eROSITA*⁵ заврши свој четворогодишњи преглед целог неба чији је главни циљ проналазак свих затамњених црних рупа у оближњим галаксијама као и детекција нових удаљених АГЈ.

Нисколуминозна АГЈ углавном детектујемо као тачкасте изворе у X-подручју спектра. Када се ради о прегледима неба на малим црвеним помацима, ако мали објекат (< 2 крс) има укупну луминозност у X-подручју спектра $> 10^{42} \text{erg s}^{-1}$, он вероватно поседује АГЈ (Georgantopoulos and Akylas, 2010; Smolčić et al., 2017a; Koutoulidis et al., 2022).

³chandra.harvard.edu

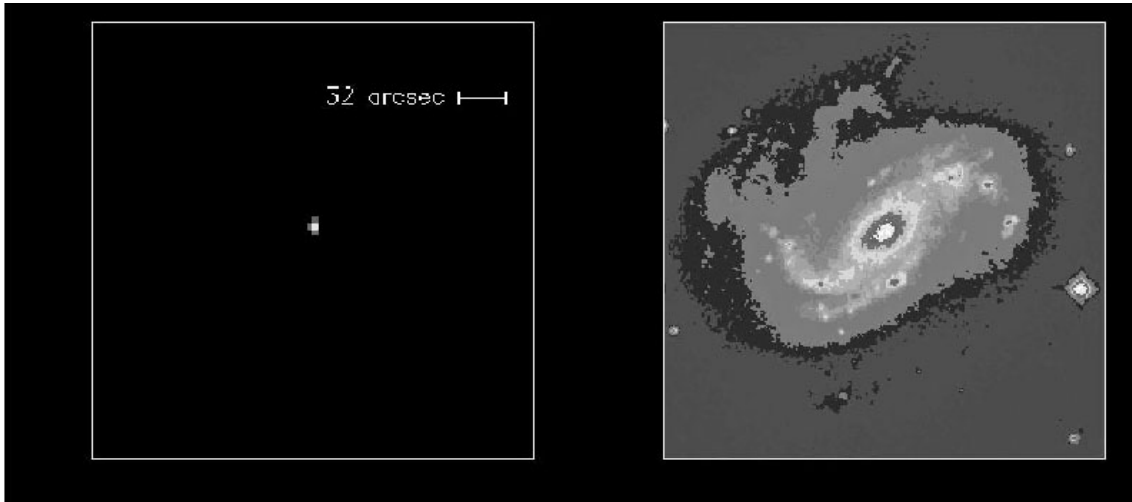
⁴cosmos.esa.int/web/xmm-newton

⁵mpe.mpg.de/eROSITA



Слика 3.2: Спектар рендгенског зрачења АГЈ. Црвена тачка-тачка-црта линија је степени закон примарног рендгенског зрачења. Испрекиданом линијом приказано је рефлектовано рендгенско зрачење о торус, диск и широколинијски регион. На графику видимо и пик K_{α} емисије приказан тачка-црта линијом. Тачкаста линија представља вишак слабог рендгенског зрачења, док је црна пуна линија суперпозиција свих ових компоненти и представља спектар рендгенског зрачења АГЈ. Слика преузета из рада (Ricci et al., 2011).

Као што смо видели на почетку овог поглавља, рендгенско зрачење код АГЈ потиче из подручја веома блиског црној рупи, и веома често показује брзу променљивост са огромним разликама у амплитуди, и карактеристичне га степени нетермални спектар (De Marco et al., 2020). За сада се зна да фундаментална својства црне рупе не зависе од металности и међузвезданог окружења већ само од њене масе, брзине акреције и спина. Због тога, физичка својства раних црних рупа на великим црвеним помацима треба да буду слична онима које посматрамо у локалном Универзуму. Самим тим, спектар рендгенског зрачења далеких АГЈ треба да показују исте особине као и АГЈ блиска нама. Ово значи да је рендгенско зрачење веома погодно за проучавање АГЈ на великим црвеним помацима, али се може користити и као веома добар алат



Слика 3.3: Снимак у X-подручју спектра са *ROSAT* свемирског телескопа (лево) и оптичка слика (десно) оближње активне галаксије NGC4051 из *SDSS* прегледа неба. На левој страни видимо искључиво зрачење АГЈ, док оптичким зрачењем доминира процес формирања звезда. Ова галаксија је оригинална галаксија коју је идентификовао Сајферт још 1943. године. Слика преузета са ned.ipac.caltech.edu/level5/March04/Mushotzky/Mushotzky4.html.

за отклањање ових галаксија из посматраног узорка на основу услова да је галаксија активна ако има луминозност у X-подручју зрачења $> 10^{42} \text{erg s}^{-1}$.

3.1.2 Донли критеријум

Донли критеријум за детекцију галаксија са АГЈ представља ревидирани *Spitzer/IRAC* (енг. *Infra Red Array Camera*⁶) критеријум који је коришћен до 2012, а заснива се на снимању галаксије у средњем инфрацрвеном делу спектра (од 3 – 50 μm) како би се детектовала АГЈ која нису могла бити детектована у X-подручју. Осмишљен је из разлога што се на великим црвеним помацама појављују галаксије у којима се формирају звезде које не могу бити разликоване од АГЈ коришћењем само X-домена спектра. Типична галаксија са АГЈ је у X-подручју много луминознија од сваке галаксије у којој се тренутно формирају звезде. То значи да дубоки прегледи неба у овом подручју спектра представљају најбољи начин за идентификацију АГЈ. Међутим, прегледи неба на 2 – 10 keV не могу детектовати АГЈ типа 2, као ни Комптонски непрозрачна АГЈ (Treister et al., 2004; Ballantyne et al., 2006; Tozzi et al.,

⁶web.cfa.harvard.edu/irac/

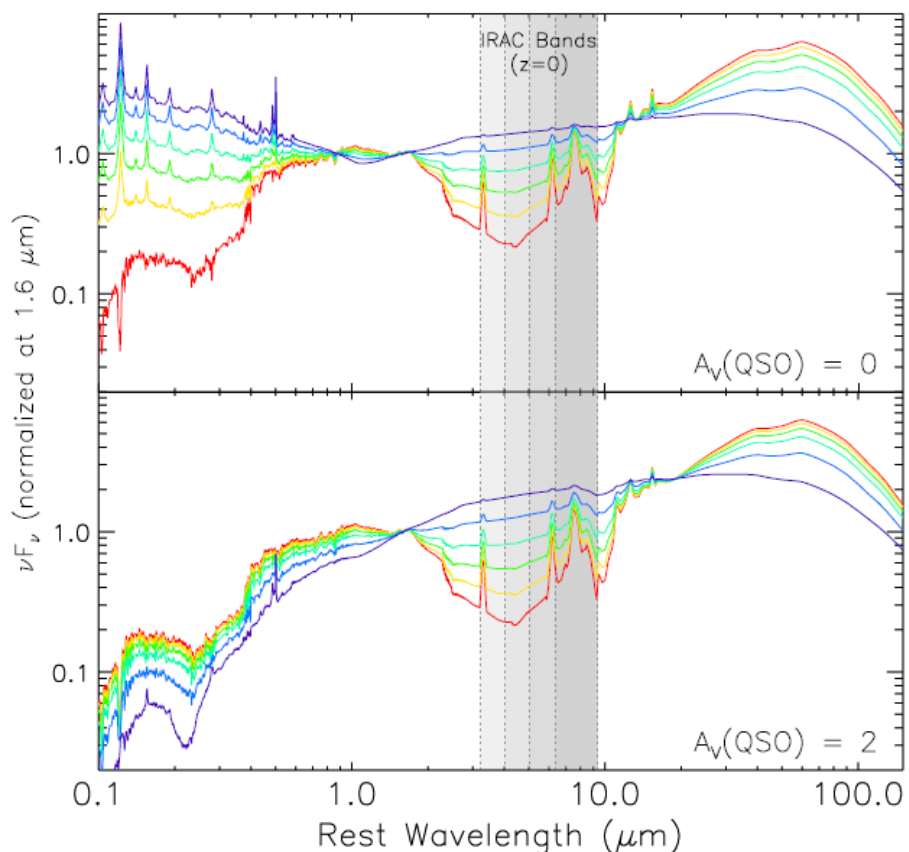
2006) из разлога што гас и прашина апсорбују зрачење и сакривају значајне посматрачке карактеристике самог спектра. Када је испитано космичко позадинско зрачење у X-подручју (Gilli et al., 2007), дошло се до закључка да су ове врсте АГЈ подједнако бројне као и АГЈ типа 1 високе луминозности ($\log L_{0.5-2\text{keV}}[\text{ergs}^{-1}] > 43.5$), и четири пута бројније од од АГЈ типа 2 ниске луминозности ($\log L_{0.5-2\text{keV}}[\text{ergs}^{-1}] < 43.5$). Како би се детектовала АГЈ која су промашена у X-подручју спектра, истраживања су се фокусирали на MIR (енг. *Mid Infrared*), односно средње инфрацрвено подручје, које је осетљиво на зрачење прашине АГЈ. Пре него што објаснимо Донли критеријум који ће бити коришћен и у нашем истраживању, објаснићемо и његовог претходника - *IRAC* селекциони критеријум.

- *IRAC* селекциони критеријум

IRAC селекциони критеријум заснива се на фитовању СЕД криве посебно за нормалне галаксије и за активне галаксије. Пример овог фитовања приказан је на слици 3.4 (Donley et al., 2012). СЕД крива нормалних галаксија у којима се активно формирају звезде показује удубљење (црвена крива) у *IRAC* подручју који обухвата четири таласне дужине и то: $3.6 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$, $5.8 \mu\text{m}$ и $8 \mu\text{m}$ (сиви осенчани део).

Са друге стране, прашина загрејана процесима у активном галактичком језгру, може достићи температуру сублимације $T_{\text{dust}} \sim 1000 - 1500 \text{ K}$, што значи да ће емитовати у блиском инфрацрвеном делу спектра. У случају да је АГЈ много луминознији у односу на околну галаксију, суперпозиција емисије црног тела од стране загрејане прашине ће попунити удубљење које видимо у овом делу спектра код нормалних галаксија и на тај начин ће доћи до појаве степеног закона зрачења који ћемо на даље називати *IRAC* степени закон, који можемо видети на истој слици 3.4 приказан љубичастом кривом (Donley et al., 2012). Међутим, геометријски дебео торус код АГЈ типа 2 ће довести до затамњења у овим деловима спектра што ће довести до великог разилажења у степеном закону у односу на АГЈ типа 1 (Pier and Krolik, 1993). Иако не постоји ниједна анализа која нам даје колика је ова разлика, претпоставља се да ће АГЈ типа 2 бити приближно три до пет пута мање сјајна у средњем инфрацрвеном делу спектра (Donley et al., 2012).

На слици 3.5 илустрована је очекивана боја галаксија у *IRAC* подручју спектра галаксија, са различитим уделом АГЈ (од 0% до 95%). Уоквирена ли-



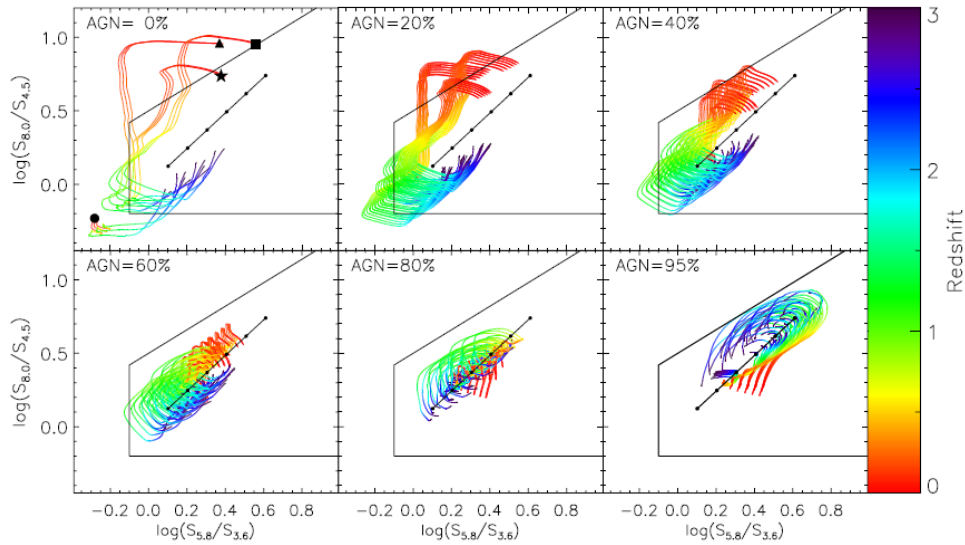
Слика 3.4: СЕД крива за галаксије са различитим уделом зрачења које потиче од АГЈ, где је црвеном бојом приказана крива за нормалне галаксије код којих инфрацрвено зрачење потиче само од процеса формирања звезда (0% удела АГЈ), док љубичаста крива показује 95% удела инфрацрвеног зрачења које потиче од АГЈ (Donley et al., 2012). На слици је такође приказана СЕД крива за две различите вредности екстинкције $A_v = 0$ и $A_v = 2$, график горе и доле, респективно. Слика преузета из рада Донли са сарадницима, 2012, (Donley et al., 2012).

нија представља претходно коришћен *IRAC* критеријум за детектовање АГЈ (Lacy et al., 2007), као и степени закон у *IRAC* бојама које би имале галаксије са АГЈ (пуна црна линија са тачкама). Приказани су различити типови галаксија за различите црвене помаке и то: квадрат - *ULIRG* галаксије, звезда - звездородна галаксија, троугао - нормална спирална галаксија и круг - елиптична галаксија. Са слике можемо видети да галаксије код којих зрачење потиче чисто од процеса формирања звезда, генерално избегавају простор степеног закона у *IRAC* подручју, бар до црвеног помака $z < 1.5$. Међутим, чак и ове галаксије улазе у простор одређен *IRAC* критеријумом (Lacy et al., 2007) како на малим тако и на великим црвеним помацима. Са друге стране, како се крећемо ка црвеним помацима $z = 1.5$, галаксије које немају никакав удео АГЈ такође полако упадају у степени закон који одређује АГЈ, што значи да нам треба модификовани критеријум у овим подручјима, који ће нам дати нови Донли селекциони критеријум (Donley et al., 2012).

- *Донли селекциони критеријум*

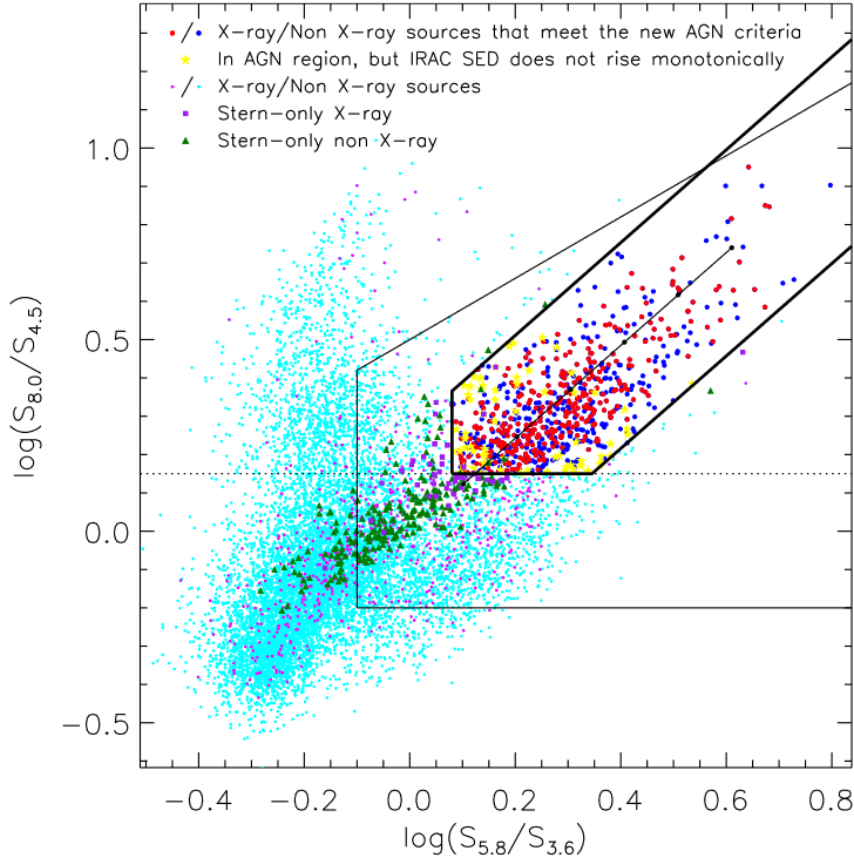
Као што је већ напоменуто, *IRAC* критеријум сигурно детектује само најсјајнија АГЈ. Са друге стране *IRAC* степени закон мора бити у потпуности усаглашен са СЕД кривом галаксије на инфрацрвеним таласним дужинама, што значи велику зависност од мерених флуксева на овим таласним дужинама, као и од прецизности истих. Грешке се углавном рачунају користећи програм *SExtractor*⁷, где се не укључују фотометријске грешке као ни шум неба (Gawiser et al., 2006; Warmby et al., 2006). Из овог разлога као додатак степеном закону у инфрацрвеном делу спектра, уводе се додатне несигурности од 3%, 5%, 10% и 15% на мерене вредности флуксева. Ово ће у АГЈ селекциони критеријум дефинисан *IRAC* степеним законом увести додатни простор око самог степеног закона у виду правоугаоника, чије делове можемо видети на слици 3.6 као две дијагоналне дебеле црне линије. Међутим, ни ово неће бити добра граница када посматрамо галаксије на великим црвеним помацима, које ће опет улазити у простор *IRAC* селекционог критеријума у плављем делу. Како бисмо избегли мешање галаксија са АГЈ и галаксија код којих зрачење потиче само од процеса формирања звезда неопходно

⁷*SExtractor* је програм који прави каталог објеката из астрономских слика. Иако је његова примена усмерена на дубоке прегледе неба, може се применити и на густа поља звезда. astromatic.net/software/sextractor/



Слика 3.5: Предвиђена боја АГЈ и чистих звездородних галаксија у *IRAC* простору боја за различите доприносе АГЈ (од 0% до 95%). Квадрат представља *ULIRG* објекте, звездом је представљена звездородна галаксија M82, нормална спирална галаксија означена је троуглом, а елиптична галаксија кругом. Ивице представљају *IRAC* критеријум дефинисан у раду Лејси са сарадницима, 2007, (Lacy et al., 2007), док је степени закон АГЈ, представљен правом линијом са тачкама у опсегу $\alpha = -0.5$ до $\alpha = -3$. Палета боја означава црвени помак галаксија. Иако галаксије у којима се формирају звезде генерално избегавају степени закон, оне улазе у простор АГЈ који је одређен *IRAC* критеријумом као што можемо видети на горњем левом панелу (Lacy et al., 2007). Слика преузета из рада Донли са сарадницима, 2012, (Donley et al., 2012).

је увести још једну границу која ће служити њиховом раздвајању а то је $\log(8.0\mu\text{m}/4.5\mu\text{m}) \geq 0.15$ (Coppin et al., 2010; Donley et al., 2012). Прерађен *IRAC* критеријум, који је назван Донли критеријум, који укључује све нове границе које смо поменули, приказан је на слици 3.6 дебелом црном линијом, и може се представити једначином 3.1, за специфичне густине флукса f у инфрацрвеном подручју (Donley et al., 2012).



Слика 3.6: Нови критеријум за одређивање галаксија које имају АГЈ - Донли критеријум (дебела црна линија), одрађен на *IRAC-COSMOS* узорку. Различите боје представљају различите луминозности у X-подручју спектра (видети рад Донли са сарадницима, 2012, (Donley et al., 2012) за више детаља).

$$\begin{aligned}
 x &= \log_{10} \left(\frac{f_{5.8\mu\text{m}}}{f_{3.6\mu\text{m}}} \right), y = \log_{10} \left(\frac{f_{8\mu\text{m}}}{f_{4.5\mu\text{m}}} \right), \\
 x &\geq 0.08 \wedge y \geq 0.15 \\
 \wedge y &\geq (1.21 \times x) - 0.27 \wedge y \leq (1.21 \times x) + 0.27 \\
 \wedge f_{4.5\mu\text{m}} &> f_{3.6\mu\text{m}} \wedge f_{4.5\mu\text{m}} > f_{4.5\mu\text{m}} \wedge f_{8\mu\text{m}} > f_{5.8\mu\text{m}}.
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.1.3 Моделовање СЕД криве АГЈ

У данашње време је опште позната чињеница да су АГЈ фаза и процеси формирања звезда изван језгра, повезани процеси и да потичу од истог механизма, а то је акреција хладног гаса (Vito et al., 2014; Delvecchio et al.,

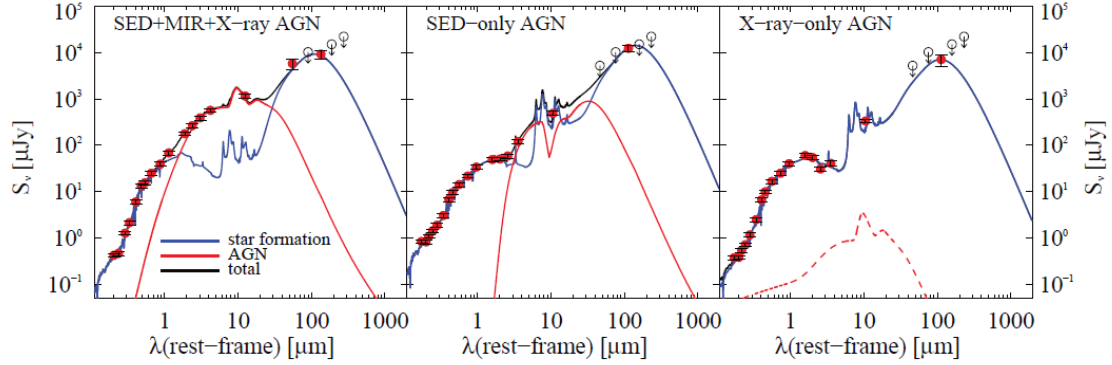
2017). Ову чињеницу у локалном Универзуму подржава проналазак корелације између масе црне рупе и физичких својстава саме галаксије, као што су радио и X - зрачење, али и масе халоа тамне материје (Gebhardt et al., 2000; Ferrarese, 2002; Gültekin et al., 2009), док у далеком Универзуму ова коеволуција се назире из сличности у расподели по црвеним помацима за средњу стопу формирања звезда и расподеле АГЈ који у оба сличаја показује максимум око црвеног помака $z = 2$ (Madau and Dickinson, 2014). Један од најмоћнијих алата за проучавање ове коеволуцију јесте радио-зрачење. Као што је раније било напоменуто, радио-зрачење се увелико користи за проучавање и праћење стопе формирања звезда у галаксијама, поготово на далеким црвеним помацима (Condon, 1992; Bell, 2003; Murphy, 2013; Wang et al., 2019). Са друге стране, централна супермасивна црна рупа која је главни извор за настајање АГЈ, јесте и извор снажних радио-млазева, што је један од главних потписа постојања АГЈ у галаксији (Hogan et al., 2015).

Радио-посматрања морају бити допуњена посматрањима на другим таласним дужинама, како би се открила права природа извора радио-зрачења. Потврда за потребом посматрања галаксије у другим подручјима спектра ради детектовања АГЈ долази нам и из радова Смолчић са сарадницима, 2009, и Бокарди са сарадницима, 2021, (Smolčić, 2009; Vossardi et al., 2021). У овим истраживањима нађене су две популације различитих врста АГЈ детектованих радио - посматрањима, класификованих на основу њихових ексцитованих линија у оптичком подручју спектра (O III, N II, O I и S II) преко индекса ексцитације (EI) који се дефинише као $EI = \log[OIII/H\beta] - 1/3(\log[NII]/H\alpha + \log[SII]/H\alpha + \log[OI]/H\alpha)$, а то су HERG (енг. *High-Excitation Radio Galaxies*) који имају $EI > 0.95$ и LERG (енг. *Low-Excitation Radio Galaxies*) са $EI < 0.95$. Анализом обе врсте АГЈ дошло се до закључка да се HERG углавном појављују код галаксија које настајују такозвану „Зелену долину” (енг. *Green Valey*), регион на оптичком/UV дијаграму привидних величина, који раздваја црвене пасивне и плаве активне галаксије. LERG се јављају у црвеним пасивним галаксијама. Ово је указало да се и у околним галаксијама одвијају другачији физички процеси који нападају централну црну рупу. Претпоставља се да се црна рупа код галаксија типа HERG напада хладним гасом који долази највероватније из прошлих судара са другом галаксијом, док се код LERG галаксија гориво за нападање црне рупе добија константним приливом гаса из атмосфере врелог халоа (Vossardi et al., 2021;

Mazoochi et al., 2022). Иако је ово само један од примера различитих физичких процеса који се одигравају у околној галаксији током различитих стадијума коеволуције са АГЈ, веома брзо је постало јасно да радио-посматрања морају бити допуњена посматрањима у другим деловима спектра (рендген, инфрацрвено зрачење), како бисмо били сигурни да ли посматрамо активну галаксију или галаксију са повећаном стопом формирања звезда.

Из поменутих разлога, али како бисмо и испратили и боље упоредили наше резултате са радом D17, осврнули смо се на додатни селекциони критеријум за детектовање АГЈ, који је детаљно описан у раду Делвекио са сарадницима, 2017, (Delvecchio et al., 2017). Као додатни индикатори постојања АГЈ на узорку посматраном у радио-подручју, узета су посматрања у X и инфрацрвеном подручју спектра. Идентификоване су две популације АГЈ и то HLAGN (енг. *moderate-to-high radiative luminosity AGN*) и MLAGN (енг. *low-to-moderate radiative luminosity AGN*). У првом случају АГЈ је идентификован на основу моделовања СЕД криве са додатним посматрањима у X и инфрацрвеном подручју спектра, где сваки од домена показује присуство АГЈ. На слици 3.7 показан је пример СЕД криве са различитим нивоом поклапања селекционих критеријума које смо до сада објаснили (Delvecchio et al., 2017). На свим графицима, црвени пуни кругови представљају фотометријске густине флуксева у посматрачком координатном систему, стрелице су горње границе (3σ) на Herschel таласним дужинама. Пуне линије представљају најбољи СЕД фит и за различити тип галаксија и то редом: црвена - АГЈ, плава - галаксија у којој зрачење потиче од процеса формирања звезда и црна - комбиноване криве.

На левом графику на слици 3.7 приказана је СЕД крива АГЈ у оптичком и инфрацрвеном делу спектра који је успешно детектован у X и средњем инфрацрвеном делу спектра као и декомпаративним фитовањем СЕД криве. Централни график приказује АГЈ детектован само фитовањем СЕД криве, такозвани АГЈ типа 2. Оваква АГЈ заиста не могу бити детектована у X - подручју спектра због дебелог „торуса“ прашине, али се такође погрешно класификују и Донли критеријумом јер он није најбољи када говоримо о луминозностима у X-делу спектра које узимају вредности мање од $L_x < 10^{44} \text{erg s}^{-1}$. Међутим, када говоримо о АГЈ која су у оптичком и инфрацрвеном делу спектра веома мало сјајна тако да њихова околна галаксија има веће луминозности од њих самих у овим подручјима, она не могу бити детектована ни



Слика 3.7: Три примера фитовања СЕД криве у оптичком и инфрацрвеном делу спектра HLAGN типа објекта, детектованих различитим критеријумом. Црвени пуни кругови представљају густине флуксева од оптичког до инфрацрвеног дела спектра, док су стрелице 3σ горње границе за густину флукса у инфрацрвеном подручју спектра. Пуне линије представљају најбољи фит криве за АГЈ (црвена), галаксију у којој се формирају звезде (плава) и комбиноване две криве (црна). Лево је АГЈ детектован у X, средњем инфрацрвеном делу спектра и фитовањем СЕД криве. Средњи график је АГЈ детектован само фитовањем СЕД криве, док је десни график АГЈ детектован само у X-подручју спектра. Празни кругови представљају 3σ горњу границу за густину флукса у овом подручју спектра. Слика преузета из рада Делвекио са сарадницима, 2017, (Delvecchio et al., 2017).

декомпозитном СЕД кривом ни Донли критеријумом, као што можемо видети на десном графику на слици 3.7.

3.1.4 Радио-зрачење активних галаксија

Радио-извори који нису детектовани ниједним од поменутих критеријума, нису сврстани у HLAGN објекте. Међутим, то не значи да код оваквих извора не постоји активност и акреција материје у црну рупу, већ да су их постојећи критеријуми заобишли из већ поменутих разлога. За овакве објекте, радио-посматрања представљају кључну тачку приликом детектовања. Како би се овакве галаксије означиле као активне галаксије, посматра се однос радио-луминозности на 1.4GHz ($L_{1.4\text{GHz}}$) и стопе формирања звезда (SFR_{IR}). Показало се да овај однос зависи од црвеног помака као:

$$\log \left(\frac{L_{1.4\text{GHz}}}{\text{SFR}_{\text{IR}}} \right)_{\text{excess}} = 21.984 \times (1+z)^{0.013}. \quad (3.2)$$

Из једначине 3.2 галаксије се класификују као АГЈ ако показују вишак луминозности, од оне која се очекује да долази од процеса формирања звезда, од преко 3σ у радио-подручју спектра (Delvecchio et al., 2017).

У нашем истраживању били су укључени сви описани критеријуми за детекцију галаксија са АГЈ, а из узорка су уклоњени и сви објекти који су претходно класификовани као HLAGN или MLAGN. Више детаља о коришћеном узорку биће дато у одељку 4.6.

3.2 Морфологија галаксија

Један од најзначајнијих аспеката приликом проучавања галаксија јесте њихова еволуција током космичких епоха. Многа истраживања су показала велику количину неправилних галаксија поготово на већим црвеним помацама $z > 1$, које не припадају ниједној групи галаксија са Хаблове виљушке (Madau et al., 1998; Bell et al., 2006). Овакав резултат је и очекиван јер се далеке галаксије посматрају у раним стадијумима своје еволуције у којима се стопа формирања звезда и стопа судара повећава у односу на ове параметре у локалном свемиру (Mortlock et al., 2013; Mundy et al., 2017; Ventou et al., 2017).

Параметри који се користе за одређивање морфологије галаксија су концентрација (енг. *concentration* - C) дефинисана у раду Чонслаис са сарадницима, 2003, (Conselice, 2003), асиметрија (енг. *asymmetry* - A) која је дефинисана у раду Чонслаис са сарадницима, 1997, (Conselice, 1997) и грудвичастост (енг. *clumpiness* - S) чија дефиниција се може наћи у раду Чонслаис са сарадницима, 2003, (Conselice, 2003). Ово су познати CAS параметри. Поред њих постоје и два параметра који се често користе у комбинацији са већ поменутима а то су Цини коефицијент (Lotz et al., 2004) и M_{20} параметар (Lotz et al., 2004). Цини коефицијент нам говори о расподели флукса по пикселима на слици галаксије а M_{20} нам показује расподелу 20% најсветлијих пиксела у галаксији. Предност код увођења додатна два параметра поред познатих CAS параметара јесте то што ни Цини коефицијент ни M_{20} не захтевају видљивост центра галаксије на оптичким сликама.

У нашем истраживању које ће укључивати морфолошке информације о галаксијама из узорка неће бити засебно одређивани морфолошки параметри галаксија, већ ће бити преузети из морфолошких каталога који постоје за

наш узорак галаксија, који ће бити детаљно објашњен у глави 4. Међутим како бисмо касније лакше разумели наше резултате, битно је описати сваки морфолошки параметар и начин његовог одређивања. Пре него што пређемо на детаљније објашњење сваког од поменутих параметара, осврнућемо се на класификацију галаксија по стадијумима судара, који могу у многоне утицати на вредности поменутих параметара, такозвани Тумров (енг. *Toomre*) низ (Toomre and Toomre, 1972).

3.2.1 Тумров низ - морфологија галаксија по стадијумима судара

Још седамдесетих година прошлог века, Алар и Јури Тумре илустровали су процес судара спиралних галаксија користећи оптичке слике оближњих галаксија (Toomre and Toomre, 1972; Toomre, 1977). Овај низ назван је Тумров низ, и приказан је на сликама 3.8 и 3.9. На првој слици (слика 3.8 лево) налазе се две галаксије (NGC5426/5427) које се полако приближавају једна другој. Наредна слика показује почетак самог судара и формирања дугачких репова, у питању су галаксије NGC4038/4039. Следећа слика показује галаксију NGC7252 која је по Тумровом низу завршила свој судар и формирање, али и даље можемо да детектујемо плимске репове. Наредне две слике (слика 3.9) показују постепен нестанак репова галаксија и формирање галаксије која се морфолошки класификује као неправилна галаксија (NGC3610), све до крајњег стадијума и формирања једне велике елиптичне галаксије (M89).

Самосталне галаксије пролазе кроз све поменуте стадијуме судара у временском периоду од око 500 милиона година, након чега је на оптичким сликама веома тешко детективати присуство плимских репова или неправилности. Као што можемо видети на сликама 3.8 и 3.9, изглед самих галаксија ће у великој мери зависити од тога у ком се стадијуму судара налазе, што може утицати на тачност параметара који се користе за морфолошко класификовање галаксија као што ћемо видети у наредним поглављима.



Слика 3.8: Оптичке слике оближњих спиралних галаксија које показују различите стадијуме судара по Тумровом низу. Имена свих посматраних галаксија налазе се одмах испод сваке слике. Сlike преузете са: www.archive.stsci.edu



Слика 3.9: Исти опис као и испод слике 3.8.

3.2.2 Концентрација

Концентрација C која се користи да се одреди централна густина расподеле зрачења у галаксији може се представити једначином 3.3 (Conselice, 2003):

$$C = 5 \times \log \frac{r_{80}}{r_{20}}, \quad (3.3)$$

где r_{80} и r_{20} представљају радијусе подручја које обухвата 80% и 20% зрачења галаксије, респективно. Другим речима, сваки радијус представља велику полуосу елипсе која садржи одређени проценат зрачења од укупног.

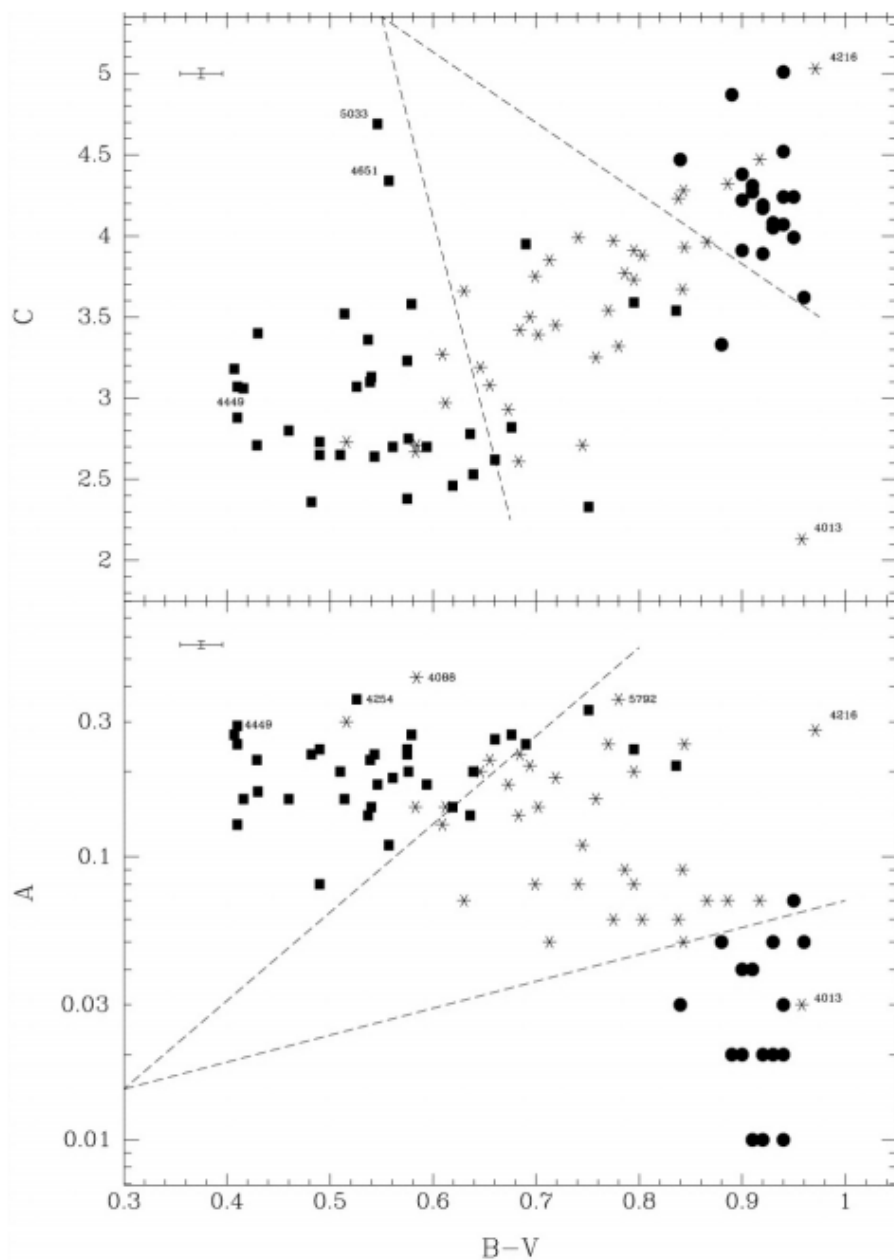
Истраживања су такође показала да постоји зависност између радиоспектралног индекса, концентрације и асиметрије (Bershady et al., 2000). Галаксије раног типа (енг. *early type galaxies*), односно елиптичне галаксије су лоциране према црвеном крају спектра и показују веће вредности концентрације, док су остале галаксије (спиралне) већином у плавом делу спектра и типично имају ниже вредности параметра концентрације као што можемо видети на слици 3.10 на горњем панелу. На овој слици је представљена зависност концентрације и асиметрије од B-V индекса боје, график горе и доле респективно. Морфологије галаксија у смислу елиптичних, спиралних/дисколиких и неправилних раздвојене су испрекиданим црним линијама. Различити типови галаксија приказани су различитим симболима и то: квадрат - неправилне или касне спиралне галаксије (по Хабловој виљушци Sc), звезда - нормалне спиралне галаксије (Sa, Sb) и круг - елиптичне галаксије (од E до So).

3.2.3 Асиметрија

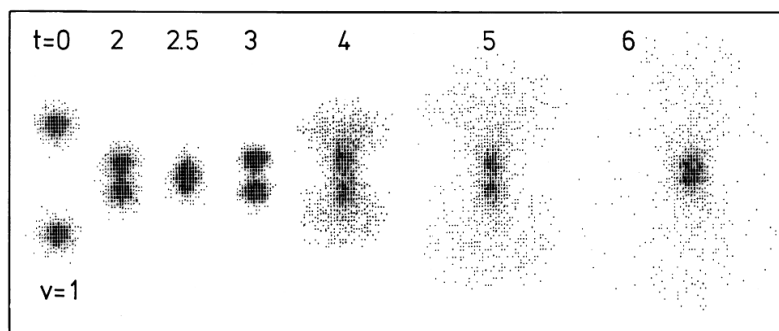
Асиметрија A је параметар који нам показује степен ротационе симетрије зрачења галаксије. Најпростије речено, овај параметар пореди интензитет флукса светлости на супротним крајевима галаксије. Параметар асиметрија се дефинише на следећи начин (Conselice, 1997):

$$A = \frac{\sum_{x,y} |I_{x,y} - I_{180(x,y)}|}{2\sum |I_{x,y}|} - B_{180}, \quad (3.4)$$

где је $I_{x,y}$ флукс у пикселу (x, y) а $I_{180(x,y)}$ флукс у пикселу $180(x, y)$, на слици окренутој за 180° око галактичког централног пиксела. Усредњена асиметрија позадине је B_{180} . Асиметрија може имати вредности од 0 до 1, где би 0 одговарала комплетно симетричној галаксији, односно свака тачка светлости имала би тачку идентичне јачине на истој удаљености од центра, ротирана за 180° . Вредности асиметрије 1 би представљала потпуно асиметричну галаксију, односно ниједна тачка светлости не би имала одговарајућу тачку истог интензитета. Ово значи да би елиптичне галаксије показивале висок ниво ротационе симетрије, спиралне галаксије нешто нижи, док би неправилне



Слика 3.10: Зависност концентрације (горе) и асиметрије (доле) од $B-V$ индекса боје. Испрекидане линије раздвајају различите морфологије галаксија (елиптичне, спиралне и дисколике галаксије и галаксије неправилног облика). Квадрати представљају галаксије које по Хабловој класификацији припадају касним спиралним галаксијама (Sc) или неправилним галаксијама. Симбол звезда означава галаксије које морфолошки припадају нормалним спиралним галаксијама (по Хабловој виљушци галаксије типа Sa и Sb), док кругови означавају галаксије које су класификоване као елиптичне (галаксије од E до So). Слика преузета из рада Бершеиди са сарадницима, 2000, (Bershady et al., 2000).

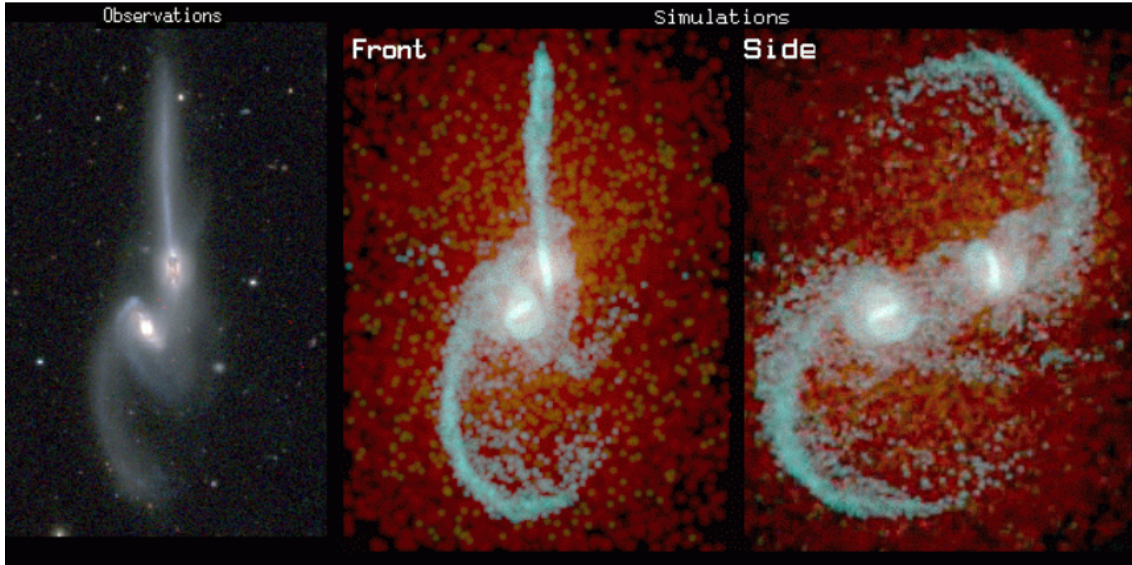


Слика 3.11: Директни судар две спиралне галаксије кроз седам различитих стадијума судара по Тумровом низу. Слика преузета из рада Тумре са сарадницима, 1977, (Toomre, 1977).

галаксије имале највеће вредности овог параметра и приближавале би се потпуно асиметричним галаксијама. Иако бисмо очекивали да ће параметар асиметрије бити користан приликом одређивања првих и средњих стадијума судара галаксија, како се крећемо ка већим црвеним помацима, због ниже резолуције, одређивање овог параметра је несигурније (Conselice et al., 2000).

Радови са почетка овог века су такође показали да галаксије које имају веће вредности концентрације углавном имају ниже вредности асиметрије (Bershady et al., 2000). Из овог разлога концентрација нам може послужити као маркер за проналазак раних стадијума судара галаксија, у којима долази до разарања на великим скалама. На слици 3.11 приказан је модел директног судара две спиралне галаксије (Toomre, 1977). Са слике можемо видети како ће се тачно мењати густина расподеле зрачења кроз 7 различитих стадијума судара две спиралне галаксије, што ће аутоматски утицати на параметар концентрације.

Параметар асиметрије, а у великој мери и параметар концентрације, зависиће са друге стране и од угла посматрања галаксије, поред стадијума самог судара. На слици 3.12 можемо видети пример различите расподеле зрачења галаксије NGC4676 када је посматрамо директно и када је посматрамо са стране. На приказу скроз десно, јасно можемо раздвојити две галаксије које се налазе у судару, док галаксије посматране директно показују потпуно другачију неправилну морфологију.



Слика 3.12: Приказ галаксије NGC4676 у оптичком делу спектра лево. Иста галаксија добијена у симулацији када је посматрамо директно и са стране. Симулација је урађена од стране Џоша Барнеса, Институт за астрономију Универзитета на Хавајима. Слика преузета са: courses.physics.ucsd.edu/2019/Winter/physics141/Lectures/Lecture1/Lecture1.html

3.2.4 Грудвичастост

За разлику од елиптичних галаксија које генерално имају глатку структуру, спиралне галаксије углавном имају грудвасту структуру. Како бисмо ово квантификовали уводимо нови параметар грудвичастост S који се дефинише као однос количине светлости садржане у једном подручју у односу на укупну количину светлости коју емитује галаксија. Овај параметар се рачуна по следећој једначини (Conselice, 2003):

$$S = 10 \times \sum_{x,y=1,1}^{N,N} \frac{(I_{x,y} - I_{x,y}^{\sigma}) - B_{x,y}}{I_{x,y}}, \quad (3.5)$$

у којој је $I_{x,y}$ јачина флука галаксије на пикселу (x, y) , а $I_{x,y}^{\sigma}$ је јачина флука на истом пикселу након редукције резолуције филтером ширине σ . $B_{x,y}$ представља вредност позадинског флука који на небу заузима исту величину подручја као и посматрана галаксија, а N је величина галаксије у пикселима.

Како елиптичне галаксије немају области у којима се формирају звезде и показују поприлично глатку структуру, вредност овог параметра је код њих најмања. Што се тиче стадијума судара галаксија, очекивали бисмо највећу вредност овог параметра када можемо да видимо једну галаксију која садржи два језгра, што значи касније стадијуме у интеракцији.

3.2.5 Џини коефицијент

Када је реч о Џини коефицијенту G , његово порекло води из економије у процени расподеле богатства међу становништвом и базира се на статистици према Лоренцовој криви (Lorenz, 1905). Међутим, овај коефицијент пронашао је примену и у астрофизици за рачунање расподеле осветљености пиксела на оптичкој фотографији галаксије. Лоренцову криву у економији дефинишемо као:

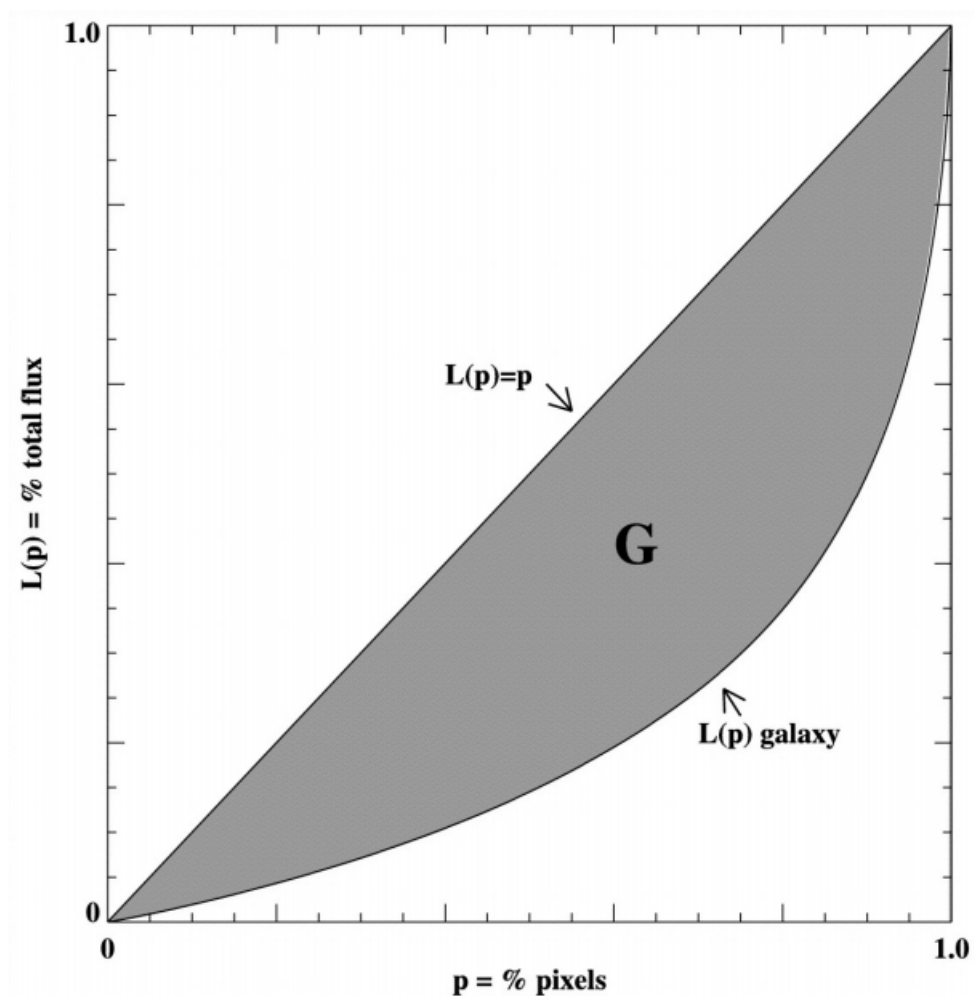
$$L(p) = \frac{1}{\bar{X}} \int_0^p F^{-1}(u) du, \quad (3.6)$$

где је p проценат најсиромашнијих грађана, односно у нашем случају проценат најтамнијих (најмање осветљених) пиксела на слици, $F(u)$ је функција кумулативне расподеле флукса. Средња вредност осветљености у односу на све пикселе осветљености X_i је \bar{X} , односно средња вредност богатства међу становништвом (Lorenz, 1905; Conselice et al., 2000). Однос површине између Лоренцове криве и криве једнаке расподеле где је $L(p) = p$ и површине испод криве једнаке расподеле представља Џини коефицијент (осенчан регион на слици 3.13). Један од примера приказан је на слици 3.13. Дата је расподела осветљености пиксела за галаксију NGC 4526 која има Џини коефицијент $G = 0.59$ (Lotz et al., 2004). Он нам говори да ли у одређеном делу слике постоје пиксели потпуно исте осветљености. Са друге стране, он нам може рећи колико је одступање од перфектно једнаке расподеле светлости међу свим пикселима на слици.

Џини коефицијент се рачуна употребом једначине 3.7 на одређене пикселе сортиране по интензитету осветљености:

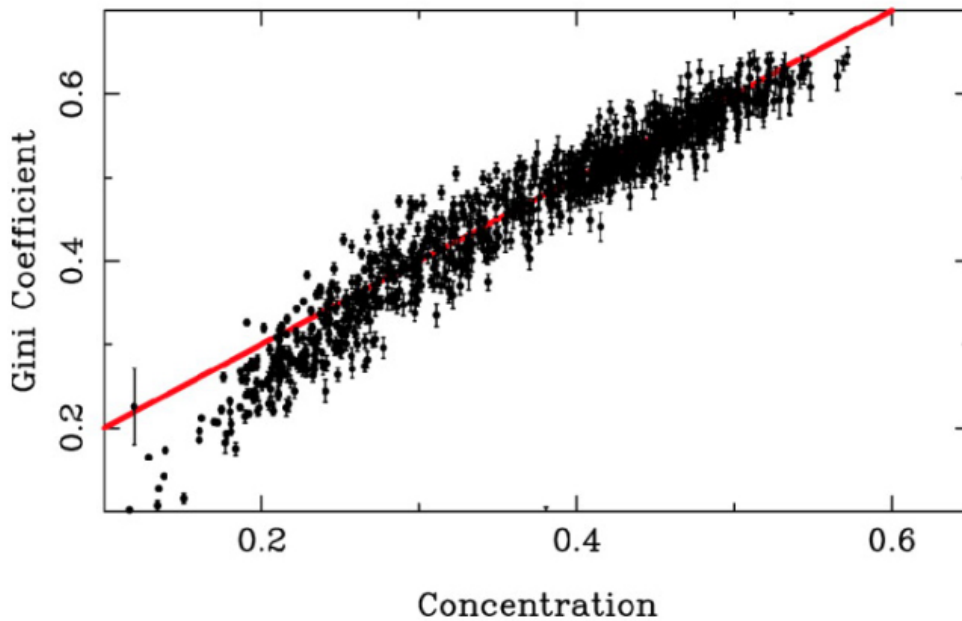
$$G = \frac{1}{\bar{X}_N(N-1)} \sum_i^N (2i - N - 1) X_i, \quad (3.7)$$

где је N број пиксела који заузима нека галаксија.



Слика 3.13: Лоренцова крива расподеле осветљености пиксела галаксије на оптичкој слици - $L(p)$ galaxy. Крива једнаке расподеле осветљености пиксела - $L(p) = p$ и Џини коефицијент за галаксију NGC 4536 приказан осенчаним регионом. Слика преузета из рада Лоц са сарадницима, 2004, (Lotz et al., 2004).

За галаксије у локалном Универзуму постоји корелација између Џини коефицијента и концентрације (Abraham et al., 2003), као што можемо видети на слици 3.14, што значи да овај коефицијент може бити користан на великим црвеним помацима и заменити употребу параметра концентрације. Како Џини коефицијент показује свеукупну глаткост у расподели осветљености галаксије, може послужити као моћан алат за проучавање судара галаксија. Због тога, један од главних циљева будућег рада биће да се одреди како се овај коефицијент мења кроз различите стадијуме судара галаксија.



Слика 3.14: Приказ корелације између Џини коефицијента и концентрације на узорку галаксија из локалног Универзума. Слика преузета из рада Абрахам са сарадницима, 2003, (Abraham et al., 2003)

3.2.6 Параметар M_{20}

За праћење просторне расподеле структура у галаксији као што су пречке, као и веома светла језгра галаксија, користан је и нормализовани моменат другог реда 20% флукса најсјајнијих делова галаксија, који ћемо од сада обележавати са M_{20} а дефинише се једначином 3.8:

$$M_{20} = \log_{10} \left(\frac{\sum_i M_i}{M_{\text{tot}}} \right), \sum_i f_i < 0.2 f_{\text{tot}}. \quad (3.8)$$

Параметар се рачуна тако што се хијерархијски сортирају пиксели оптичке слике галаксије по јачини флукса, затим се сумирају јачине флуксева у сваком пикселу помножене са квадратом растојања од центра галаксије M_i све док сума најсветлијих пиксела не достигне 20% јачине укупног флукса, и затим се нормира на укупни момент другог реда M_{tot} , који се дефинише као: $M_{\text{tot}} = \sum_i^N M_i = \sum_i^N f_i [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]$, где је централни пиксел означен у тачки (x_c, y_c) . У једначини 3.8, f_{tot} и f_i представљају укупну јачину флукса и јачину флукса сваког пиксела понаособ, респективно. Овај параметар може бити значајан за детекцију касних стадијума судара када је уочљива једна галаксија која садржи два језгра, и може бити осетљивији од параметра грудвичастости, пре свега јер је центар галаксије слободан параметар (Lotz et al., 2004). Такође, може бити користан за раздвајање делова галаксија који своје зрачење добијају од процеса формирања звезда од делова галаксија који су под утицајем плимских ударних таласа, у каснијим стадијумима судара галаксија.

Глава 4

Утицај интеракције галаксија на параметар ДИР корелације

У овој глави посветићемо се испитивању хипотезе да су интеракције између галаксија заслужне за виђену еволуцију ДИР корелације (D17). Већина галаксија у локалном Универзуму су морфолошки класификоване или као елиптичне галаксије или показују дисколику структуру. Међутим, постоји мали удео галаксија које не припадају ниједној од ових морфолошких класификација - такозване неправилне галаксије. У научној заједници је одавно прихваћено да су баш ове галаксије настале као последица судара или блиских пролаза између галаксија који су се десили у прошлости или се тренутно дешавају, као и да се број неправилних галаксија повећава како се крећемо ка већим црвеним помацима (Mortlock et al., 2013; Mundy et al., 2017; Ventou et al., 2017). Занимљиви резултати истраживања на првим подацима снимљених Џејмс Веб свемирским телескопом указују на веома велике заступљености дисколиких галаксија на великим црвеним помацима ($z \sim 3 - 6$), што је 10 пута више него што смо раније мислили (Ferreira et al., 2022). Ово указује на могућност да су судари галаксија имали максимум много раније у доста млађем универзуму. Ови прелиминарни резултати отварају нова питања у физици еволуције галаксија која ће своје одговоре добити у истраживањима које следе. И поред ових резултата, чињеница је да се број судара повећава како се крећемо ка већим црвеним помацима, а приликом судара галаксија долази до појаве плимских ударних таласа тада се електрони убрзавају у овим ударним таласима и емитују синхротронско радио-зрачење (Lisenfeld and Völk, 1993; Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015). Мотивисани

овим чињеницама, по први пут испитаћемо да ли би могући вишак нетермалног радио-зрачења код галаксија у интеракцији и све већи број оваквих система на већим црвеним помацама могао бити узрок снижавања параметра ДИР корелације како се крећемо ка већем црвеном помаку. Као индикатор интеракције узећемо неправилну морфологију галаксија. Пре него што кренемо са детаљном анализом и провером наше хипотезе, у поглављу 4.1 представићемо неколико модела еволуције ДИР корелације, базираних на интеракцијама, који су развијени у оквиру рада на овој докторској дисертацији, који би могли да објасне понашање корелације уочене у раду D17 који представљају теоријску основу да су интеракције између галаксија заслужне за овакво понашање ДИР корелације. У поглављима 4.2 и 4.3 описани су узорци коришћени у анализи, као и сама анализа, док су у глави 5 показани наши резултати, дискусија са претходним истраживањима као и планови за будући рад.

4.1 Модели еволуције ДИР корелације са црвеним помаком

Моделовање еволуције ДИР корелације са црвеним помаком заснива се на претпоставци да се q_{FIR} параметар разликује код неправилних система или код тренутно интерагујућих система (галаксије које су тренутно у судару и блиском пролазу), од параметра ДИР корелације у нормалним дисколиким галаксијама, што се може одразити на различиту вредност овог параметра одређеног на узорку у локалном Универзуму у односу на узорке на већем црвеном помаку. Код неправилних и интерагујућих система очекујемо нижу вредност параметра ДИР корелације због појачаног нетермалног радио-зрачења, док код дисколикних галаксија не очекујемо никакву промену овог типа. Како се очекује да удео неправилних галаксија расте са црвеним помаком (Mortlock et al., 2013), и овај параметар ће се мењати и имати различите вредности како мењамо црвени помак. У најопштијем случају, претпоставићемо да ће средња вредност параметра ДИР корелације \bar{q}_{FIR} одређена на узорку на неком црвеном помаку z еволуирати као:

$$\bar{q}_{\text{FIR}}(z) = \frac{\sum_i^N q_{i,\text{FIR}}}{N} = \frac{N_{\text{d}}q_{\text{FIR}}(z) + N_{\text{p}}q_{\text{FIR,p}}(z)}{N} = q_{\text{FIR}}(z) - \delta q_{\text{FIR}}(z) \frac{N_{\text{p}}}{N}, \quad (4.1)$$

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

где $q_{\text{FIR}}(z)$, представља вредност параметра ДИР корелације у неинтерагујућим галаксијама у којима се формирају звезде. Са $q_{\text{FIR,p}}(z)$ обележили смо средњу вредност параметра корелације код неправилних галаксија. Обе вредности параметра у општем случају могу зависити од црвеног помака z . Разлику између ова два параметра можемо написати као $\delta q_{\text{FIR}} = q_{\text{FIR}} - q_{\text{FIR,p}} = \log(1 + \frac{S_{1.4}}{S_{1.4,p}})$, где је $N = N_d + N_p$, а N , N_d и N_p су укупан број, број дисколикних и број неправилних галаксија (енг. *peculiar - P*), респективно. $S_{1.4}$ и $S_{1.4,p}$ су густина флуksа у радио-подручју на 1.4 GHz која потиче искључиво од процеса формирања звезда и од процеса интеракције, респективно. За тренутак ћемо претпоставити да удео неправилних галаксија у узорку има познату зависност од црвеног помака. Ове уделе ћемо у анализи узети из рада Мортлок са сарадницима, 2013, (Mortlock et al., 2013) где су они емпиријски одређени као: $f_d = 3.88(1+z)^{-3.30}$ је зависност удела дисколикних галаксија од црвеног помака. Удео неправилних галаксија (галаксије у судару и блиском пролазу) ћемо дефинисати као $f_p = 0.06(1+z)^{1.58}$. Даље посматрамо систем свих неправилних галаксија и галаксија које су тренутно у интеракцији, и обележимо овај модел као P модел. Из претходних једначина добијамо:

$$\frac{N_p}{N} = \frac{N_p}{N_p + N_d} = \frac{1}{1 + (N_d/N_p)} = \frac{1}{1 + (f_d/f_p)} = \frac{1}{1 + 64.7(1+z)^{-4.88}}. \quad (4.2)$$

У овом случају параметар ДИР корелације може да еволуира због процеса судара који ће изазвати формирање ударних таласа и убрзање честица, али и од појачаног процеса формирања звезда (Mortlock et al., 2013; Donevski and Prodanović, 2015). Проблем настаје јер ми не можемо јасно да дефинишемо који од ових процеса ће бити заслужан за еволуцију параметра корелације са црвеним помаком.

Са друге стране, можемо направити нови сет модела, који ће укључити само интерагујуће системе дати бројем N_p , и посматрати да само ови процеси утичу на еволуцију параметра корелације, и овај сет модела ћемо на даље обележавати као I-модел, и у овом случају ће важити: $N_p \equiv N_{\text{int}}$, а $\frac{N_p}{N}$ ћемо заменити са:

$$\frac{N_{\text{int}}}{N} = \frac{N_{\text{int}}}{N_{\text{int}} + N_d} = \frac{1}{1 + (N_d/N_{\text{int}})} = \frac{1}{1 + (f_d/f_{\text{int}})} = \frac{1}{1 + 3.6(1+z)^{-1.61}}, \quad (4.3)$$

где су сада f_d и f_{int} удели непертурбованих дисколикних и интерагујућих галаксија, респективно (Mortlock et al., 2013). Ови удели имају следеће облике:

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

$f_d = 0.90(1+z)^{-2.80}$ и $f_{\text{int}} = 0.25(1+z)^{-1.19}$. Поред тога што морамо моделе поделити у зависности од тога да ли узимамо само неправилне или неправилне и галаксије у судару, морамо одредити и да ли се и како мења параметар корелације са црвеним помаком код свих ових система посебно.

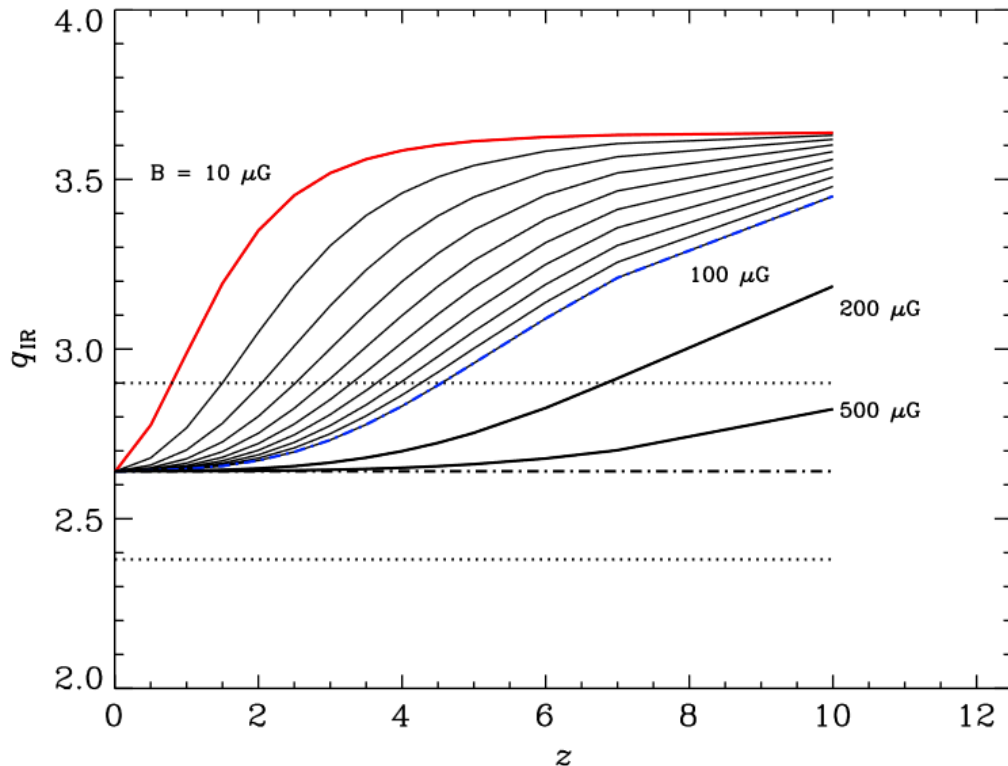
Као што смо већ објаснили, параметар корелације потиче од процеса формирања масивних звезда које утичу на емитовање и инфрацрвеног и радио-зрачења. Да би дошло до промене у овом параметру, мора доћи до промене у једној од компонената зрачења. На пример, повећана инфрацрвена емисија, може се очекивати од појачаног загревања прашине које би потекло од загревања ударним таласима који се формирају током судара галаксија (D15). Са друге стране, како чак и слабе интеракције доводе до појачавања међузвезданог магнетног поља и до 2 пута (Drzazga et al., 2011), очекујемо да ће приликом интеракција галаксија доћи до повећаног синхротронског зрачења. За почетак занемарићемо еволуцију магнетног поља, и посматраћемо магнетно поље које се од своје почетне вредности B_0 током интеракције појачало два пута $B \sim 2B_0$. У том случају имали бисмо константну промену параметра корелације $\delta q_{\text{FIR}} = q_{\text{FIR},0} - q_{\text{FIR},p} = q_{\text{FIR},0} - \log F_{\text{IR},p}/S_{\nu,p} = q_{\text{FIR},0} - \log F_{\text{IR},p} + \log[S_{\nu,0}(1 + \log S_{\nu,p}/S_{\nu,0})] = \log(1 + S_{\nu,p}/S_{\nu,0}) = \log(1 + (B/B_0)^2) \approx 1$. Са $F_{\text{IR},p}$ и $S_{\nu,p}$ смо обележили флуks инфрацрвеног и радио-зрачења код узорка неправилних и интерагујућих галаксија, респективно. Параметар $q_{\text{FIR},0}$ означава параметар ДИР корелације пре промене јачине магнетног поља. Овај модел обележићемо као модел *c*. Приликом интеракција између галаксија, до повећања синхротронског зрачења може доћи и због појаве нове популације космичких зрака који би били убрзани у плимским ударним таласима. Ово можемо повезати са уделом масе гаса f_{gas} која постоји у галаксијама који можемо моделовати у функцији од црвеног помака следећи (Santini et al., 2014): $\delta q_{\text{FIR}} = \log(1 + S_{\nu,p}/S_{\nu,0}) = \log[1 + f_{\text{gas}}(z)] = \log[1 + 0.045(1+z)^{1.31}]$. Овај модел ћемо обележити као модел *d*.

У овој дисертацији ћемо представити неколико могућности еволуције параметра ДИР корелације које ћемо анализирати посебним моделима. Моделе које ћемо разматрати у каснијој анализи биће они који се заснивају на интеракцији између галаксија као узроку еволуције параметра корелације са црвеним помаком. Такође, размотрићемо две врсте модела и то *I* моделе који ће садржати само интерагујуће галаксије и *P* моделе који ће поред галаксије које су тренутно у интеракцији садржати и неправилне галаксије. Обе врсте

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

модела имаће следеће подврсте:

- Модел *a*, где је q_{FIR} слободан параметар и промене овог параметра зависе само од његове стандардне девијације.
- Модел *b* где ћемо претпоставити да $q_{\text{FIR,p}}$ еволуира као $q_{\text{FIR,p}} = 4.14(1+z)^{-0.62}$, који је заснован на резултатима који ће бити представљени у одељку 4.3.
- Модел *c* где ћемо као узрок одступања параметра корелације приписати појачању магнетног поља приликом интеракција између галаксија где би дошло и до појачаног нетермалног радио-зрачења (Drzazga et al., 2011).
- Модел *d* где ћемо разматрати додатну популацију космичког зрачења које се убрзава у плимским ударним таласима приликом интеракција између галаксија што опет доводи до појачане синхротронске емисије (Mortlock et al., 2013; Murphy, 2013; Donevski and Prodanović, 2015).
- Модел *cB10* где ћемо претпоставити да параметар ДИР корелације може да еволуира и код нормалних дисколикних непертурбованих галаксија услед појачаног инверзног Комптоновог расејања ка већим црвеним помацима а самим тим и смањења радио-нетермалног зрачења, а за јачину магнетног поља у непертурбованој галаксији узећемо $B = 10\mu\text{Gauss}$ (Murphy et al., 2009; Drzazga et al., 2011; Mortlock et al., 2013). Овај случај је већ раније испитан у раду Мурфи са сарадницима, 2009, (Murphy et al., 2009), а његов модел ћемо ради поређења са нашим моделима приказати на слици 4.1. У овом моделу се претпоставља да ДИР корелација важи и на већим црвеним помацима, а како се густина енергије космичког позадинског зрачења повећава како се крећемо ка већим црвеним помацима, термална компонента зрачења ће преовладавати и доћи ће до повећања параметра ДИР корелације како се крећемо у прошлости. На слици су модели приказани за различите јачине магнетног поља од $10\mu\text{G}$ па све до $500\mu\text{G}$ и показују пораст параметра корелације са црвеним помаком, што је потпуно супротно од посматрачких резултата виђених у D17.



Слика 4.1: Модели еволуције ДИР корелације са црвеним помаком, услед инверзног Комптоновог расејања. Различите линије представљају различите јачине магнетног поља у самим галаксијама од $10\mu\text{G}$ па све до $500\mu\text{G}$. Тачка-црта линија је средња вредност параметра корелације са његовом стандардном девијацијом која је приказана тачкастим линијама. Слика преузета из рада Мурфи са сарадницима, 2009, (Murphy et al., 2009).

- Исти модел као и претходни, само ћемо овај ефекат убацити и у интерагујуће галаксије где ћемо код оваквих система претпоставити јачину магнетног поља у галаксији од $B = 20\mu\text{Gauss}$ (Drzazga et al., 2011). Овај модел назваћемо модел $B1020$.

На крају, размотрили смо и могућност да параметар ДИР корелације може да еволуира у неинтерагујућим дисколиким галаксијама због смањења нетермалног радио-зрачења услед инверзног Комптоновог расејања о космичко позадинско зрачење, чија се густина након црвеног помака $z > 3$ знатно повећава и губљење енергије космичког зрачења услед овог ефекта постаје значајно и приметно у односу на локални Универзум (Murphy, 2009). Узели смо у обзир две јачине магнетног поља у галаксијама и то $10\mu\text{Gauss}$ и $20\mu\text{Gauss}$.

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

У односу на то, направили смо моделе који дозвољавају еволуцију параметра ДИР корелације услед овог додатног ефекта као $q_{\text{FIR},\text{B10}} = 2.01 + 0.66(1+z) - 0.086(1+z)^2 + 0.004(1+z)^3$ и $q_{\text{FIR},\text{B20}} = 2.13 + 0.42(1+z) - 0.04(1+z)^2 + 0.0009(1+z)^3$. Сви параметри преузети су из рада Мортлок са сарадницима, 2013, (Mortlock et al., 2013). Ови модели биће означени као B модели. Ради појашњења, модел који је означен као IB1020 дозволио би еволуцију параметра q_{FIR} услед инверзног Комптоновог расејања, где би за нормалне, непертурбоване и неинтерагујуће галаксије јачина магнетног поља износила $B = 10\mu\text{Gauss}$, а за галаксије у интеракцији претпостављамо да се јачина магнетног поља дуплира. Сажетак свих модела и њихова нотација дата је у табели 4.1.

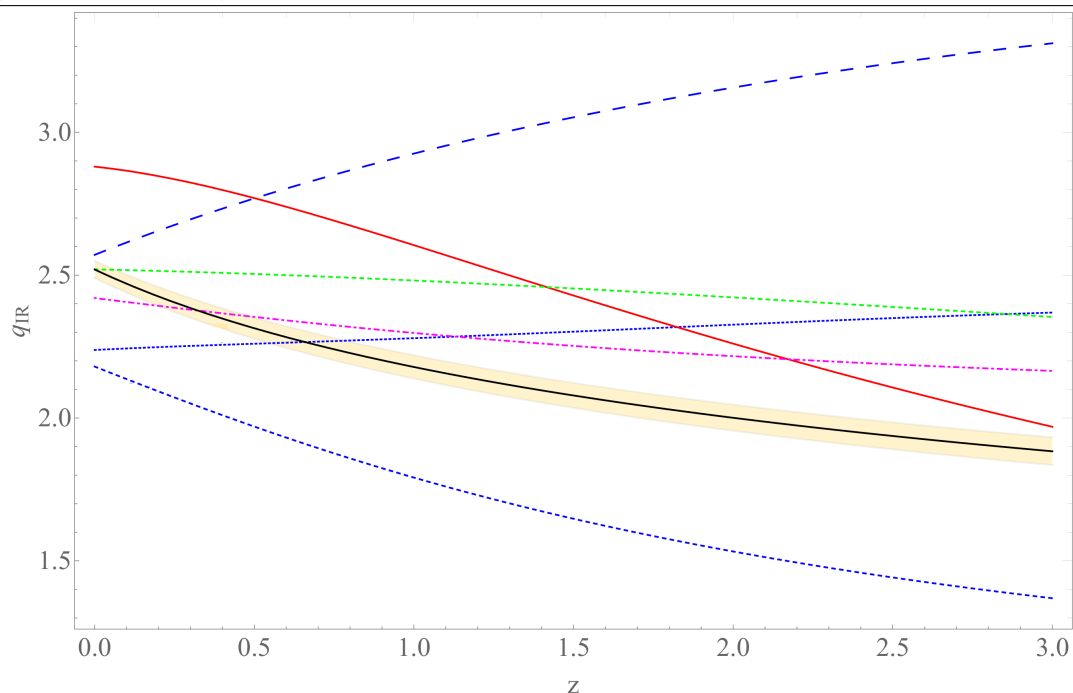
Назив модела	$\bar{q}_{\text{FIR}}(z)$	δq_{FIR}
Ia	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{int}}/N)$	$0.2q_{\text{FIR},0}$
Ib	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{int}}/N)$	$q_{\text{FIR},0} - 4.14(1+z)^{-0.62}$
Ic	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{int}}/N)$	$\log[1 + (B/B_0)^2]$
Id	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{int}}/N)$	$\log[1 + 0.045(1+z)^{1.31}]$
IcB10	$q_{\text{FIR},\text{B10}}(z) - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{int}}/N)$	$\log[1 + (B/B_0)^2]$
IB1020	$q_{\text{FIR},\text{B10}}(z) - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{int}}/N)$	$q_{\text{FIR},\text{B10}}(z) - q_{\text{FIR},\text{B20}}(z)$

Табела 4.1: Различити модели еволуције параметра q_{FIR} . Прва колона представља назив модела, друга је вредност $\bar{q}_{\text{FIR}}(z)$ као у једначини 4.1, док трећа колона представља различите изборе варијације параметра корелације. У овој табели модели почињу од I (интерагујуће галаксије) а криве су представљене на слици 4.2.

Назив модела	$\bar{q}_{\text{FIR}}(z)$	δq_{FIR}
Pa	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{p}}/N)$	$0.2q_{\text{FIR},0}$
Pb	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{p}}/N)$	$q_{\text{FIR},0} - 4.14(1+z)^{-0.62}$
Pc	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{p}}/N)$	$\log[1 + (B/B_0)^2]$
Pd	$q_{\text{FIR},0} - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{p}}/N)$	$\log[1 + 0.045(1+z)^{1.31}]$
PcB10	$q_{\text{FIR},\text{B10}}(z) - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{p}}/N)$	$\log[1 + (B/B_0)^2]$
PB1020	$q_{\text{FIR},\text{B10}}(z) - \delta q_{\text{FIR}}(N_{\text{p}}/N)$	$q_{\text{FIR},\text{B10}}(z) - q_{\text{FIR},\text{B20}}(z)$

Табела 4.2: Еквивалентан сет модела као и у претходној анализи, који смо означили са P , који претпостављају да промена параметра ДИР корелације не долази само од интерагујућих галаксија већ и од неправилних и они ће уместо N_{int}/N имати N_{p}/N приказани су на слици 4.3.

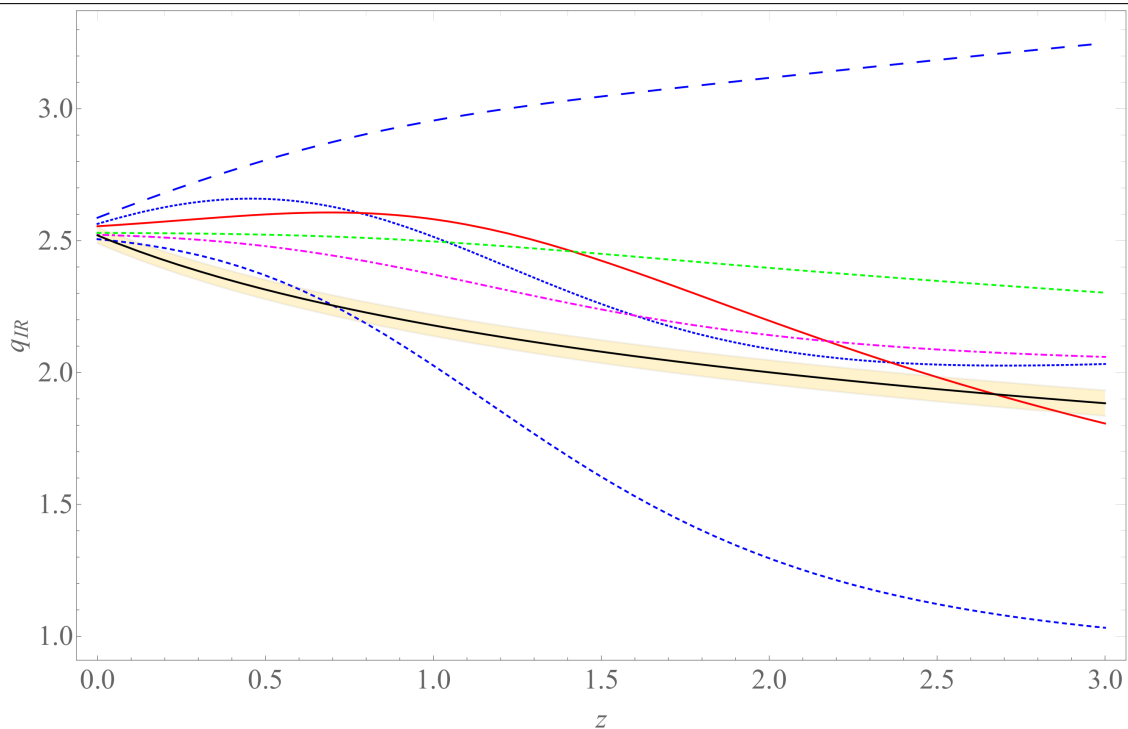
ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ



Слика 4.2: Модел еволуције \bar{q}_{FIR} са црвеним помаком у поређењу са еволуцијом пронађеном у D17 (пуна, црна линија са грешком фита приказаним осенчаним делом). Модели узимају у обзир да присуство интерагујућих галаксија води еволуцију ДИР корелације („I модели”). Различити модели су представљени следећим линијама (видети Табелу 4.1): Крупна испрекидана плава линија - модел IB1020; ситна испрекидана плава линија - модел Ic; тачкаста, плава линија - модел IB10c; пуна, црвена линија - модел Ib; цртачка розе линија - модел Ia; крупна, испрекидана зелена линија - модел Id, (Pavlović and Prodanović, 2019).

Као што можемо видети са слика 4.2 и 4.3, већина представљених модела, који се заснивају на улози утицаја тренутних (модел I_b и I_d) и прошлих интеракција између галаксија (модел P_a , P_b , P_c и P_d) на еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком, показују опадајући тренд параметра корелације како се крећемо ка већем црвеном помаку, док сви остали модели или показују слабу еволуцију ка већим црвеним помацима, или чак показују раст параметра ДИР корелације са црвеним помаком. Тренутне теорије о самом постојању ове корелације кажу нам да корелација не еволуира или да постоји могућност раста параметра корелације са црвеним помаком. У овој дисертацији смо по први пут представили ефекте који могу да доведи до опадања параметра ДИР корелације ка већим црвеним помацима (Pavlović and Prodanović, 2019), који је заправо пронађен на посматрачким подацима

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ



Слика 4.3: Исто као и на слици 4.2 само са претпоставком да еволуцију воде и неправилне и интерагујуће галаксије („P модели”). Различити модели су представљени следећим кривама (видети Табелу 4.1): Крупна, испрекидана плава линија - модел RB1020; ситна, испрекидана плава линија - модел Rc; тачкаста, плава линија - модел RB10c; пуна, црвена линија - модел Pb; црта-тачка розе линија - модел Pa; ситна, испрекидана зелена линија - модел Pd, (Pavlović and Prodanović, 2019).

у D17. Модел који је у највећем слагању са овим резултатима јесте модел Ia који је нацртан розе тачка-црта линијом на слици 4.2 који представља параметар ДИР корелације као слободан параметар код интерагујућих галаксија. Модели представљени на сликама 4.2 и 4.3 за чисте интерагујуће и за интерагујуће и неправилне галаксије респективно, базирани су на различитим узроцима који покрећу еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. Неки модели, поготово када говоримо о P моделима, показују веома слично понашање параметра ДИР корелације, што значи да ако будемо имали велико расипање на посматрачким подацима, биће веома тешко закључити који физички процеси доминирају у посматраним системима. Са друге стране, модели који укључују ефекте магнетног поља (с, B10 и B1020) показују велику

дивергенцију на већим црвеним помацима, што значи да можемо направити јасну разлику међу њима на посматрачким подацима. Оно што је битно нагласити јесте да наши модели не укључују никакве грешке, које у пракси могу бити веома велике и нетривијалне за одређивање. Ове грешке ће пре свега проистећи из тога што не можемо да знамо до ког нивоа ће се убрзавати честице у плимским ударним таласима који настају приликом интеракција галаксија. Као што смо већ нагласили, у моделима није укључена еволуција магнетног поља, што такође уводи несигурности у датим резултатима, као и непознаница колико се магнетна поља заправо појачавају у различитим типовима судара галаксија.

4.2 *AzTEC/COSMOS* узорак - тест узорак

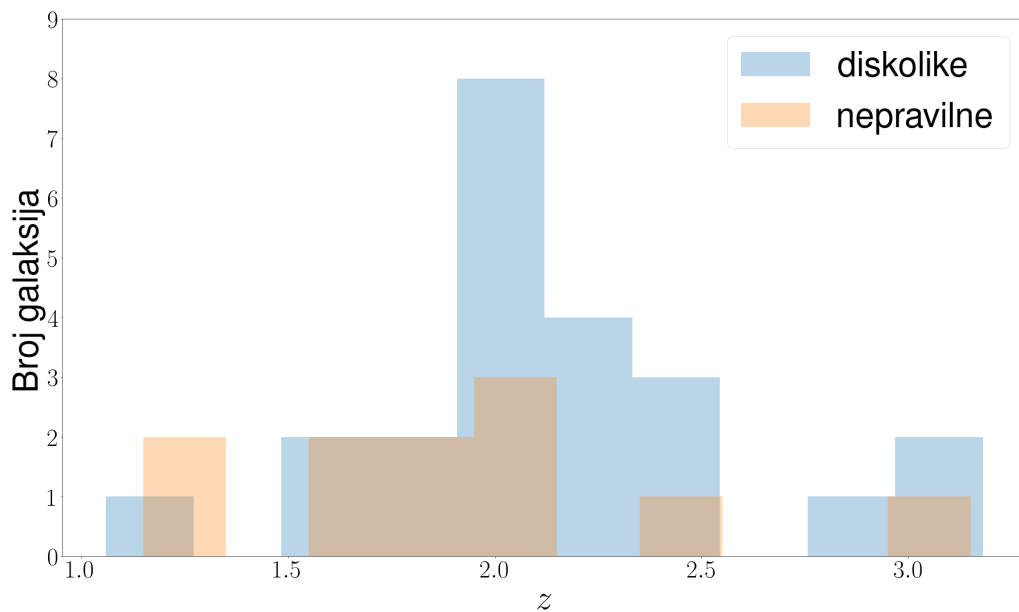
Да бисмо тестирали наше моделе, одлучили смо да пре свега испитамо нашу хипотезу да су галаксије у интеракцији заслужне за посматрану еволуцију ДИР корелације, на доступном узорку галаксија. Како је *COSMOS*¹ (енг. *The Cosmic Evolution Survey*) један од најдетаљнијих прегледа неба СМ галаксија на великим црвеним помацима које су посматране скоро свим свемирским телескопима и великим радио и оптичким телескопима на Земљи, одлучили смо да радимо са овим прегледом неба. Цело *COSMOS* поље заузима на небу 2 квадратна степена центрираних око координата: деклинација +2.20583333 и ректасцензија +150.11916667. За селекцију узорка узели смо део *COSMOS* прегледа неба, који је једино подручје у целом пољу снимљено у субмилиметарском делу спектра, *AzTEC* камером постављеном на *Atacama Submillimeter* телескопу. Овај узорак је претходно већ обрађен и може се наћи у радовима (Aretxaga et al., 2011; Miettinen et al., 2017). Одабрани узорак снимљен је као део *COSMOS* пројекта на простору од 0.72deg^2 , тј. 37.5% од укупног *COSMOS* поља. Цео узорак садржи 189 СМ галаксије које су снимљене у субмилиметарском делу спектра. Од укупног узорка смо пре свега избацили све галаксије које садрже АГЈ (65 објекта од укупног узорка), које су описане и класификоване као активне галаксије у раду Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017). Након тога, како бисмо имали што тачнију морфологију, желели смо да се задржимо само на галаксијама које по свим морфолошким параметрима показују чисту дисколику или неправилну

¹<https://cosmos.astro.caltech.edu/>

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

структуру. Морфологија галаксија је већ одређена и објављена у раду Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017) помоћу три морфолошка каталога (Tasca et al., 2009; Cassata et al., 2007). Након одбацивања активних галаксија и класификације галаксија по морфологији од укупног броја од 189 галаксија, узорак који ће бити анализиран садржи 34 СМ галаксије, од којих су 11 класификовано као неправилне (галаксије које су раније доживеле судар или блиски пролаз или се тренутно налазе у интеракцији), а 23 галаксије показују дисколику морфологију. Морфологија галаксија преузета је из рада Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017).

Црвени помаци галаксија такође су преузети из рада Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017), а одређени су фотометријском анализом. Расподела галаксија из одабраног узорка по црвеним помацима приказана је на слици 4.4 плавом бојом за галаксије које су морфолошки класификоване као дисколике и наранџастом бојом неправилне галаксије међу којима се налазе и галаксије С22а и С22б које представљају једине галаксије у нашем узорку од 34 галаксија које се налазе у судару.



Слика 4.4: Расподела галаксија из тест узорка од укупно 34 СМ галаксије по црвеним помацима. Дисколике галаксије су приказане плавим а неправилне наранџастим хистограмом.

Као што можемо видети са слике 4.4 у оба подузорка галаксија, недостају нам објекти који се налазе на црвеном помаку мањем од $z = 1$ што би могло да

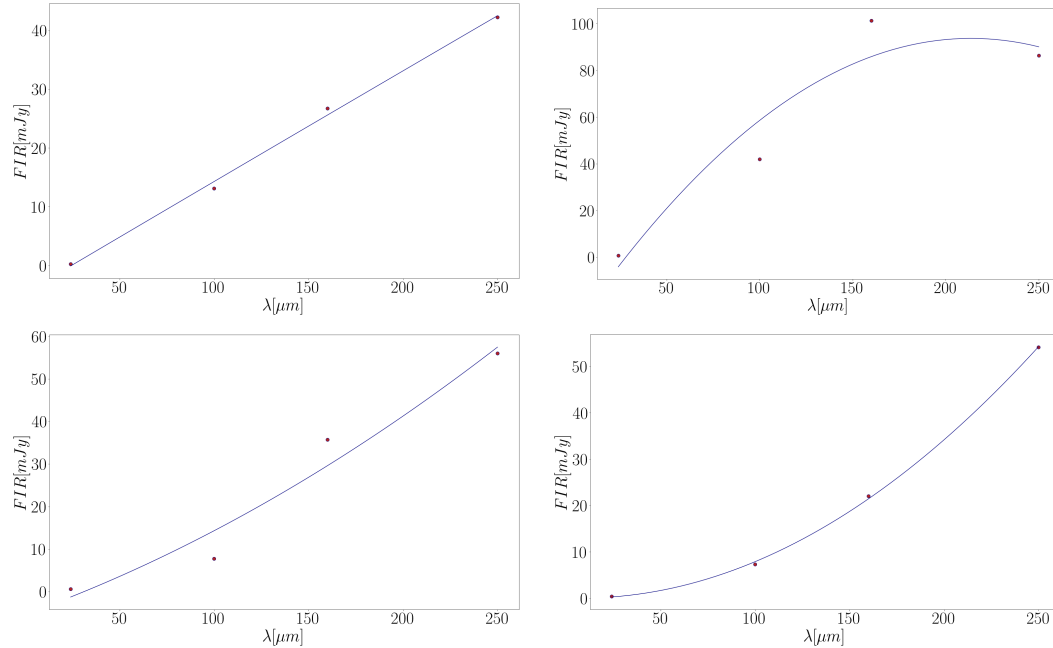
ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

утиче на нормализацију и резултате испитивања еволуције ДИР корелације, односно до појаве нетачних параметара ДИР корелације испод овог црвеног помака. Дискусију утицаја недостатка ових галаксија даћемо у одељку 4.4. И дисколике и неправилне галаксије имају средњи црвени помак $z \sim 2.5$ и не прелазе црвени помак $z \sim 3$, што је у сагласности са поставком наших параметарских модела описаних у претходном поглављу.

Након селекције узорка СМ галаксија, потребно је изабрати густине флуksева у инфрацрвеном и радио-подручју за рачунање параметра ДИР корелације. Узели смо диференцијалне густине флуksева на четири доступне таласне дужине у инфрацрвеном делу спектра и то на $24 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $160 \mu\text{m}$ и $250 \mu\text{m}$. Густине флуksева у инфрацрвеном делу спектра на четири поменуте таласне дужине узете су из Хершел посматрања а одређене као део PACS (енг. *Photodetector Array Camera and Spectrometer*) (Pilbratt et al., 2010) и HerMES (енг. *Herchel Multi-tiered Extragalactic Survey*) програма. Ови подаци преузети су из рада Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017).

Укупана густина флуksа у систему мировања у инфрацрвеном подручју је израчуната посебно за сваку галаксију помоћу њене СЕД криве коју смо добили фитовањем полинома другог степена на посматране четири таласне дужине. Примери СЕД крива за две дисколике и две неправилне галаксије из нашег тест узорка приказане су на слици 4.5. Интеграљењем криве у посматраном координатном систему у опсегу од $42\mu\text{m}$ до $122\mu\text{m}$ добијена је укупна густина флуksа у далеком инфрацрвеном делу спектра потребна за рачунање параметра ДИР корелације. За све рачунате величине (у овом случају укупна густина флуksа у далеком инфрацрвеном подручју спектра) посебно је сукцесивно увећана грешка коју смо рачунали као сукцесивно увећану грешку коришћењем тоталних диференцијала функције по свим мереним физичким величинама, и она је укључена у рачунање параметра корелације. Сви подаци потребни за наше истраживање налазе се у табели 4.2.

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ



Слика 4.5: Приказ СЕД криве за две дисколике (горе) и две неправилне (доле) галаксије из тест узорка. СЕД криве добијене су фитовањем полиномом другог степена на четири таласне дужине у овом делу спектра.

Густина флуksа у радио-подручју, на 1.4 GHz узета је из VLA (енг. *Very Large Array*) - COSMOS прегледа неба (Schinnerer et al., 2010; Aretxaga et al., 2011; Miettinen et al., 2017). Уз помоћ познатих радио-спектралних индекса које смо преузели из рада Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017), који су израчунати на основу посматрања на две таласне дужине (1.4 GHz и 3 GHz) урадили смо к-корекцију за све посматране флуksеве помоћу *kcorrect Python* пакета, и нове користили за даље рачунање параметра ДИР корелације користећи једначину 1.8.

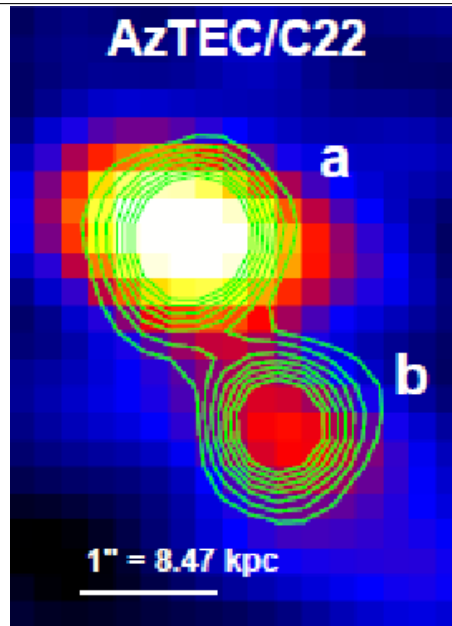
Од датих СМ галаксија, једино AzTEC/C22a и AzTEC/C22b представљају добре кандидате за системе у интеракцији (видети слику 4.6), па смо њих такође укључили у наш подзорак неправилних галаксија иако су у раду Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017) морфолошки класификоване као дисколике. Посматрања са ALMA телескопа на 1.3 mm, показала су присуство два веома светла језгра на удаљености од 13.8 kpc и која су спојена мостом радио-зрачења детектованим на 3 GHz.

Веома јасна бинарна структура ових галаксија указује на то да се оне можда налазе у средњем стадијуму судара који још увек није завршен, и је-

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР
ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

Извор	δ [°:':"]	a [h:m:s]	z_{phot}	$\alpha_{1.4\text{GHz}}^{3\text{GHz}}$	Тип	FIR [mJy]	$S_{1.4\text{GHz}}$ [μJy]	q_{FIR}
C2a	+02 34 41.05	09 59 59.33	3.18	-0.95 ± 0.32	диск	25.80 ± 12.68	102 ± 13	2.43 ± 0.28
C6a	+02 20 17.31	10 00 56.95	2.49	-0.76 ± 0.39	диск	13.39 ± 12.08	48 ± 12	2.58 ± 0.46
C13a	+02 14 08.43	09 58 37.97	2.01	-0.73 ± 0.13	диск	9.66 ± 4.25	144.2 ± 13.3	1.97 ± 0.21
C16b	+02 16 45.95	09 58 54.19	2.39	-0.99 ± 0.40	диск	8.61 ± 6.50	82.1 ± 13.8	2.02 ± 0.39
C18	+02 43 53.27	10 00 35.30	3.15	-0.82 ± 0.34	неп	16.45 ± 15.88	98 ± 16	2.34 ± 0.47
C22a	+02 40 10.90	10 00 08.94	1.60	-0.37 ± 0.27	неп	15.10 ± 13.65	132 ± 26	3.32 ± 0.15
C22b	+02 40 09.52	10 00 08.90	1.60	-0.94 ± 0.30	неп	6.13 ± 13.65	138 ± 26	1.67 ± 0.20
C23	+02 18 35.88	10 01 42.36	2.10	-0.73 ± 0.22	диск	10.77 ± 10.64	124.5 ± 13.9	2.02 ± 0.45
C24a	+02 22 24.42	10 00 10.36	2.01	-1.07 ± 0.37	диск	7.39 ± 6.83	99.6 ± 12.6	1.83 ± 0.46
C25	+01 56 43.57	10 01 21.95	2.51	-0.53 ± 0.54	диск	13.03 ± 11.38	70.2 ± 12.2	2.52 ± 0.45
C28a	+02 13 01.64	09 58 49.28	2.32	-1.43 ± 0.19	диск	9.04 ± 2.58	382.0 ± 52.1	1.17 ± 0.16
C32	+02 01 24.22	10 00 12.53	1.63	-0.28 ± 0.47	диск	12.50 ± 3.11	55.9 ± 10.9	2.73 ± 0.28
C33a	+02 31 40.77	10 00 27.14	2.30	-0.49 ± 0.34	диск	24.78 ± 2.76	67.3 ± 11.7	2.79 ± 0.17
C36	+02 05 14.58	09 58 40.29	2.41	-0.99 ± 0.21	неп	17.79 ± 2.45	167.6 ± 14.9	2.03 ± 0.13
C43a	+02 02 01.53	10 00 03.12	2.01	-2.15 ± 0.32	диск	7.48 ± 3.10	190 ± 47.9	1.04 ± 0.26
C46	+02 35 18.36	10 01 14.71	1.06	-1.01 ± 0.16	диск	7.44 ± 8.59	122 ± 12.4	1.78 ± 0.51
C47	+02 01 13.25	09 59 40.87	2.05	-1.49 ± 0.12	неп	7.17 ± 2.60	330 ± 32.4	1.10 ± 0.17
C52	+02 21 00.93	10 01 56.57	1.15	-0.92 ± 0.36	неп	15.74 ± 9.72	119.1 ± 15.4	2.15 ± 0.30
C59	+02 37 16.76	10 00 30.14	1.28	-1.19 ± 0.14	неп	16.84 ± 8.60	161.1 ± 14.6	1.95 ± 0.23
C65	+02 21 44.91	09 59 42.94	1.80	-0.91 ± 0.20	неп	15.68 ± 7.93	153.4 ± 12.1	2.05 ± 0.24
C66	+02 26 33.98	10 01 04.64	2.01	-0.66 ± 0.32	неп	12.55 ± 10.22	86 ± 11	2.33 ± 0.39
C67	+02 09 44.67	10 01 19.53	2.93	-0.92 ± 0.26	диск	6.95 ± 5.32	70 ± 12.3	2.03 ± 0.36
C72	+02 04 57.67	10 01 58.99	1.72	-0.84 ± 0.32	диск	10.75 ± 4.34	95.5 ± 13.7	2.12 ± 0.23
C77b	+01 57 59.20	09 59 35.30	3.06	-1.24 ± 0.30	диск	8.96 ± 10.23	69.1 ± 10.7	1.99 ± 0.52
C84b	+01 55 01.49	09 59 42.58	1.96	-0.65 ± 0.41	неп	8.96 ± 11.09	82.4 ± 10.9	2.20 ± 0.57
C93	+02 11 38.77	10 01 31.88	1.63	-0.57 ± 0.26	диск	7.38 ± 5.35	60.1 ± 11.1	2.30 ± 0.35
C97b	+02 19 42.84	10 02 14.50	2.01	-1.06 ± 0.76	диск	7.46 ± 3.85	55.1 ± 15.9	2.10 ± 0.46
C98	+02 05 19.03	10 00 43.18	1.82	-0.83 ± 0.40	диск	14.97 ± 8.09	77.8 ± 13.7	2.37 ± 0.31
C109	+02 28 40.89	10 01 11.56	2.20	-1.43 ± 0.75	диск	13.67 ± 6.35	59.1 ± 10.6	2.10 ± 0.51
C111	+02 12 43.97	09 59 29.23	2.10	-0.81 ± 0.27	диск	8.29 ± 6.16	66.7 ± 11.6	2.19 ± 0.36
C112	+01 53 14.06	10 00 11.03	1.89	-0.82 ± 0.23	неп	9.53 ± 10.23	121.8 ± 11.5	1.98 ± 0.48
C113	+02 29 60.00	09 59 14.40	2.09	-0.63 ± 0.11	диск	31.25 ± 48.98	173 ± 15.6	2.41 ± 0.68
C116	+02 03 46.43	10 01 09.85	2.20	-0.64 ± 0.27	диск	7.20 ± 11.91	58.9 ± 10.8	2.18 ± 0.73
C127	+02 35 27.32	10 01 25.33	2.01	-0.98 ± 0.15	диск	14.77 ± 9.77	131.1 ± 12.5	2.06 ± 0.30

Табела 4.3: Карактеристике 34 СМГ објеката. Колоне су следеће: (1): Име галаксије; (2) и (3): деклинација и ректасцензија (епоха J2000.0) узете из Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017); (4): фотометријски црвени помак; (5): радио-спектрални индекс одређен на основу посматрања на две таласне дужине (1.4GHz и 3GHz) преузети из рада Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017) (6): морфолошки тип галаксије, где диск и неп означава дисколике и галаксије које су неправилне или тренутно у интеракцији (енг. *peculiar-pes*), респективно (Miettinen et al., 2017). (7): густина флуksа у посматраном координатном систему од $42\mu\text{m}$ до $122\mu\text{m}$, израчунат на основу посматране густине флуksева на 4 таласне дужине ($24\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $160\mu\text{m}$ и $250\mu\text{m}$) узетих из Herschel посматрања (Pilbratt et al., 2010) (8): густина флуksа у радио-подручју на 1.4GHz узета из VLA COSMOS прегледа неба (Schinnerer et al., 2010; Aretxaga et al., 2011; Miettinen et al., 2017) (9): параметар q_{FIR} одређен из једначине (1.8).



Слика 4.6: Галаксије C22a и C22b снимљене ALMA телескопом на 1.3mm приказане бојама. На слици се види да се галаксије налазе у средњем стадијуму судара када се између њих формира мост од нетермалног радио-зрачења приказаног зеленим контурама и детектованог на 3GHz. Слика преузета из рада Миетинен са сарадницима, 2017, (Miettinen et al., 2017).

дан део нетермалне радио-емисије ових галаксија вероватно потиче од моста који се формирао између њих. Део зрачења вероватно потиче и од убрзања космичких зрака и у самим дисковима галаксија у којима постоје плимски ударни таласи (Murphy, 2013). Као засебне галаксије, обе су класификоване као дисколике. Међутим, како је наш циљ да истражимо да ли интеракција (прошла или садашња) може утицати на еволуцију ДИР корелације са првеним помаком, а и како бисмо били конзистентни са задатим моделима, ми смо класификовали ове галаксије као галаксије у интеракцији и убациле смо их у наш узорак неправилних галаксија.

4.3 Зависност ДИР корелације од морфологије галаксија

Како бисмо испитали зависност параметра ДИР корелације од морфологије галаксија, наш узорак од 34 СМ објеката смо поделили на два подузорка

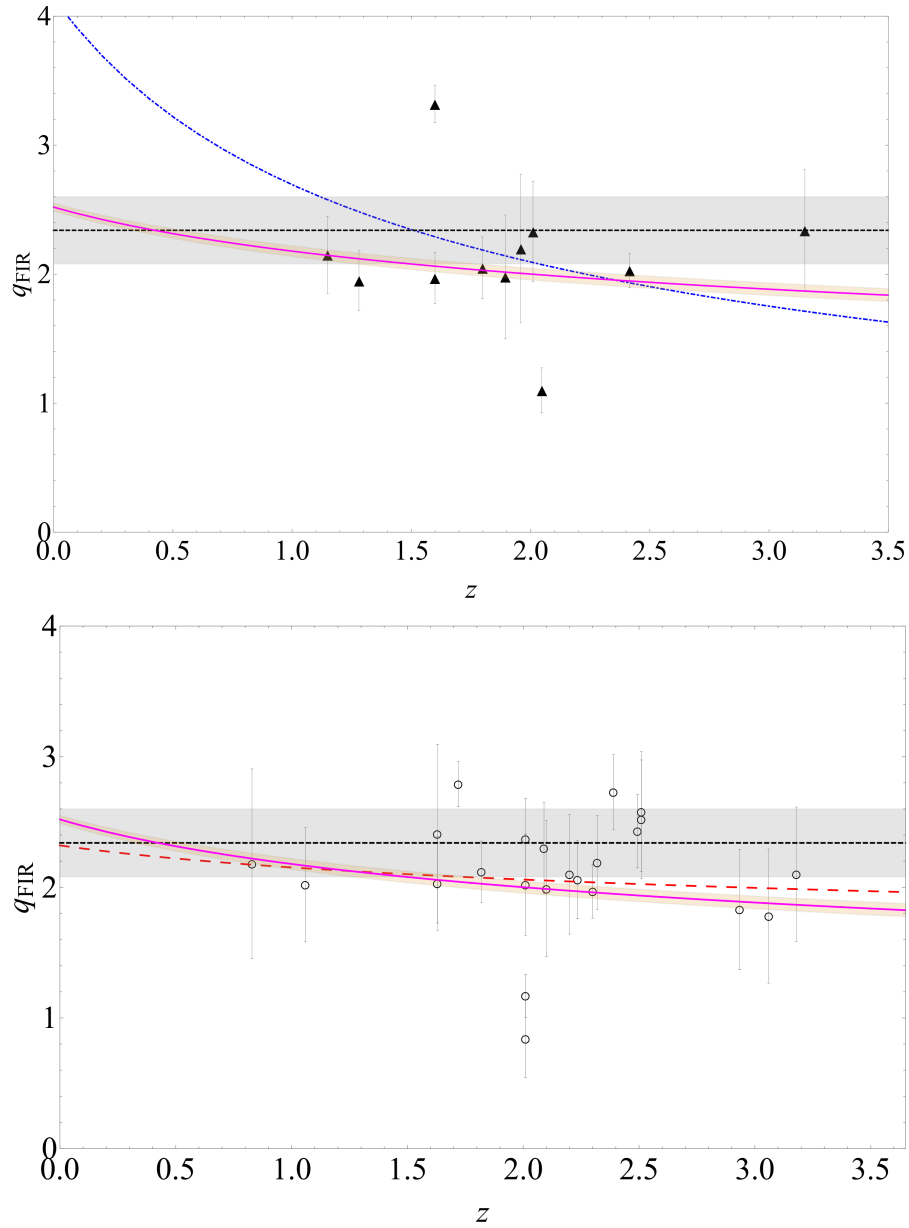
ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

на 11 неправилних (у којем су укључене и две интерагујуће галаксије С22а и С22b) и 23 галаксије које су по морфологији показивале дисколику структуру.

Пре свега, одредили смо средње вредности q_{FIR} параметра посебно за оба подузорка и резултати су следећи: $q_{\text{FIR},i} = 2.10 \pm 0.15$ и $q_{\text{FIR},d} = 2.12 \pm 0.09$ за неправилне и дисколике галаксије, респективно. Представљене грешке означавају сукцесивно увећану грешку параметра ДИР корелације коју смо рачунали преко тоталних извода функције по свим мереним и рачунатим величинама. Оно што је очигледно јесте да оба подузорка показују нижу вредност параметра у односу на стандардну вредност израчунату за локални Универзум од $q_{\text{FIR},0} = 2.34 \pm 0.01$ (Y01), с тим што је ова вредност нижа код неправилних галаксија, али показује и већу грешку. Са друге стране средња вредност параметра ДИР корелације за цео узорак од 34 СМ објеката је $q_{\text{FIR}} = 2.11 \pm 0.08$, где је грешка такође сукцесивно увећана, што је поново ниже од стандардне вредности параметра корелације, и у сагласности је са истраживањем D17.

Даље, испитали смо зависност параметра корелације q_{FIR} од црвеног помака z претпостављајући степени закон облика $q_{\text{FIR}}(z) = a(1+z)^b$ у складу са релацијом уоченом у раду D17, где је a нормализациони параметар а b је степени коефицијент. Оваква анализа извршена је на два подузорка засебно и резултати су приказани на слици 4.7.

Слика 4.7 садржи резултате посебно за неправилне (горе) и за дисколике галаксије (доле) у нашем узорку. Зависности параметра корелације од црвеног помака представљени су у виду степених закона и имају функције: $q_{\text{FIR}} = (4.14 \pm 2.85)(1+z)^{-(0.62 \pm 0.67)}$ (плава, тачка-црта линија), који уједно представља и наше b моделе описане у одељку 4.1 и $q_{\text{FIR}} = (2.32 \pm 1.21)(1+z)^{(-0.11 \pm 0.46)}$ за 11 неправилних и 23 дисколике галаксија, респективно. Иако оба узорка наизглед показују еволуцију параметра ДИР корелације са црвеним помаком, где је ова еволуција већа код неправилних галаксија, битно је нагласити да у склопу грешке ниједан од подузорка не показује значајну еволуцију, вероватно због статистички гледано малих узорака и због великих несигурности. Са друге стране, имамо недостатак података на црвеним помацима $z < 1$ што ће изазвати повећање и у константи самог фита a али и у степеном коефицијенту b , што ће дати нереалне вредности параметра ДИР корелације на овим црвеним помацима. Из тог разлога урађен је и линеарни фит за оба подузорка засебно, који је показао слично понашање и



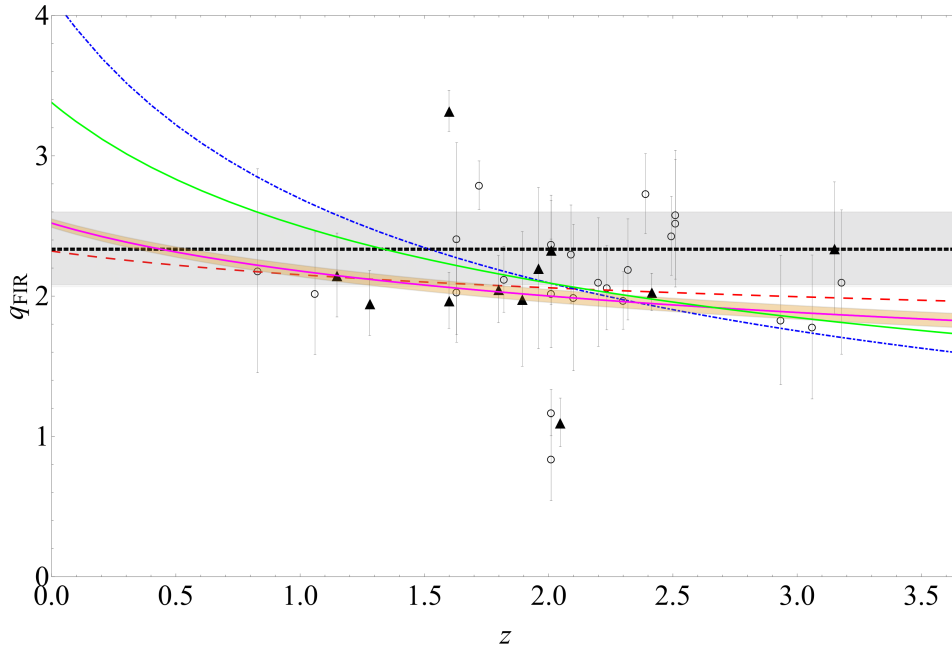
Слика 4.7: q_{FIR} у функцији од црвеног помака за доступан тест узорак. Горе: подузорак од 11 неправилних галаксија (црни троуглови) чија је зависност параметра ДИР корелације од црвеног помака у виду степеног закона фитована плавом, црта-тачка линијом. Доле: подузорак од 23 дисколикне галаксије (црни празни кругови) и њихов степени закон зависности $q_{\text{FIR}}(z)$ представљен црвеном испрекиданом линијом. Пуна, розе линија представља резултате рада D17, док је пуна, црна линија средња вредност параметра корелације из локалног Универзума $q = 2.34$ док сенчани регион представља његову стандардну девијацију $\sigma = 0.26$ (Y01).

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

опадање параметра корелације са црвеним помаком али са доста реалнијим вредностима: $q_{\text{FIR}}(z) = (3.05 \pm 0.96) - (0.47 \pm 0.49)z$ за неправилне галаксије и $q_{\text{FIR}}(z) = (2.16 \pm 0.68) - (0.05 \pm 0.32)z$ за дисколике галаксије. На крају, примењен је и Смирноф-Колмогоров тест који је показао да оба подзорка показују веома сличну расподелу што опет може произаћи из малог броја галаксија у подзорцима. Иако постоји могућност да оба подзорка галаксија имају еволуцију параметра ДИР корелације са црвеним помаком, због величине самих узорака она није потврђена као статистички значајна. Ови резултати објављени су у раду Павловић и Продановић, 2019, (Pavlović and Prodanović, 2019).

Како бисмо наше резултате што боље упоредили са радом D17, упоредили смо и зависност параметра корелације q_{FIR} од црвеног помака за цео узорак од 34 галаксије и резултати су приказани на слици 4.8. За разлику од подзорака, анализа на целом узорку галаксија показала је еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком, што указује на то да или оба узорка или бар један од њих представљају узрок ове еволуције.

На слици 4.8 је зеленом линијом приказан степени закон зависности $q_{\text{FIR}}(z)$ за цео узорак у виду $q_{\text{FIR}}(z) = (3.38 \pm 1.27)(1 + z)^{(-0.44 \pm 0.35)}$, и указује на еволуцију параметра ДИР корелације са црвеним помаком, што је у сагласности са радом D17. Битно је нагласити, да услед малог броја галаксија, а са друге стране великог расипања вредности параметра q_{FIR} , није могуће упоредити наше резултате са раније постављеним моделима. Међутим, модел који је највише у сагласности са резултатима јесте модел Ic, који се заснива на неправилним галаксијама које су у интеракцији, и које имају појачано магнетно поље услед интеракције, у којим деловима долази и до појачане нетермалне компоненте радио-зрачења, што је у сагласности са нашом првобитном хипотезом да ће интеракције галаксија водити еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. Дати график садржи и све остале линије које можемо видети на слици 4.7, као и податке које смо користили за неправилне галаксије (црни троуглови) и дисколике галаксије (црни празни кругови).



Слика 4.8: Зависност q_{FIR} од црвеног помака за 34 СМ галаксије из нашег узорка. Црни троуглови представљају неправилне галаксије исто као и на слици 4.7, док су црни празни кругови дисколике галаксије. Плавом тачка-црта линијом и црвеном испрекиданом линијом су представљени исти степени закони као и на слици 4.7. Зеленом пуном линијом је представљен степени закон зависности $q_{\text{FIR}}(z)$ за цео узорак од 34 галаксија, док је розе пуном линијом представљен резултат из рада D17. Црна испрекидана линија је стандардна вредност параметра $q = 2.34$, док је осенчани део његова стандардна девијација $\sigma = 0.26$ (Y01).

4.4 Интеракција и ДИР корелација - *COSMOS* узорак

Како бисмо наше истраживање утицаја интеракција галаксија на еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком испитали са мањом статистичком грешком, која аутоматски утиче на грешке самих фитоа а и на интерпретацију резултата, било је битно повећати узорак СМ галаксија. У овом случају и даље смо се држали *COSMOS* узорка, али смо овога пута прешли на цело *COSMOS* поље које на небу заузима 2 квадратниа степена центрираних око координате RA +150.11916667 (ректасцензија) и DEC +2.20583333 (деклинација). Поред статистички значајнијих резултата, хтели смо да наше истраживање проширимо и на галаксије на црвеном помаку $z < 1$ које су недостајале

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

у *AsTEC/COSMOS* тест узорку. Цело *COSMOS* поље садржи преко 2 милиона галаксија, међутим нису све детектоване галаксије биле погодне за наше испитивање. Пре свега желимо да узорак садржи само чисте СМ галаксије без утицаја активних галаксија које ће бити идентификоване и одстрањене коришћењем свих критеријума за детекцију АГЈ описаних у одељку 3.1, а затим ћемо захтевати да сваки објекат који укључимо у анализу има јасно одређену морфологију, што ће за већину галаксија у *COSMOS* пољу бити препрека коју је најтеже прескочити. Наредна поглавља садржаће информације о селекцији прикладних кандидата за анализу.

Галаксије из *COSMOS* поља су морфолошки класификоване у 3 каталога² свих објеката у пољу и то су *Tasca*, *Cassata* и *Zurich* морфолошки каталози (Cassata et al., 2007; Tasca et al., 2009; Scarlata et al., 2007; Sargent et al., 2007) одакле смо преузели вредности морфолошких параметара за сваки изабрани објекат. У одељку 4.6 објаснићемо како смо из целог узорка одстранили АГЈ. У ову сврху користили смо *COSMOS VLA 3GHz AGN* каталог³ (Smolčić et al., 2017a) одакле смо преузели класификацију активних галаксија. Црвене помаке свих галаксија преузели смо из *COSMOS2015 photometric redshift*⁴ каталога. Како бисмо израчунали параметра ДИР корелације, потребни су нам били подаци о густинама флуксева у инфрацрвеном и радио-подручју спектра. Диференцијални флуксеви у инфрацрвеном делу спектра преузети су из Хершел посматрања (Pilbratt et al., 2010) а детаљнији опис како смо рачунали укупну густину флукса у инфрацрвеном делу спектра биће дат у одељку 4.8. Радио-посматрања галаксија преузета су из *COSMOS VLA 3GHz Multiwavelength Counterpart* каталога⁵ (Smolčić et al., 2017b) на 3GHz, док смо густине флуксева на 1.4GHz преузели из *COSMOS VLA Deep* каталога (Schinnerer et al., 2010; Aretxaga et al., 2011). Детаљнији опис одређивања спектралног индекса коришћењем преузетих флуксева биће описан у одељку 4.8.

²irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-dd

³irsa.ipac.caltech.edu/data/COSMOS/

⁴ftp.iap.fr/pub/from_users/hjmcc/COSMOS2015/

⁵irsa.ipac.caltech.edu/workspace/TMP_CwN0o2_26042/Gator/irsa/5252/tbview.html

4.5 Морфологија галаксија

За одређивање морфологије галаксија из одабраног узорка користили смо три морфолошка каталога који покривају *COSMOS* преглед неба и то су *Tasca*, *Cassata* и *Zurich* морфолошки каталози (*Tasca et al.*, 2009; *Cassata et al.*, 2007; *Scarlata et al.*, 2007; *Sargent et al.*, 2007). Поред вредности сваког од морфолошких параметра који су објашњени у 3.2, сва три каталога садрже и морфолошки тип галаксије који је одређен на основу ових параметара. Све галаксије су класификоване у три групе: 1 - галаксије раног типа, 2 - дисколике галаксије и 3 - неправилне галаксије. Пре свега, избадили смо све галаксије које су класификоване као галаксије раног типа јер оне нису релевантне за наше истраживање, јер је у њима процес формирања звезда завршен у прошлости. Даље како бисмо одредили ком морфолошком типу припада нека галаксија, користили смо принцип мердевина (*Miettinen et al.*, 2017), што значи да ако је галаксија класификована као дисколика у бар два од три каталога, доминантну морфологију смо узели као тачну. За овакав приступ смо се одлучили како бисмо избегли још један параметар који би зависио од модела који користимо.

4.6 Детектовање и одстрањивање активних галаксија из узорка

Као што је већ наглашено у одељку 3.1, АГЈ показују повећано нетермално радио-зрачење, које ће се по природи разликовати од зрачења које нам долази од процеса формирања звезда те на тај начин присуство оваквих објеката у нашем узорку може у многоструко утицати на наше истраживање и контаминирати добијене резултате. Са друге стране, као што је то случај и са СМ галаксијама које су значајне за овај рад, и расподела АГЈ по црвеном помаку достиже свој максимум на црвеном помаку $z = 2$ (*Groom et al.*, 2001, 2004). Из ових разлога је од великог значаја да се узорак очисти од извора који садрже АГЈ. У ову сврху, користили смо *COSMOS VLA 3GHz AGN* каталог (*Smolčić et al.*, 2017a), у коме су овакви објекти идентификовани на основу 4 различита критеријума, у различитим деловима спектра (средњи инфрацрвени, X и радио), који су детаљно описани у одељку 3.1 (*Elvis et al.*, 2009; *Donley et al.*, 2012; *Civano et al.*, 2012; *Delvecchio et al.*, 2014; *Marchesi et al.*, 2016;

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

Smolčić et al., 2017a). Користили смо задату ректасцензију и деклинацију сваког објекта и упоредили са наведеним каталогом (дозвољено одступање преклапања у радијусу износило је $2''$), и избацили смо све галаксије које по било ком критеријуму показују присуство АГЈ, односно све објекте које су у овом каталогу класификоване и као HLAGN и као MLAGN.

Када смо описивали критеријуме који су коришћени у овом каталогу за детектовање АГЈ напоменули смо да ниједан од њих не може да детектује баш сваки објекат. То значи да контаминација нашег узорка АГЈ и даље могућа галаксијама које су заобишле сваки од критеријума и прошле у границама CM објеката. Са друге стране, један од циљева овог истраживања је да се испита резултат уочен у раду D17 те смо одлучили да останемо доследни и за нашу анализу смо користили исте каталоге приликом детекције АГЈ. У њиховој анализи урађена је и предикција удела АГЈ у узорцима CM галаксија, и дошли су до закључка да је тај број веома мали и занемарив, те да се не очекује значајна контаминација (D17). Са друге стране, као што је поменуто, за избацивање галаксија које садрже активно галактичко језгро у VLA 3GHz AGN каталогу коришћен је и критеријум заснован на повећању радио-емисије. То значи да смо на тај начин могли да избацимо и CM галаксије који имају вишак радио-емисије, а чије испитивање је циљ овог истраживања. То значи да ће се наш узорак смањити и то може да резултира ублажавањем ефеката евентуалне еволуције ДИР корелације са црвеним помаком, јер нећемо видети ни додатну нетермалну радио-компоненту зрачења која је резултат судара галаксија. На тај начин можемо да закључимо да је већа вероватноћа да смо одстрањивањем галаксија које су потенцијални АГЈ извори из узорка избацили и чисте CM галаксије које имају појачано нетермално радио-зрачење од процеса судара, него што је наш узорак контаминиран активним галаксијама. Иако је овај проблем реалан, како бисмо били сигурни да у нашем узорку не постоји ниједна активна галаксија, одлучили смо се за овај, конзервативнији приступ.

4.7 Фотометријски и спектроскопски црвени помаци

За све изворе у нашем узорку морали смо да нађемо црвени помак у циљу одређивања еволуције саме ДИР корелације ка већим црвеним помацима.

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

Овде долазимо до додатног проблема, јер како се крећемо ка младом свемиру, све теже је одредити спектроскопски црвени помак који је значајно тачнији од фотометријски одређених. Из тог разлога, ми смо одлучили да узмемо спектроскопски црвени помак за све изворе где је то било познато. Ови црвени помаци, одређени спектралном анализом, могу се наћи у *COSMOS spectroscopic redshift master*⁶ каталогу (Salvato et al. in prep), који су измерени у више прегледа неба као што су VUDS⁷ (енг. *The Visible Multi-Object Spectrograph Ultra Deep Survey*) преглед неба (Le Fèvre et al., 2015; Tasca et al., 2017) који покрива више од 10000 галаксија на црвеним помацима $2 < z < 6$, *zCOSMOS*⁸ преглед неба (Lilly et al., 2007) који садржи и црвене помаке $z < 2$ и садржи информације о црвеним помацима за преко 40000 галаксија из *COSMOS* поља, као и DEIMOS⁹ (енг. *DEep Imaging Multi-Object Spectrograph*) оптички спектрограф на Keck телескопу (Carpak et al. in prep). За објекте који немају измерене спектроскопске црвене помаке, узели смо фотометријске из *COSMOS2015 photometric redshift* каталога (Laigle et al., 2016).

На графицима 4.7, приказана је расподела спектроскопских (розе) и фотометријских (плаво) црвених помака у целом *COSMOS* пољу посебно за дисколикне (лево) и неправилне галаксије (десно). Као што се може видети, спектроскопски одређени црвени помаци постоје за веома мали број галаксија.

За већину галаксија које имају спектроскопски одређен црвени помак (z_s), имали смо и фотометријски (z_p). Код ових галаксија разлика између црвених помака износила је $z_s = z_p \pm 0.5$ што неће увести разлику која би утицала драстично на резултате па смо се због конзистентности одлучили да користимо и галаксије које имају одређен само фотометријски црвени помак.

Након елиминације активних галаксија и галаксија које нису прецизно морфолошки дефинисане, наш узорак се коначно састоји од 159 дисколикних и 44 неправилних галаксија. Како бисмо још више појачали статистичку значајност наших резултата, овом узорку додали смо и галаксије представљене у одељку 4.2, односно галаксије из првог тест узорака, тако да се коначни узорак који ћемо користити у даљој анализи састоји од укупно 237 галаксија од чега је 55 класификовано као неправилне а 182 галаксије су морфолошки дефинисане као дисколикне.

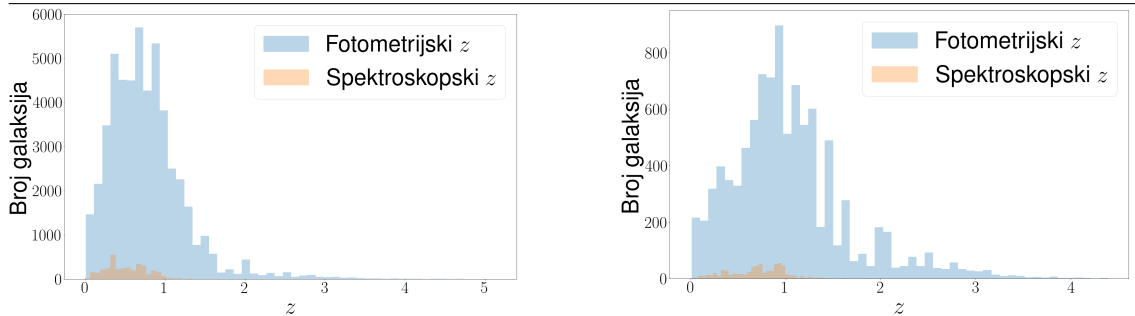
⁶<https://cosmos.astro.caltech.edu/page/specz>

⁷<https://cesam.lam.fr/vuds/>

⁸<http://cesam.lam.fr/zCosmos/>

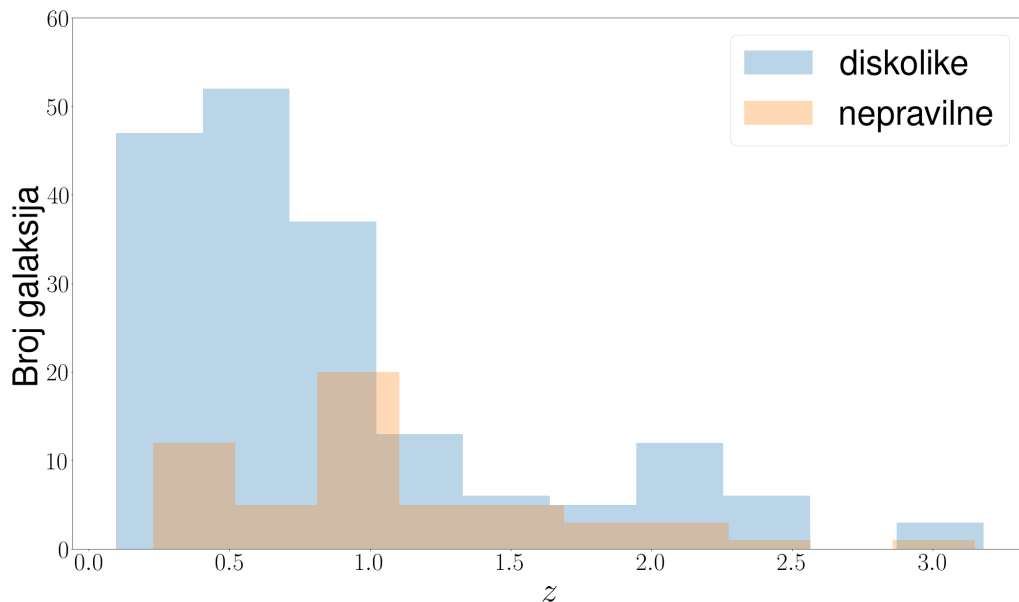
⁹<https://www2.keck.hawaii.edu/inst/deimos/>

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ



Слика 4.9: Расподела дисколикних галаксија (лево) и неправилних галаксија (десно) од црвеног помака са све галаксије из *COSMOS* поља које имају одређене црвене помаке међу којима се налазе и галаксије из нашег одабраног узорка. Плава боја представља фотометријске а роза спектроскопске црвене помаке.

На слици 4.10 можемо видети расподелу наших галаксија по црвеним помацима. Плавом бојом је приказано 159 дисколикних галаксија а розе бојом 44 неправилне галаксије. Расподела је приказана за фотометријски црвени помак за све галаксије из нашег узорка. Као што се може видети са слике 4.10, нови узорак допунили смо галаксијама које се налазе и на црвеном помаку $z < 1$.



Слика 4.10: Расподела узорка од 237 галаксија из *COSMOS* каталога који ће бити коришћен у анализи по црвеним помацима посебно за 159 дисколикних галаксија (плави хистограми) и за 44 неправилне галаксије (розе хистограми).

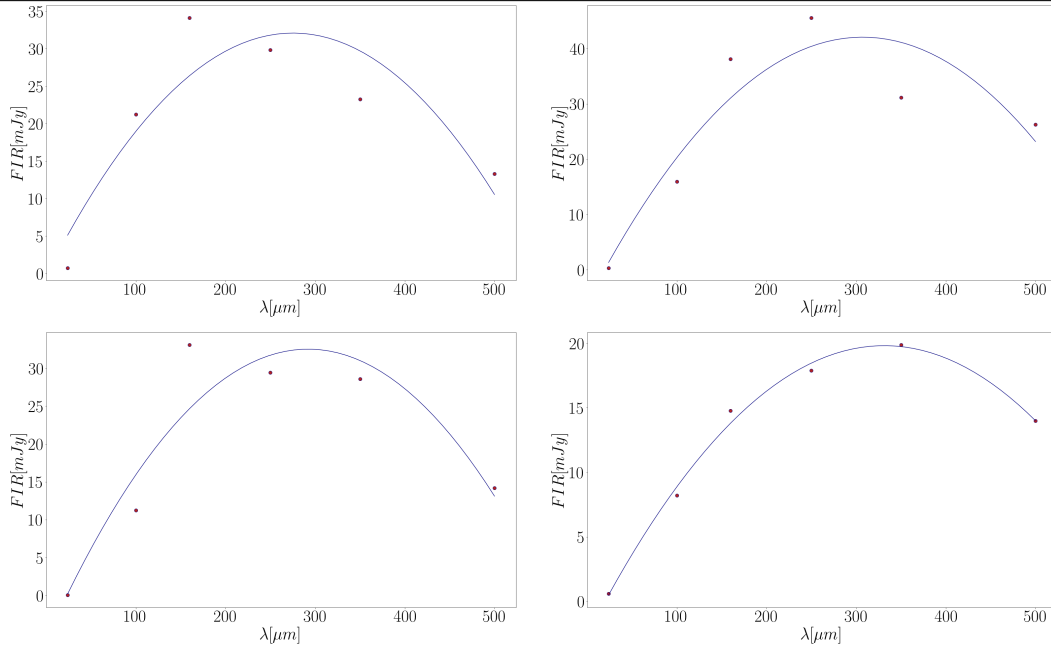
4.8 Одређивање густине флукса у инфрацрвеном и радио - подручју спектра

За одређивање укупног флукса у инфрацрвеном подручју спектра у новом узорку од 237 галаксија, проширили смо опсег у коме моделујемо СЕД криву, и додали смо још две таласне дужине, како бисмо регистровали и максимум термалног инфрацрвеног зрачења галаксија који нисмо могли одредити у првом тест узорку где смо СЕД криву фитовали само до $250 \mu\text{m}$. Сада су СЕД криве узорковане на следећем таласним дужинама: $24 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $160 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $350 \mu\text{m}$ и $500 \mu\text{m}$. Подаци су поново преузети из Хершел посматрања (Pilbratt et al., 2010) која су извршена као део PEP и HerMES програма (Lutz et al., 2011; Oliver et al., 2012). За сваку галаксију је посебно фитована СЕД крива на датим таласним дужинама, као и у одељку 4.2 полиномом другог степена, а укупан флукс зрачења у инфрацрвеном подручју је добијен интегралњем ове криве у далеком инфрацрвеном опсегу зрачења (од $42 \mu\text{m}$ до $122 \mu\text{m}$). Пример СЕД криве за две дисколике (горе) и две неправилне (доле) галаксије из нашег узорка приказан је на слици 4.11.

Пре него што смо наставили са даљом анализом, хтели смо да проверимо колику грешку би овакав начин рачунања густине флуксева увео, па смо проверили на галаксијама које имају већ одређене ове вредности из узорка који је описан у одељку 4.2. Разлике које су се јавиле код овако одређене густине флуксева су реда $100 \mu\text{Jy}$ што је $\sim 1\%$ од средње вредности густине флукса у овом подручју за све галаксије и притом је за ред величине мање од инструменталне грешке које добијамо приликом посматрања на овим таласним дужинама, што значи да наш метод неће увести значајне грешке приликом рачунања параметра ДИР корелације, где разлике буду око 0.03, што је поново за ред величине мање од његове стандардне девијације. На основу ових података, одлучили смо се да је полином другог степена за садашње истраживање, прихватљива апроксимација.

За одређивање параметра ДИР корелације, потребна нам је густина флукса само на 1.4GHz , и код галаксија где смо то имали само смо одредили кориговану вредност помоћу к-корекције и претходно одређених спектралних индекса, односно мерену густину флукса на датој фреквенцији поделили смо

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ



Слика 4.11: Приказ СЕД криве за две дисколике (горе) и две неправилне (доле) галаксије из *COSMOS* узорка. СЕД криве добијене су фитовањем полиномом другог степена на пет таласних дужина у овом делу спектра.

чланом $(1+z)^{(1+\alpha)}$ (Magnelli et al., 2015). У нашем случају то је било урађено за укупно 105 СМ галаксија. Као што можемо видети, анализа података у радио-подручју спектра захтева разматрање и коришћење радио-спектралног индекса. Радио-нетермално зрачење може да се опише степеним законом $S_\nu \sim \nu^\alpha$ где је S густина флукса на фреквенцији ν а α је радио спектрални индекс. Да бисмо из ове једначине добили вредности спектралног индекса, потребне су нам густине флукса на бар две таласне дужине (фреквенције). У овом случају користили смо густину флукса на 3GHz преузету из *COSMOS VLA 3GHz Multiwavelength Counterpart* каталога (Smolčić et al., 2017b), и густине флукса на 1.4GHz које се налазе у *COSMOS VLA Deep* каталогу (Schinnerer et al., 2010; Aretxaga et al., 2011). Све галаксије које су имале измерене густине флукса на 1.4 GHz имале су исте податке и на 3 GHz и за ове објекте је било могуће израчунати радио спектрални индекс.

За остатак од 109 галаксија из узорка које су имале измерену густину флукса само на 3GHz, било је потребно одредити густине флукса на 1.4GHz како бисмо израчунали параметар ДИР корелације. У ову сврху користили смо следеће релације:

$$L_{1.4\text{GHz}} = \frac{4\pi D_L^2}{(1+z)^{\alpha+1}} \left(\frac{1.4}{3}\right)^\alpha S_{3\text{GHz}}, \quad (4.4)$$

$$L_{1.4\text{GHz}} = \frac{4\pi D_L^2}{(1+z)^{\alpha+1}} S_{1.4\text{GHz}}, \quad (4.5)$$

где је D_L луминозна удаљеност до објекта, $L_{1.4\text{GHz}}$ и $S_{3\text{GHz}}$ су посматране луминозности и густина флуksа на датим таласним дужинама, респективно. Нагласићемо да смо за све рачунате величине израчунали сукцесивно увећање грешке посебно.

Из претходне две једначине можемо добити густину флуksа на 1.4 GHz ако имамо измерене густине флуksа на 3 GHz као:

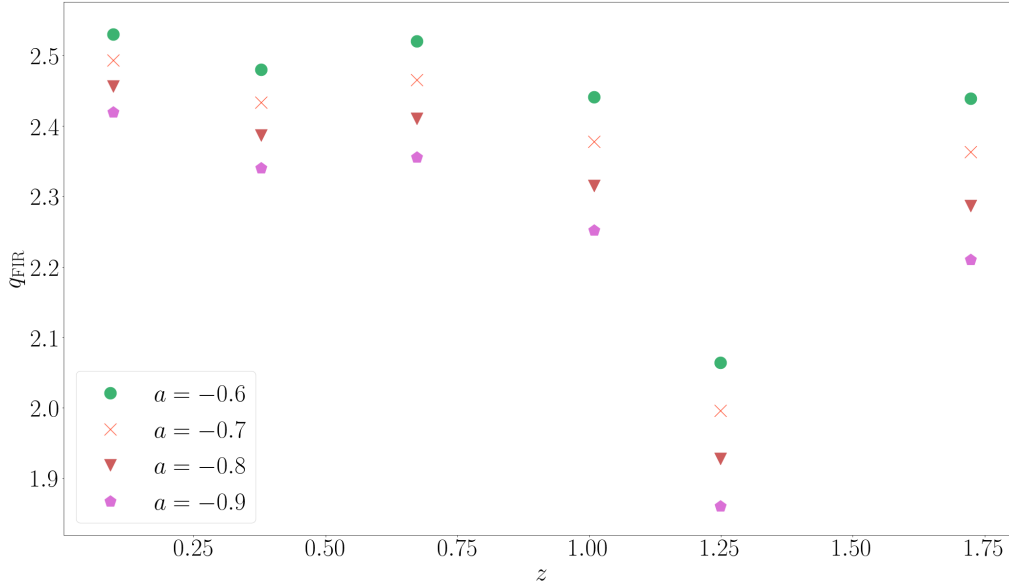
$$S_{1.4\text{GHz}} = \left(\frac{1.4}{3}\right)^\alpha S_{3\text{GHz}}. \quad (4.6)$$

Параметар ДИР корелације се у овом случају рачуна помоћу густине флуksа на 3 GHz помоћу једначине:

$$q_{\text{FIR}} = \log \left(\frac{F_{\text{FIR}}(1+z)^{(1+\alpha)}}{\left(\frac{1.4}{3}\right)^\alpha S_{3\text{GHz}}} \right). \quad (4.7)$$

Као што можемо видети из једначине 4.6 и у случају када имамо вредност густине флуksа само на 3 GHz, опет нам је потребан радио-спектрални индекс како бисмо израчунали потребне физичке величине. У овим случајевима, када немамо вредности густине флуksа на две фреквенције потребних за рачунање спектралног индекса, водећи се претходним радовима (D17) и општом праксом коришћења константне вредности овог параметра, користили смо константну вредност радио-спектралног индекса $\alpha = -0.56$ (Klein et al., 2018). Међутим, питање које остаје нерешено из овакве анализе, јесте да ли ће нам узимање константне вредности параметра α значајно утицати на резултате? Како бисмо ово испитали, нацртали смо зависност параметра корелације q_{FIR} од црвеног помака за различите вредности спектралног индекса и то $\alpha = -0.6$ (зелени кругови), $\alpha = -0.7$ (црвени иксеви), $\alpha = -0.8$ (бордо троуглови) и $\alpha = -0.9$ (љубичасти шестоугаоници), за 6 насумично одабраних галаксија из нашег узорка у опсегу црвених помака $0 < z < 1.75$, а резултате смо приказали на слици 4.12.

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ



Слика 4.12: Зависност $q_{\text{FIR}}(z)$ за различите вредности радио-спектралног индекса $\alpha = -0.6$ (зелени кругови), $\alpha = -0.7$ (црвени иксеви), $\alpha = -0.8$ (бордо троуглови) и $\alpha = -0.9$ (љубичасти шестоугаоници).

Са слике 4.12 можемо видети да већ на црвеном помаку $z = 1.75$ долази до промене параметра ДИР корелације од $q_{-0.9} = 2.21$ до $q_{-0.6} = 2.42$ за екстремне вредности радио-спектралног индекса, што представља варијацију од $\sim 9\%$ од стандардне вредности и излази из стандардне девијације параметра корелације. Са друге стране, веома ниска вредност радио-спектралног индекса која је коришћена у ранијим истраживањима ($\alpha = -0.7$, D17), даће природно ниже вредности параметра ДИР корелације од његове стандардне вредности у Локалном свемиру, што очигледно може бити заслужно за појаву привидне еволуције ДИР корелације ка већим црвеним помацима. Скорашњи рад на СМ објектима (Klein et al., 2018), указује да у овим системима радио-спектрални индекс нема толико ниске вредности већ да је његова средња вредност око $\alpha = -0.56$, што би на крају дало веће вредности параметра ДИР корелације. Из овога можемо закључити да ће узимање константне вредности радио-спектралног индекса, поготово ниске вредности, само по себи повући еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком.

Нажалост, велики део нашег узорка нема густине флукса на две фреквенције у радио-подручју, те да не бисмо губили на статистици, за 109 галаксија из нашег узорка, што представља 46% од укупног узорка галаксија, претпоставили смо константну вредност овог параметра, само што смо за

ГЛАВА 4. УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈЕ ГАЛАКСИЈА НА ПАРАМЕТАР ДИР КОРЕЛАЦИЈЕ

разлику од истраживања D17, где је вредност спектралног индекса износила $\alpha = -0.7$, узели нову вредност $\alpha = -0.56$ из рада Клеин са сарадницима, 2018, (Klein et al., 2018). Средњи спектрални индекс код галаксија где смо могли да га одредимо (54% од укупног узорка) у нашем случају износи $\alpha = -0.59 \pm 0.03$ што је много ближе константној вредности коју смо узели из рада Клеин са сарадницима, 2018, (Klein et al., 2018), него вредности која је раније коришћена у раду D17.

Глава 5

Резултати и дискусија

У претходном поглављу описан је проширен узорак од 237 СМ галаксија преузет из *COSMOS* прегледа неба. Детаљно је описано одређивање морфологије галаксија која је коришћена као индикатор судара између галаксија. Такође, описани су и коришћени критеријуми за детекцију и одстрањивање АГЈ, која могу утицати на наше резултате. Описано је и како смо одредили густине флуксева у инфрацрвеном и радио подручју спектра које смо користили за рачунање параметра ДИР корелације. У овој глави показаћемо резултате које смо добили на проширеном узорку од 237 галаксија. Поред разматрања ових резултата приказаћемо и резултате за подзорак који ће садржати галаксије само на црвеним помацима $z < 1$. Наиме, у анализи тест узорка (одељак 4.2) један од највећих проблема је био везан за недостатак галаксија на црвеним помацима $z < 1$, што јесте једна од најзначајнијих разлика коју смо увели у каснијем истраживању. Иако су галаксије на малим црвеним помацима бројне и лакше их је посматрати и анализирати, одлучили смо да први прелиминарни узорак буде чист АзТЕС узорак, без додавања нових галаксија, јер би то увело додатне грешке у резултатима због различитих инструмената којима су галаксије посматране што би дало и различите инструменталне грешке. Из тог разлога, сада ћемо приказати резултате из новог проширеног узорка галаксија, за подзорак галаксија на црвеним помацима $z > 1$ и за цео распон црвених помака $0 < z < 3.5$.

У случају целог проширеног узорка од 237 галаксија, средња вредност параметра ДИР корелације износи $q_{\text{FIR}} = 2.34 \pm 0.30$, док за подзорак који обухвата галаксије на $z > 1$, ова вредност износи $q_{\text{FIR}(z>1)} = 2.21 \pm 0.36$. Када се вратимо подзорцима галаксија одређених на основу морфологије,

Дисколике галаксије	Неправилне галаксије
$\log(M_*/M_0) < 10.5$	
$q_{-1\sigma} = 2.19$	$q_{-1\sigma} = 1.97$
$q_{\text{median}} = 2.46$	$q_{\text{median}} = 2.21$
$q_{+1\sigma} = 2.65$	$q_{+1\sigma} = 2.42$
$\log(M_*/M_0) > 10.5$	
$q_{-1\sigma} = 2.15$	$q_{-1\sigma} = 1.93$
$q_{\text{median}} = 2.38$	$q_{\text{median}} = 2.34$
$q_{+1\sigma} = 2.56$	$q_{+1\sigma} = 2.53$

Табела 5.1: Медијана физичке величине q_{FIR} са 1σ одступањем посебно за дисколике и неправилне галаксије, за два различита опсега звезданих маса како бисмо касније наше резултате упоредили и са новијим истраживањем D21.

средња вредност параметра ДИР корелације износи $q_{\text{FIR}} = 2.34 \pm 0.30$ и $q_{\text{FIR}} = 2.19 \pm 0.34$, за дисколике и неправилне/интерагујуће галаксије, респективно. Као додатак, одредили смо и медијану параметра q_{FIR} са 16% и 84% одступања, посебно за два распона звезданих маса $10,5 < \log(M_*/M_0) < 10.5$, код целог узорка галаксија. Ова гранична вредност је узета као средња вредност звезданих маса галаксија у целом узорку. Резултати су сумирани у табели 5.1.

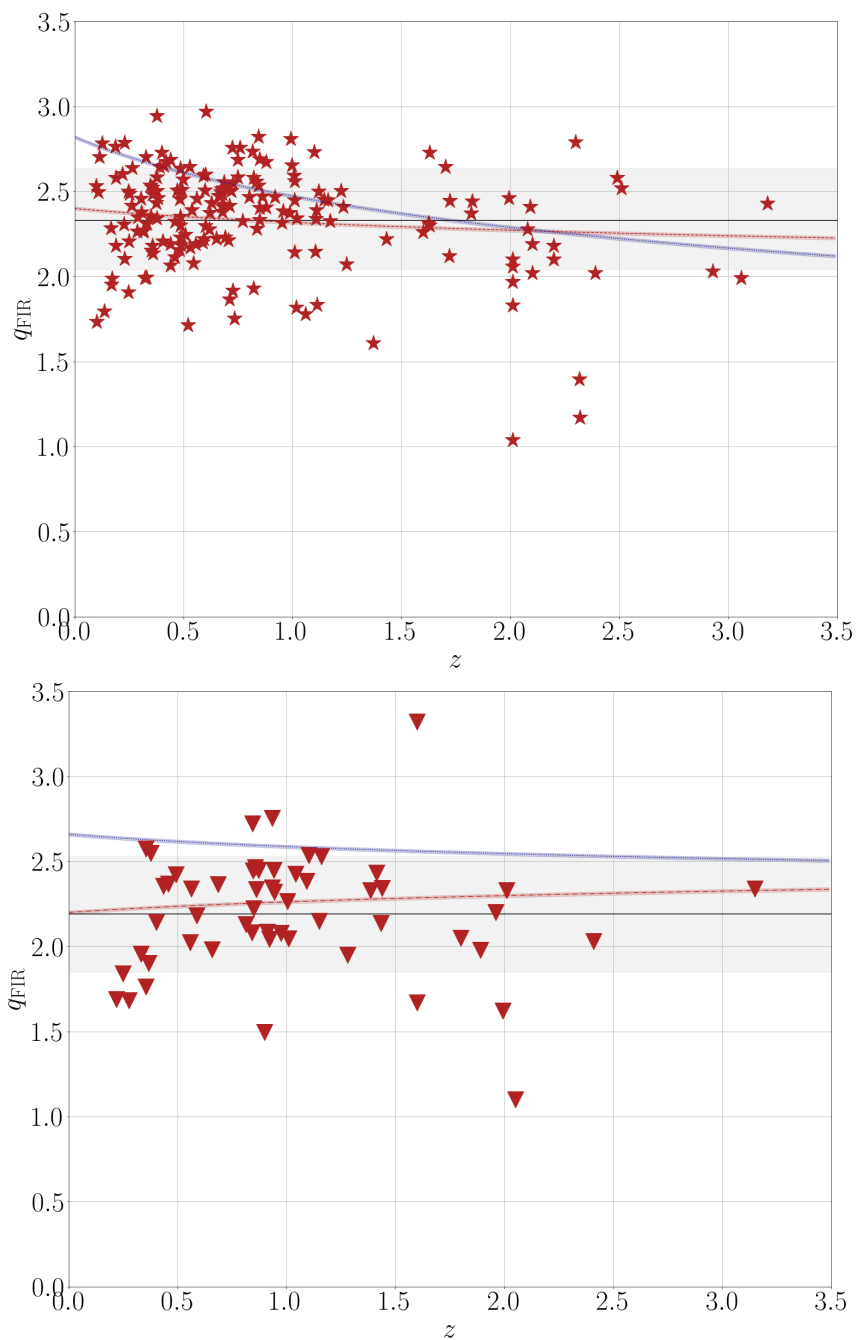
Из ове кратке анализе, можемо већ на почетку закључити да и средња вредност и медијана q_{FIR} указују на ниже вредности овог параметра код подузорка неправилних галаксија, што је у сагласности са претходно постављеним хипотезама да интеракција између галаксија води еволицију ДИР корелације са црвеним помаком, односно утиче на снижавање параметра ДИР корелације у односу на стандардну вредност (D15).

Као што је већ наведено у глави 4 и у уводу ове анализе, главни циљ јесте да на већем узорку и боље дефинисаним физичким величинама проверимо да ли је нетермално радио-зрачење које може бити појачано услед додатног убрзања честица у плимским ударним таласима, довољно да утиче на еволицију ДИР корелације са црвеним помаком, односно на опадање параметра ДИР корелације са црвеним помаком као што је уочено у истраживању D17. Да бисмо нове резултате што боље упоредили са резултатима D17, одлучили смо се да зависност параметра ДИР корелације од црвеног помака испитамо засебно за дисколике и неправилне галаксије претпостављајући исти облик еволиције као у одељку 2.1 у виду $q_{\text{FIR}}(z) = a(1+z)^b$.

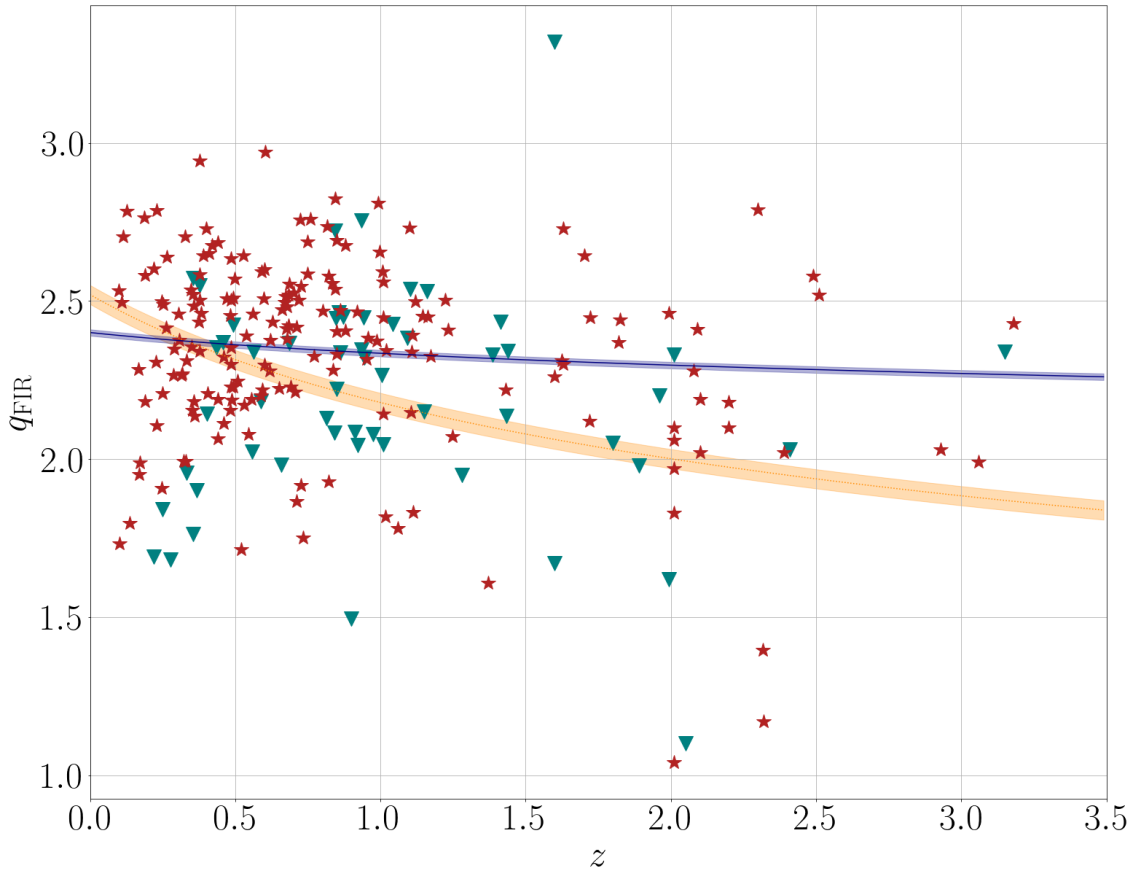
Нови резултати приказани су на слици 5.1, која садржи зависност $q_{\text{FIR}}(z)$ посебно за дисколике галаксије (горе) и неправилне галаксије (доле). Зависности у виду степеног закона су представљене црвеном испрекиданом и тачка-црта линијом посебно за оба подузорка и узимају вредности $q_{\text{FIR}} = (2.4 \pm 0.01)(1 + z)^{(-0.05 \pm 0.04)}$ (дисколике) и $q_{\text{FIR}} = (2.2 \pm 0.1)(1 + z)^{(0.04 \pm 0.08)}$ (неправилне галаксије). Ради поређења, на графицима су нацртани и резултати рада M18 плавим линијама, за сфероидне галаксије (горе) и галаксије у којима доминира диск (доле). Иако се на први поглед чини да су посматране зависности које смо нашли за наша два подузорка супротне, односно да дисколике галаксије показују потенцијално опадајући тренд ка већем црвеном помаку, док неправилне имају чак можда растући тренд, обе зависности су у оквиру грешке у складу са непостојећом еволуцијом параметра q_{FIR} са црвеним помаком. Ово може да се тумачи на два засебна начина. Један од њих јесте да је наш узорак и даље мали, и да повећање грешке (и сукцесивно увећане, и статистичке али и инструменталне) свих физичких величина након црвеног помака $z > 1$ прикрива постојећу еволуцију параметра ДИР корелације са црвеним помаком виђену у D17 где је анализиран много већи узорак од 9575 (без присуства АГЈ) галаксија. Наравно утицај може имати и губљење СМ галаксија у процесу одбацивања активних галаксија, или неправилно одређена морфологија како дисколикних тако и неправилних галаксија. Међутим, како смо већ нагласили, пронађена еволуција у раду D17, може произаћи и из ниске вредности радио спектралног индекса која је коришћена код галаксија где није било могуће израчунати овај параметар. Ови резултати су објављени у раду Павловић, 2021, (Pavlović, 2021).

Као и у анализи на малом тест узорку представљеној у одељку 4 и објављеној у раду Павловић и Продановић, 2019, (Pavlović and Prodanović, 2019), и на овом узорку галаксија испитана је еволуција ДИР корелације са црвеним помаком за цео узорак а резултати су представљени на слици 5.2. Зависност $q_{\text{FIR}}(z)$ за цео узорак од 237 галаксија показан је плавом пуном линијом и узима облик $q_{\text{FIR}} = (2.4 \pm 0.01)(1 + z)^{(-0.02 \pm 0.03)}$. Поново, ни анализа на целом узорку није показала никакву еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. На слици 5.2, је ради поређења представљена и еволуција корелације из рада D17, тачкастом наранџастом линијом.

За разлику од претходног рада на мањем узорку, у овом већем узорку доминирају галаксије на ниским црвеним помацима. Ово такође може маски-



Слика 5.1: Зависност q_{FIR} од црвеног помака. Дисколике галаксије представљене су црвеним звездама и њихова зависност параметра ДИР корелације је представљена црвеном испрекиданом линијом (слика горе). Неправилне галаксије су представљене црвеним троугловима, а зависност $q_{\text{FIR}}(z)$ црвеним тачка-црта линијом (слика доле). На оба графика нацртана је и средња вредност параметра q_{FIR} црном пуном линијом, док осенчани регион представља његову стандардну девијацију. Плаве линије представљају резултате рада М18 за сфероидне (горе) и галаксије у којима доминира диск (доле).



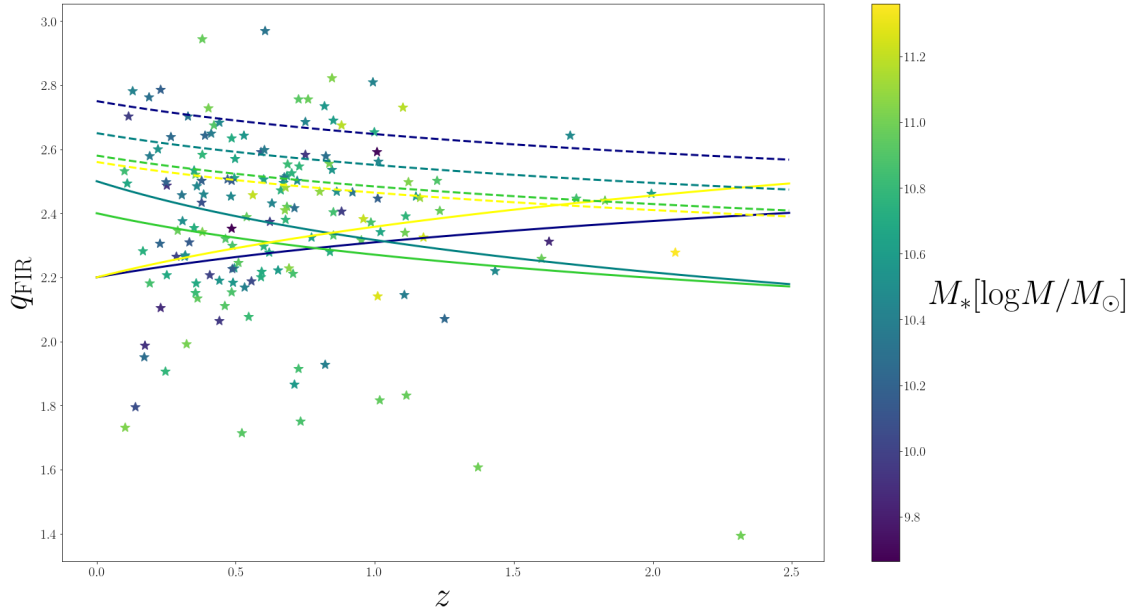
Слика 5.2: Зависност q_{FIR} од црвеног помака за 237 субмилиметарских галаксија представљена пуном плавом линијом. Као и на слици 5.1 црвене звезде су дисколике галаксије а плави троуглови неправилне. Наранџаста тачкаста линија представља исту зависност из рада D17.

рати еволуцију ДИР корелације приказане у раду D17. У тренутном узорку, број галаксија које користимо зависи искључиво од дефинисаности морфолошког типа саме галаксије, где смо морфологију користили као индикатор прошлих или садашњих интеракција између галаксија. Наша хипотеза да интеракције између галаксија производе еволуцију $q_{\text{FIR}}(z)$, приказану у раду D17 није коначно потврђена, али наши резултати показују да виђена еволуција можда и не постоји, и у нашем истраживању није репродукована.

Као што је поменуто и у уводу ове главе, скорашња истраживања (D21) су такође показала веома слабу зависност параметра ДИР корелације од црвеног помака, што је у сагласности са резултатима ове дисертације. Међутим, у овом раду је такође била уочена зависност ДИР корелације од звездане масе самих галаксија M_* (табела 5.1). Показало се да параметар корела-

ције q_{IR} има ниже вредности код масивних галаксија, и резултати овог истраживања су показали зависност облика $q_{\text{IR}}(M_*, z) = (2.646 \pm 0.024)(1 + z)^{(-0.023 \pm 0.008)} - (0.148 \pm 0.013) \times (\log M_*/M_\odot - 10)$. Из тог разлога, одлучили смо да проверимо да ли ће се на нашем узорку показати оваква зависност. Звездане масе галаксија биле су доступне у *COSMOS Photometric redshift* каталогу (Laigle et al., 2016). За наше потребе раздвојили смо галаксије на 4 различитих опсега звезданих маса, као и у раду D21: $\log(M_*/M_\odot) < 10$, $10 < \log(M_*/M_\odot) < 10.5$, $10.5 < \log(M_*/M_\odot) < 11$ и $\log(M_*/M_\odot) > 11$, а зависности $q_{\text{FIR}}(z, M_*)$ приказане су на слици 5.3 и то плавом бојом галаксије које имају масу $\log(M_*/M_\odot) < 10$, тамно зеленом бојом $10 < \log(M_*/M_\odot) < 10.5$, светло зеленом бојом $10.5 < \log(M_*/M_\odot) < 11$ и жутом линијом је представљена зависност $q_{\text{FIR}}(z, M_*)$ за опсега маса $\log(M_*/M_\odot) > 11$. На слици су ради поређења приказане и исте зависности пронађене у раду D21. Исти опсези звезданих маса приказани су истим бојама као и у нашем истраживању испрекиданим линијама.

Неочекивано, на нашем узорку се за три различита опсега звезданих маса галаксија, у оквиру грешака фитова, није показала зависност параметра ДИР корелације од звездане масе галаксија, за разлику од рада D21. Само у случају звезданих маса у опсегу $10.5 < \log(M_*/M_\odot) < 11$, видели смо еволуцију параметра ДИР корелације и то у облику $q_{\text{FIR}}(z) = (2.5 \pm 0.1)(1 + z)^{(-0.11 \pm 0.05)}$. Међутим, разлике у величини узорака између нашег рада и рада D21, могу бити заслужне за непостојање еволуције у нашим опсезима звезданих маса. Са друге стране, наша претпоставка да еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком диктира интеракција између галаксија, је у сагласности са радом D21, у смислу да масивне галаксије настају сударом са другим галаксијама у прошлости, и да масивније галаксије преживљавају више судара и блиских пролаза од мање масивних галаксија (Conselice, 2007; Conselice et al., 2009; Bertone and Conselice, 2009), што би као последицу имало појачано нетермално радио-зрачење, а самим тим и ниже вредности параметра ДИР корелације.



Слика 5.3: Зависност $q_{\text{FIR}}(z, M_*)$ за велики *COSMOS* узорак. Звездане масе галаксија су приказане различитим бојама а дате зависности пуним линијама истих боја и то: плава линија $\log(M_*/M_{\odot}) < 10$, тамно зелена линија $10 < \log(M_*/M_{\odot}) < 10.5$, светло зелена линија $10.5 < \log(M_*/M_{\odot}) < 11$ и жутом линијом је представљена зависност $q_{\text{FIR}}(z, M_*)$ за опсеге звезданих маса $\log(M_*/M_{\odot}) > 11$. Испрекидане линије представљају резултате истраживања D21, за исте опсеге звезданих маса.

5.1 Отворена питања и будући рад

Анализа утицаја интеракција удаљених галаксија на њихово нетермално радио-зрачење а самим тим и на еволуцију ДИР корелације ка већим црвеним помацима, довела су до многих отворених питања, на којима ће се заснивати наш будући рад.

Пре свега вратимо се на одређивање морфологије галаксија. Морфолошки параметри које смо раније описали, заснивају се на оптичким сликама галаксија, које на великим црвеним помацима није могуће добити, или је резолуција веома лоша. Како смо видели у раду D15 али и у нашем истраживању, параметар ДИР корелације зависиће од стадијума судара између галаксија. Ово је отворило идеју да за будући рад испитамо да ли је могуће користити q_{FIR} параметар за одређивање стадијума судара галаксија. Наша идеја је да

испитамо зависност овог параметра од тренутних морфолошких параметара на узорку галаксија у локалном Универзуму за које је могуће добити оптичке слике са добром резолуцијом. Даље, испитаћемо како се морфолошки параметри мењају са стадијумом судара, како је то испитано и за параметар ДИР корелације у раду D15. Након тога, идеја је да испитамо да ли ће комбинација неких од морфолошких параметара, на пример концентрација и асиметрија или Цини коефицијент и M_{20} параметар показивати заједничка одступања, односно међусобне корелације у различитим стадијумима судара. Такође, план је и да испитамо како ће се морфолошки параметри мењати у зависности од угла посматрања судара али и од различитих морфолошких типова галаксија које улазе у интеракцију. На тај начин покушали бисмо да повежемо параметар ДИР корелације са неким од морфолошких параметра, што би нам на крају дало могућност да q_{FIR} параметар, заједно са морфолошким параметрима, користимо као индикатор стадијума судара галаксија на великим црвеним помацима. На овај начин добили бисмо алат за одређивање морфологије удаљених галаксија који не би зависео од оптичких посматрања галаксија већ би се заснивао на нетермалном радио-зрачењу.

Друго велико питање које је остало након наше анализе јесте да ли заправо постоји еволуција ДИР корелације са црвеним помаком? У нашој анализи наишли смо на проблем одређивања радио-спектралног индекса на великим црвеним помацима. Такође, показали смо да ће параметар ДИР корелације зависити од вредности спектралног индекса, те је можда узимање константне вредности овог параметра заслужно за привидну еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком виђену у раду D17. У нашем будућем истраживању, испитали бисмо како се спектрални индекс мења кроз различите стадијуме судара галаксија у локалном Универзуму, а касније бисмо испитали да ли ће се и како мењати ова физичка величина код СМ галаксија, што ће представљати кључне резултате нашег будућег рада.

Будућа истраживања ће се наравно заснивати и на новим посматрањима са Џејмс Веб свемирског телекопа. Овај телескоп представља за сада највећу инфрацрвену свемирску опсерваторију и садржи две камере и то *Near InfraRed Camera* и *Mid InfraRed Instrument* које ће радити у опсегу таласних дужина од $0.7 \mu\text{m}$ до $28.3 \mu\text{m}$ и снимати универум до црвеног помака $z \sim 11.1$ (Labiano et al., 2021). Фотометријска истраживања даће нам до сада најпрецизнија посматрања која ћемо моћи да користимо за фитовање СЕД криве

далеких галаксија на овим таласним дужинама. Предност овог телескопа је сте и висока угловна резолуција од ~ 0.1 arcsec на таласним дужинама од око $2 \mu\text{m}$, што ће довести до статистички значајног повећања узорака на великим црвеним помацима, односно моћи ће да раздвоји објекте који су се код ранијих посматрања детектовали као један због ограничене просторне резолуције. Тренутна предвиђања заснована на основу симулација дају да ће на црвеним помацима од $z = 8 \sim 8.5$ моћи да детектује галаксије са вредностима односа сигнала према шуму од 10 (Vogelsberger et al., 2020).

Глава 6

Резиме и закључак

Један од најпоузданијих алата за проучавање галаксија на великим црвеним помацима, а самим тим и еволуцију галаксија кроз ране епохе формирања Универзума, јесу емпиријски дефинисане корелације, међу којима је и ДИР (далека инфрацрвена - радио корелација) корелација. Поузданост ове корелације лежи у њеној одрживости и стабилности код различитих врста система. Као и многе друге корелације, и ова је своју примену нашла у многим астрофизичким проблемима, као што је детекција АГЈ, одређивање удаљености до галаксија на великим црвеним помацима и одређивање температуре прашине удаљених ултралуминозних галаксија у инфрацрвеном делу спектра. Једна од најзначајнијих примена ДИР корелације јесте у праћењу стопе формирања звезда. Скорија истраживања ове корелације, показала су да она еволуира како се крећемо ка већим црвеним помацима, у младом Универзуму, што доводи у питање њену одрживост, те компликује њену употребу за проучавање далеких галаксија. Из овог разлога, веома је важно да испитамо због чега долази до еволуције ДИР корелације ка већим црвеним помацима, те да схватимо физичке процесе који повлаче овакво понашање.

У овој дисертацији испитали смо да ли се узрок еволуције ДИР корелације са црвеним помаком крије у галактичким интеракцијама. Као мотивацију за овакво истраживање добили смо од још једног скорашњег истраживања утицаја интеракције галаксија на параметар ДИР корелације кроз различите стадијуме судара галаксија. Наиме, приликом судара галаксија, јављају се јаки ударни таласи који постају места за убрзавање релативистичких честица. На овај начин долази се до нове популације такозваних плимских космичких зрака, који се у појачаним магнетним пољима током судара галаксија убрза-

вају и емитују додатно синхротронско радио-зрачење. Ово додатно зрачење, поред оног које се очекује као последица смрти звезда и стопе супернових, ће утицати и на промену вредности параметра корелације у овим системима.

Пре свега, било је неопходно испитати какву еволуцију параметра ДИР корелације очекујемо уколико интеракције изазивају појачано радио-зрачење? Предложили смо параметарске моделе еволуције параметра ДИР корелације са црвеним помаком под претпоставком да је главни узрок ове еволуције заправо интеракција између галаксија и растући број интеракција са црвеним помаком. Главна претпоставка којом смо се водили јесте да узорак галаксија на којима је пронађена еволуција ДИР корелације сачињава морфолошки микс галаксија у којима се одвија формирање звезда и то од такозваних дисколикних галаксија (углавном нормалне спиралне галаксије) и неправилних галаксија (галаксије које су у прошлости преживеле судар или блиски пролаз са другом галаксијом или су тренутно у интеракцији). Са повећањем броја судара галаксија ка већем црвеном помаку, а самим тим и удела неправилних галаксија у узорку, параметар ДИР корелације почиње природно да еволуира, односно да опада. Представили смо различите моделе од којих сваки узима различите средње вредности параметра q_{FIR} за дисколике и за неправилне и интерагујуће галаксије. Већина модела који се заснивају на интеракцији, заиста је показала смањење параметра корелације у овим системима, и еволуцију овог параметра како се крећемо ка већем црвеном помаку као што је и пронађено у скорашњим истраживањима.

Надаље, наше моделе тестирали смо прво на малом узорку од 34 CM галаксије. Овај узорак смо по морфологији поделили на два подзорка, на 11 неправилних галаксија (неправилне галаксије које показују интеракцију у прошлости и галаксије које су тренутно у судару) и на 23 дисколике галаксије. Пре свега, показали смо да је средња вредност параметра q_{FIR} код сва три узорка (дисколике, неправилне и на целом узорку од 34 CM галаксије), нижа од средње вредности овог параметра у локалном свемиру. Затим, код сва три узорка испитали смо еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком у облику: $q_{\text{FIR}}(z) = a(1+z)^b$, како бисмо лакше упоредили са претходно добијеним резултатима. Како су оба подзорка (дисколике и неправилне и интерагујуће галаксије) веома мала, у оквиру грешке самог фита, резултати нису показали значајну еволуцију параметра q_{FIR} са црвеним помаком. Добијени фитови се могу представити једначинама: $q_{\text{FIR}} = (4.14 \pm 2.85)(1+z)^{-(0.62 \pm 0.67)}$ за подузо-

рак неправилних и интерагујућих галаксија, $q_{\text{FIR}} = (2.32 \pm 1.21)(1+z)^{(-0.11 \pm 0.46)}$ за дисколике галаксије. Међутим, када је анализиран цео узорак од 34 CM галаксије, пронађена је еволуција параметра ДИР корелације у виду: $q_{\text{FIR}} = (3.38 \pm 1.27)(1+z)^{(-0.44 \pm 0.35)}$, што је у складу са раније уоченом еволуцијом ДИР корелације са црвеним помаком. Овакав резултат показује индикацију да једна од морфологија заиста води еволуцију параметра ДИР корелације ка већим црвеним помацима. Иако је показано да је еволуција ДИР корелације јача код подузорка неправилних галаксија, када смо применили Колмогоров-Смирноф тест, он је показао да оба подузорка потичу од статистички исте расподеле. Као и у претходној дискусији, и овај резултат може да потекне од статистички малих узорака, те да након прве анализе постоји индикација да ће повећани удео неправилних и интерагујућих галаксија ка већим црвеним помацима бити заслужан за појачано нетермално радио-зрачење у овим системима, а самим тим и на појаву нижих вредности параметра q_{FIR} . Како бисмо боље раздвојили наше моделе и испитали наше претпоставке да интеракција између галаксија обезбеђује еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком, потребно је извршити детаљнију анализу на већем узорку галаксија.

Наша даља анализа заснивала се на добијању већег узорка који је скоро за ред величине већи од претходног и садржао је 237 галаксија у којима се формирају звезде узетих из *COSMOS* прегледа неба. Користећи три морфолошка каталога доступна за овај узорак, галаксије су подељене на два подузорка од 55 неправилних и 182 дисколике галаксије. За оба подузорка анализирана је зависност параметра q_{FIR} од црвеног помака и добијени су следећи резултати: $q_{\text{FIR}}(z) = (2.4 \pm 0.01)(1+z)^{(-0.05 \pm 0.04)}$ и $q_{\text{FIR}}(z) = (2.2 \pm 0.1)(1+z)^{(0.04 \pm 0.08)}$ за дисколике и неправилне галаксије, респективно. За разлику од претходне анализе, ниједан од подузорка није показао еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. Исти резултат је добијен и када је анализиран цео узорак од 237 CM галаксија, где смо добили: $q_{\text{FIR}}(z) = (2.4 \pm 0.01)(1+z)^{(-0.04 \pm 0.03)}$. Овакав резултат може значити да виђена еволуција у претходним истраживању D17 уопште не постоји, и последица је или контаминације узорка АГЈ, коришћења константне вредности радио-спектралног индекса или других селекционих ефеката (D17). Међутим, овај резултат није у складу ни са резултатима објављеним у раду M18, где је на узорку од 1577 сферних галаксија пронађена еволуција параметра корелације, где је вредност степеног индекса

b била $b = -0.19 \pm 0.01$. Овакво разилажење резултата може се објаснити различитим начином додељивања морфолошке класификације. Наиме, у поменутом раду, узорак сферних галаксија састојао се и од елиптичних и од дисколикних галаксија, док смо у нашем узорку одмах на почетку избацили елиптичне галаксије које нису биле релевантне за нашу анализу. Ова одлука да не користимо елиптичне галаксије у нашој анализи долази из општих претпоставки да сама ДИР корелација води порекло од процеса формирања звезда, који су у овим системима готово занемарљиви. Са друге стране наша хипотеза се такође заснива на процесима који утичу на формирање звезда, па је оваква одлука искључивања елиптичних галаксија била оправдана. Међутим, ово може да значи да су баш активне елиптичне галаксије заслужне за еволуцију ДИР корелације ка већим црвеним помацима пронађену на узорку сфероидних галаксија у раду М18. Такође, овакав резултат показује да који год да је физички процес који је заслужан за овакво понашање, није строго повезан са процесима формирања звезда или масом гаса у галаксији. Битно је нагласити да је средња вредност параметра ДИР корелације код подзорка неправилних галаксија нижа него код дисколикних, што је у складу са нашом претходном анализом на много мањем узорку галаксија и хипотезом да системи који су у тренутној интеракцији или који су скоро кроз њу прошли имају појачано радио-зрачење. Ова чињеница указује да и даље постоји могућност да различита морфологија галаксија може довести до еволуције корелације са црвеним помаком. Ниже вредности параметра корелације код разматраног узорка неправилних галаксија су такође у складу са истраживањима из 2020. године (Algera et al., 2020) које је показало да је средња вредност параметра q_{FIR} у опсегу црвених помака $1.5 < z < 4$ узима вредност $q_{\text{FIR}} = 2.2 \pm 0.03$, што је ниже од вредности овог параметра у Локалном свемиру која износи $q = 2.34 \pm 0.26$. Овако нижа вредност је интерпретирана узимајући у обзир јака магнетна поља код СМ галаксија у комбинацији са појавом секундарних космичких зрака, што ће као последицу имати појачано нетермално радио-зрачење у овим системима. Све наведене интерпретације подржавају хипотезу да додатна популација плимских космичких зрака као последица интеракције између галаксија, може бити узрок еволуције ДИР корелације са црвеним помаком.

Сумирани главни закључци ове докторске дисертације су следећи:

- Постављени параметарски модели еволуције ДИР корелације са црве-

ним помаком, засновани на галактичким интеракцијама показали су мању вредност параметра ДИР корелације у оваквим системима, као и еволуцију ДИР корелације како се крећемо ка високим црвеним помацима.

- Параметарски модели су испитани на малом тест узорку од 34 галаксије који је подељен на два подузорка у односу на моргологију галаксија. У овој анализи пронађена је нешто јача еволуција ДИР корелације са црвеним помаком код неправилних галаксија али у склопу грешке фита ниједан подузорак не показује значајну еволуцију. Са друге стране, пронађена је еволуција код целог узорка галаксија што може да указује да је бар једна од морфологија (у овом случају неправилна) заслужна за смањење параметра ДИР корелације са црвеним помаком, уколико се број галаксија одређеног морфолошког типа повећава у самом узорку.
- Моделе смо испитали и на великом узорку од 237 галаксија где насупрот претходној анализи није пронађена еволуција ДИР корелације са црвеним помаком ни код подузорка дисколикних ни код подузорка неправилних галаксија. Еволуција ДИР корелације није пронађена ни на целом узорку од 237 галаксија. Овакав резултат може значити да виђена еволуција ДИР корелације са црвеним помаком можда не постоји и последица је контаминације узорка АГЈ или погрешним рачунањем различитих физичких параметара као што је на пример радио спектрални индекс.
- Анализа оба коришћена узорка (малог тест и великог узорка галаксија) показала је ниже средње вредности параметра ДИР корелације код галаксија које су у интеракцији или су недавно прошле интеракцију, што указује на појачано нетермално зрачење у овим системима, што потврђује нашу хипотезу да ове галаксије могу утицати на смањење параметра ДИР корелације у истим.

На крају, битно је нагласити да параметри који се користе за одређивање морфологије галаксија на основу оптичких слика, губе своју поузданост након црвеног помака $z = 1$. То значи да постоји могућност да наши подузорци галаксија нису потпуно морфолошки чисти након овог црвеног помака, што би значајно утицало на резултате. Из овог разлога, наша будућа истраживања

засниваће се на проналаску једног параметра (или комбинацију више њих), који ће поуздано издвојити галаксије по различитим стадијумима судара на великим црвеним помацима, јер ће и параметар корелације знатно зависити од тачног стадијума судара галаксија. Такође, параметар ДИР корелације је веома осетљив на радио-спектрални индекс $q_{\text{FIR}} \sim \log(1+z)^\alpha$, што нам указује на то да баш овај физички параметар, односно узимање константне вредности истог, може заправо бити заслужан за појаву привидне еволуције ДИР корелације са црвеним помаком. Проучавање варијација радио-спектралног индекса ће бити главни задатак наших будућих истраживања.

Додатак

Табела у овом поглављу представља проширени узорак галаксија преузетог из *COSMOS* прегледа неба и садржи све преузете и рачунате физичке величине коришћене у овом истраживању.

α [°]	δ [°]	z_{phot}	S_{FIR} [μJy]	dS_{FIR} [μJy]	$S_{3\text{GHz}}$ [μJy]	$dS_{3\text{GHz}}$ [μJy]	q_{FIR}	dq_{FIR}
150.55	1.91	0.55	8897.51	1064.62	0.09	0.02	2.08	0.09
150.62	1.99	1.11	7645.89	1153.42	0.08	0.02	2.15	0.12
150.15	1.80	1.10	15175.45	1111.73	0.05	0.02	2.73	0.18
150.17	2.30	0.44	7465.10	1257.03	0.06	0.01	2.19	0.10
149.54	2.04	0.73	7597.60	215.16	0.17	0.02	1.75	0.05
149.57	1.88	0.62	10836.59	1361.42	0.07	0.02	2.28	0.11
149.57	1.74	0.49	21133.21	5212.18	0.15	0.02	2.23	0.12
149.94	2.67	0.49	18064.39	1689.16	0.13	0.01	2.23	0.06
149.68	2.76	1.11	23428.80	3494.37	0.46	0.02	1.83	0.07
149.68	2.43	0.33	11824.62	1225.23	0.14	0.02	1.99	0.07
149.69	1.67	0.32	27954.73	494.45	0.29	0.05	1.99	0.08
150.75	2.05	0.59	35901.06	2228.78	0.27	0.05	2.20	0.09
150.75	2.36	0.19	40714.40	1547.93	0.12	0.02	2.58	0.07
149.71	2.22	2.32	7563.43	958.31	0.38	0.05	1.40	0.08
149.92	2.25	1.63	10006.35	1093.49	0.07	0.01	2.31	0.09
149.93	2.30	1.83	13858.89	1367.27	0.08	0.01	2.44	0.08
150.27	2.21	0.85	11435.70	1361.31	0.06	0.01	2.40	0.10
150.28	2.05	1.11	8685.78	356.41	0.06	0.01	2.34	0.10
149.76	2.34	1.01	11590.02	1565.86	0.10	0.01	2.14	0.08
149.77	2.53	0.73	8371.22	558.37	0.13	0.02	1.92	0.06
149.77	2.22	1.60	11521.95	2942.53	0.10	0.01	2.26	0.12

α [°]	δ [°]	z_{phot}	S_{FIR} [μJy]	dS_{FIR} [μJy]	$S_{3\text{GHz}}$ [μJy]	$dS_{3\text{GHz}}$ [μJy]	q_{FIR}	dq_{FIR}
150.46	2.06	0.33	11556.97	4610.53	0.07	0.01	2.31	0.19
150.00	1.94	0.69	13481.89	188.99	0.10	0.01	2.23	0.05
150.00	2.27	0.68	21124.55	452.50	0.08	0.01	2.52	0.06
150.39	2.78	0.36	14194.28	1324.96	0.10	0.02	2.18	0.09
150.44	2.64	0.11	40951.97	3040.25	0.14	0.02	2.50	0.07
149.79	2.29	0.52	5590.52	4378.90	0.13	0.01	1.71	0.34
149.79	2.11	0.48	9348.22	1366.52	0.06	0.01	2.19	0.09
149.79	2.01	1.37	8030.00	1072.62	0.32	0.01	1.61	0.06
149.80	2.14	0.36	34628.75	591.05	0.28	0.03	2.14	0.04
149.80	2.38	0.68	15373.55	155.57	0.08	0.01	2.42	0.06
150.36	2.70	0.32	14688.11	531.13	0.07	0.01	2.38	0.08
150.49	2.73	0.23	10380.46	1686.05	0.09	0.02	2.11	0.11
150.40	2.42	0.17	25002.56	3350.44	0.29	0.07	1.95	0.12
150.40	2.79	0.71	18381.28	2167.93	0.31	0.02	1.87	0.06
149.77	2.47	0.60	16284.43	1741.78	0.10	0.01	2.30	0.07
149.83	1.93	1.43	15558.80	886.68	0.13	0.01	2.22	0.05
149.83	2.55	2.08	9245.63	245.27	0.08	0.01	2.28	0.07
149.84	1.64	1.23	16368.70	2435.86	0.10	0.02	2.41	0.12
150.58	1.89	0.41	9828.47	1214.50	0.07	0.02	2.21	0.11
150.65	2.03	0.44	10340.76	856.01	0.11	0.02	2.06	0.09
150.68	2.23	0.59	19893.95	1775.35	0.07	0.02	2.59	0.13
150.69	1.62	1.02	11166.88	832.81	0.22	0.02	1.82	0.06
150.04	2.08	0.46	18798.90	2788.78	0.10	0.01	2.32	0.08
150.21	2.36	0.17	50380.17	5107.55	0.27	0.03	2.28	0.07
150.33	1.92	0.10	72256.35	9819.26	1.37	0.05	1.73	0.06
150.34	2.05	0.85	15191.30	1867.16	0.10	0.01	2.28	0.08
150.30	2.05	0.71	16659.07	1153.81	0.08	0.01	2.42	0.07
149.48	1.86	0.51	30403.79	5883.63	0.21	0.02	2.25	0.09
150.12	2.46	0.25	52507.87	4588.46	0.70	0.03	1.91	0.04
149.74	2.07	0.74	12732.01	798.42	0.06	0.01	2.48	0.11
149.74	2.18	0.35	17565.86	2391.38	0.14	0.02	2.15	0.09
150.27	1.98	1.17	17605.57	1393.13	0.11	0.01	2.33	0.06
150.60	2.45	0.38	20699.26	6254.93	0.08	0.02	2.50	0.16

α [°]	δ [°]	z_{phot}	S_{FIR} [μJy]	dS_{FIR} [μJy]	$S_{3\text{GHz}}$ [μJy]	$dS_{3\text{GHz}}$ [μJy]	q_{FIR}	dq_{FIR}
150.60	2.75	0.65	12267.35	974.19	0.09	0.03	2.22	0.15
150.60	2.12	0.38	15502.48	334.09	0.08	0.02	2.34	0.08
149.85	2.78	0.14	27909.41	5186.01	0.46	0.05	1.80	0.09
149.87	2.16	0.94	10218.45	1086.14	0.07	0.05	2.32	0.35
150.31	2.24	0.25	19858.26	1274.26	0.07	0.01	2.50	0.07
149.91	2.45	0.58	9721.46	391.29	0.08	0.01	2.17	0.07
150.34	2.57	0.82	14557.66	1612.38	0.24	0.01	1.93	0.05
150.11	2.53	1.99	11751.46	1320.59	0.07	0.01	2.46	0.09
149.97	2.54	0.23	23879.13	398.81	0.07	0.01	2.60	0.08
149.98	2.43	0.48	15832.57	1014.17	0.13	0.01	2.15	0.06
150.17	2.13	0.19	19476.74	2826.56	0.14	0.01	2.18	0.07
150.17	2.48	0.74	15911.69	1552.31	0.07	0.01	2.47	0.09
150.19	2.68	0.29	23701.58	2923.56	0.17	0.02	2.21	0.07
150.19	2.68	0.32	44615.32	433.87	0.27	0.04	2.27	0.06
150.42	2.12	0.67	16478.81	277.80	38.80	2.90	2.53	0.04
149.85	2.32	0.38	11125.89	1109.59	26.60	2.60	2.49	0.07
150.76	2.04	1.01	15940.94	2729.45	48.50	3.60	2.45	0.08
149.72	1.62	0.10	25024.54	3508.42	48.70	3.60	2.53	0.09
149.59	2.40	1.11	11733.85	1045.17	41.40	3.30	2.39	0.05
149.53	2.42	0.49	13682.28	1778.37	23.90	3.10	2.63	0.09
150.58	2.26	0.99	9798.63	114.81	35.20	2.90	2.37	0.04
149.51	2.69	0.26	19251.25	817.14	52.10	3.90	2.42	0.06
149.80	2.12	0.49	10037.61	1092.16	33.50	2.90	2.35	0.07
150.55	2.56	0.60	9732.79	204.50	23.50	2.50	2.51	0.05
150.55	2.49	0.86	12528.88	516.70	35.10	2.90	2.47	0.04
150.48	1.95	0.67	13215.96	434.45	33.30	2.80	2.50	0.04
149.91	2.61	0.35	20341.48	936.44	64.90	4.00	2.36	0.05
150.52	2.53	0.41	11543.54	1134.28	19.00	2.50	2.65	0.08
150.34	1.61	0.23	5229.76	3469.70	18.00	2.70	2.31	0.30
150.62	2.33	0.49	9279.77	614.27	21.60	2.50	2.51	0.07
149.64	2.02	0.36	11307.85	445.80	24.70	2.60	2.52	0.06
150.35	2.40	0.14	35107.66	5068.06	39.10	3.10	2.78	0.09
149.67	1.71	0.38	16180.74	730.70	43.50	3.20	2.43	0.05

α [°]	δ [°]	z_{phot}	S_{FIR} [μJy]	dS_{FIR} [μJy]	$S_{3\text{GHz}}$ [μJy]	$dS_{3\text{GHz}}$ [μJy]	q_{FIR}	dq_{FIR}
149.76	1.99	0.50	15007.69	937.29	30.50	2.80	2.57	0.06
150.50	2.20	1.72	7040.84	269.21	24.30	2.50	2.45	0.05
150.75	2.59	0.69	13257.17	146.55	29.40	3.20	2.55	0.05
149.76	1.87	0.54	14231.01	663.12	44.30	3.30	2.39	0.05
150.29	1.69	1.25	5734.58	327.56	43.50	3.20	2.07	0.04
150.42	1.82	0.85	7631.56	4124.08	29.20	2.70	2.33	0.24
150.37	1.69	1.00	11698.40	1872.48	22.00	2.60	2.66	0.09
149.70	2.61	0.41	15232.03	558.04	23.70	2.70	2.68	0.06
150.24	2.85	0.29	11098.55	396.89	35.40	3.10	2.35	0.06
149.99	2.32	0.85	7097.75	435.71	11.90	2.40	2.69	0.09
150.09	2.43	0.36	15116.15	1352.03	32.00	2.70	2.54	0.07
150.26	2.51	0.17	6490.29	1684.22	45.50	3.20	1.99	0.13
150.69	2.14	0.40	17023.25	65.30	23.30	2.90	2.73	0.07
150.27	2.62	0.67	8364.18	232.16	25.60	2.60	2.41	0.05
149.92	2.31	0.66	5320.67	1635.90	14.10	2.50	2.47	0.16
149.66	2.13	0.56	18451.58	2060.18	49.30	3.60	2.46	0.06
150.11	2.55	0.72	6033.37	2686.97	13.70	2.40	2.55	0.21
149.88	2.07	0.60	15146.36	940.19	12.60	2.30	2.97	0.09
150.60	2.40	0.60	11160.95	1488.41	21.80	2.50	2.60	0.08
149.60	2.23	0.63	11189.69	1213.25	32.30	3.10	2.43	0.07
150.38	2.81	0.23	17305.81	54.22	19.70	2.50	2.79	0.07
149.89	2.47	0.71	6712.19	91.77	32.80	2.80	2.21	0.04
150.72	1.72	0.30	17648.06	2316.76	43.90	3.30	2.46	0.08
150.72	1.77	0.85	14121.47	2479.87	33.80	3.20	2.54	0.09
150.54	2.53	0.62	8549.51	1901.59	28.10	2.70	2.38	0.11
150.48	2.61	0.11	19114.78	883.71	25.30	2.60	2.70	0.07
150.49	2.67	0.72	13037.04	429.65	18.30	2.40	2.76	0.06
150.52	2.20	0.38	11942.51	591.55	22.70	2.60	2.58	0.07
149.56	2.35	1.12	5612.45	912.01	15.50	2.80	2.50	0.11
150.11	1.67	0.48	17770.78	1070.39	47.00	3.30	2.45	0.05
150.62	2.53	0.32	5642.59	694.03	21.70	2.60	2.27	0.09
150.17	2.36	0.67	11056.67	783.79	26.80	2.70	2.51	0.06
150.05	2.70	0.82	9032.05	729.88	13.60	2.40	2.74	0.09

α [°]	δ [°]	z_{phot}	S_{FIR} [μJy]	dS_{FIR} [μJy]	$S_{3\text{GHz}}$ [μJy]	$dS_{3\text{GHz}}$ [μJy]	q_{FIR}	dq_{FIR}
150.06	1.68	0.53	10506.25	1203.03	18.20	2.50	2.64	0.08
150.51	2.78	0.33	14249.11	1656.85	20.30	2.40	2.70	0.08
150.00	2.30	0.50	7949.58	245.49	12.40	2.40	2.69	0.09
150.56	2.36	0.99	8899.86	1927.69	11.70	2.40	2.81	0.13
150.33	1.87	0.82	10791.62	40.90	23.30	2.60	2.58	0.05
150.56	2.46	0.27	8026.83	2033.04	13.00	2.30	2.64	0.14
150.57	2.21	0.75	8069.05	1116.79	16.90	2.60	2.59	0.09
149.57	1.62	0.45	10678.65	754.61	61.50	4.10	2.11	0.05
149.57	2.63	0.27	10311.38	1217.29	39.50	3.10	2.27	0.08
150.24	2.32	0.38	20339.61	5267.57	16.90	2.50	2.94	0.13
150.07	2.23	0.19	24557.85	843.70	29.10	2.70	2.76	0.07
150.43	2.28	0.49	11645.26	11732.95	27.60	2.70	2.50	0.44
150.69	1.74	0.25	17838.55	2407.29	40.70	3.20	2.49	0.08
150.40	2.67	0.49	9758.70	649.36	22.90	2.70	2.51	0.07
150.41	2.43	0.39	9560.16	2546.71	15.90	2.40	2.64	0.14
149.51	2.63	0.72	5929.76	1000.38	14.90	2.80	2.50	0.11
150.18	2.29	0.73	7229.35	10.04	11.90	2.30	2.69	0.09
150.26	1.94	0.68	7054.28	33.37	23.20	2.60	2.38	0.05
150.59	2.41	1.15	12320.46	5359.75	38.00	3.00	2.45	0.19
149.59	2.24	0.56	2805.62	1819.50	13.90	2.60	2.19	0.29
149.78	2.27	1.22	7135.15	290.90	19.90	2.50	2.50	0.06
150.55	1.64	0.49	9879.97	77.24	37.30	3.10	2.30	0.05
150.35	2.72	0.38	11538.42	1921.58	29.20	2.80	2.46	0.09
150.17	1.81	0.85	15501.34	2146.64	19.20	2.50	2.82	0.08
150.65	2.70	0.59	5576.31	346.45	26.10	2.70	2.22	0.06
150.65	2.00	1.01	6795.39	887.12	14.80	2.50	2.59	0.09
150.32	2.27	0.80	7746.95	858.08	29.80	2.70	2.33	0.06
149.82	2.42	0.84	5397.73	555.18	12.30	2.30	2.56	0.09
150.28	1.78	0.88	3780.02	107.50	12.30	2.40	2.41	0.09
149.50	2.18	1.02	7747.63	3.71	30.00	3.50	2.34	0.05
150.68	2.62	0.92	8855.81	498.89	25.30	2.80	2.47	0.05
149.88	2.77	0.76	8300.71	49.69	11.70	2.40	2.76	0.09
149.72	2.71	0.88	11803.85	18.22	20.70	2.60	2.67	0.06

α [°]	δ [°]	z_{phot}	S_{FIR} [μJy]	dS_{FIR} [μJy]	$S_{3\text{GHz}}$ [μJy]	$dS_{3\text{GHz}}$ [μJy]	q_{FIR}	dq_{FIR}
149.58	2.52	1.16	10207.11	4.17	31.90	2.90	2.45	0.04
150.55	1.81	1.01	6154.37	135.18	14.40	2.40	2.56	0.07
150.07	2.07	0.96	7401.31	327.50	25.80	2.60	2.38	0.05
149.50	2.49	1.70	8381.65	465.83	18.30	2.90	2.64	0.08

Табела 6.1: *COSMOS* узорак коришћен у нашем истраживању са следећим подацима: α and δ представљају ректасцензију и деклинацију објекта, z_{phot} - фотометријски црвени помак, S_{FIR} - интегрална густина флукса израчуната у овом раду од $42 \mu\text{m}$ до $122 \mu\text{m}$ у μJy , dS_{FIR} - сукцесивно увећана грешка интегралног флукса у далеком инфрацрвеном подручју спектра коришћењем тоталних извода по свим рачунатим физичким величинама, $S_{3\text{GHz}}$ - густина флукса на 3GHz преузета из *COSMOS VLA 3GHz Multiwavelength Counterpart* каталога (Smolčić et al., 2017b) у μJy , $dS_{3\text{GHz}}$ - инструментална грешка густине флукса у радио-подручју, q_{FIR} - израчунати параметар ДИР корелације у овом раду, dq_{FIR} - сукцесивно увећана грешка параметра ДИР корелације такође рачуната у овом раду.

Библиографија

- Abraham, R. G., van den Bergh, S., and Nair, P. (2003). A New Approach to Galaxy Morphology. I. Analysis of the Sloan Digital Sky Survey Early Data Release. *APJ*, 588(1):218–229.
- Algera, H. S. B., Smail, I., Dudzevičiūtė, U., Swinbank, A. M., Stach, S., Hodge, J. A., Thomson, A. P., Almaini, O., Arumugam, V., Blain, A. W., Calistro-Rivera, G., Chapman, S. C., Chen, C. C., da Cunha, E., Farrah, D., Leslie, S., Scott, D., van der Vlugt, D., Wardlow, J. L., and van der Werf, P. (2020). An ALMA Survey of the SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey UKIDSS/UDS Field: The Far-infrared/Radio Correlation for High-redshift Dusty Star-forming Galaxies. *ApJ*, 903(2):138.
- Aretxaga, I., Wilson, G. W., Aguilar, E., Alberts, S., Scott, K. S., Scoville, N., Yun, M. S., Austermann, J., Downes, T. P., Ezawa, H., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kohno, K., Oshima, T., Perera, T. A., Tamura, Y., and Zeballos, M. (2011). AzTEC millimetre survey of the COSMOS field – III. Source catalogue over 0.72 deg² and plausible boosting by large-scale structure. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415(4):3831–3850.
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., and Terlevich, R. (1981). Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *PASP*, 93:5–19.
- Ballantyne, D. R., Everett, J. E., and Murray, N. (2006). Connecting Galaxy Evolution, Star Formation, and the Cosmic X-Ray Background. *APJ*, 639(2):740–752.
- Barmby, P., Alonso-Herrero, A., Donley, J. L., Egami, E., Fazio, G. G., Georgakakis, A., Huang, J. S., Laird, E. S., Miyazaki, S., Nandra, K., Park, S. Q., Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Rigby, J. R., and Willner, S. P.

- (2006). Mid-Infrared Properties of X-Ray Sources in the Extended Groth Strip. *APJ*, 642(1):126–139.
- Bell, E., Monachesi, A., D’Souza, R., Harmsen, B., de Jong, R., Radburn-Smith, D., Bailin, J., and Holwerda, B. (2017). Decoding Galactic Merger Histories. *Galaxies*, 5(4):95.
- Bell, E. F. (2003). Estimating Star Formation Rates from Infrared and Radio Luminosities: The Origin of the Radio-Infrared Correlation. *ApJ*, 586(2):794–813.
- Bell, E. F., Naab, T., McIntosh, D. H., Somerville, R. S., Caldwell, J. A. R., Barden, M., Wolf, C., Rix, H.-W., Beckwith, S. V., Borch, A., Häussler, B., Heymans, C., Jahnke, K., Jogee, S., Koposov, S., Meisenheimer, K., Peng, C. Y., Sanchez, S. F., and Wisotzki, L. (2006). Dry Mergers in GEMS: The Dynamical Evolution of Massive Early-Type Galaxies. *APJ*, 640(1):241–251.
- Bershady, M. A., Jangren, A., and Conselice, C. J. (2000). Structural and Photometric Classification of Galaxies. I. Calibration Based on a Nearby Galaxy Sample. *APJ*, 119(6):2645–2663.
- Bertone, S. and Conselice, C. J. (2009). A comparison of galaxy merger history observations and predictions from semi-analytic models. *MNRAS*, 396(4):2345–2358.
- Blain, A. W., Smail, I., Ivison, R. J., Kneib, J. P., and Frayer, D. T. (2002). Submillimeter galaxies. *PHYSREP*, 369(2):111–176.
- Boccardi, B., Madika, E., and Ricci, L. (2021). Accretion mode and jet collimation in active galactic nuclei. *Astronomische Nachrichten*, 342(1071):1071–1076.
- Bolzonella, M., Miralles, J. M., and Pelló, R. (2000). Photometric redshifts based on standard SED fitting procedures. *AAP*, 363:476–492.
- Bothwell, M. S., Maiolino, R., Cicone, C., Peng, Y., and Wagg, J. (2016). Galaxy metallicities depend primarily on stellar mass and molecular gas mass. *AAP*, 595:A48.
- Bothwell, M. S., Smail, I., Chapman, S. C., Genzel, R., Ivison, R. J., Tacconi, L. J., Alaghband-Zadeh, S., Bertoldi, F., Blain, A. W., Casey, C. M., Cox, P., Greve,

- T. R., Lutz, D., Neri, R., Omont, A., and Swinbank, A. M. (2013). A survey of molecular gas in luminous sub-millimetre galaxies. *MNRAS*, 429(4):3047–3067.
- Bouché, N., Lehnert, M. D., and Péroux, C. (2005). The missing metal problem - I. How many metals are in submillimetre galaxies? *MNRAS*, 364(1):319–324.
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., van Dokkum, P. G., Ribeiro, B., Oesch, P. A., and Stefanon, M. (2021). Low-luminosity galaxies in the early universe have observed sizes similar to star cluster complexes. *The Astronomical Journal*, 162(6):255.
- Braine, J., Davoust, E., Zhu, M., Lisenfeld, U., Motch, C., and Seaquist, E. R. (2003). A molecular gas bridge between the Taffy galaxies. *AAP*, 408:L13–L16.
- Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Tremonti, C., Kauffmann, G., Heckman, T., and Brinkmann, J. (2004). The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe. *MNRAS*, 351(4):1151–1179.
- Calistro Rivera, G., Williams, W. L., Hardcastle, M. J., Duncan, K., Röttgering, H. J. A., Best, P. N., Brügger, M., Chyży, K. T., Conselice, C. J., de Gasperin, F., Engels, D., Gürkan, G., Intema, H. T., Jarvis, M. J., Mahony, E. K., Miley, G. K., Morabito, L. K., Prandoni, I., Sabater, J., Smith, D. J. B., Tasse, C., van der Werf, P. P., and White, G. J. (2017). The LOFAR window on star-forming galaxies and AGNs - curved radio SEDs and IR-radio correlation at $0 < z < 2.5$. *MNRAS*, 469(3):3468–3488.
- Casey, C. M., Chen, C.-C., Cowie, L. L., Barger, A. J., Capak, P., Ilbert, O., Koss, M., Lee, N., Le Floch, E., Sanders, D. B., and Williams, J. P. (2013). Characterization of SCUBA-2 450 and 850 micrometers selected galaxies in the COSMOS field. *MNRAS*, 436(3):1919–1954.
- Casey, C. M., Narayanan, D., and Cooray, A. (2014). Dusty star-forming galaxies at high redshift. *physrep*, 541(2):45–161.
- Cassata, P., Guzzo, L., Franceschini, A., Scoville, N., Capak, P., Ellis, R. S., Koekemoer, A., McCracken, H. J., Mobasher, B., Renzini, A., Ricciardelli, E., Scodreggio, M., Taniguchi, Y., and Thompson, D. (2007). The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): The Morphological Content and Environmental Dependence of the Galaxy Color-Magnitude Relation at $z \sim 0.7$. *ApJs*, 172(1):270–283.

- Chapman, S. C., Blain, A. W., Smail, I., and Ivison, R. J. (2005). A Redshift Survey of the Submillimeter Galaxy Population. *APJ*, 622(2):772–796.
- Civano, F., Elvis, M., Brusa, M., Comastri, A., Salvato, M., Zamorani, G., Aldcroft, T., Bongiorno, A., Capak, P., Cappelluti, N., Cisternas, M., Fiore, F., Fruscione, A., Hao, H., Kartaltepe, J., Koekemoer, A., Gilli, R., Impey, C. D., Lanzuisi, G., Lusso, E., Mainieri, V., Miyaji, T., Lilly, S., Masters, D., Puccetti, S., Schawinski, K., Scoville, N. Z., Silverman, J., Trump, J., Urry, M., Vignali, C., and Wright, N. J. (2012). VizieR Online Data Catalog: The Chandra COSMOS survey. III. (Civano+, 2012). In *VizieR Online Data Catalog*, page J/ApJS/201/30. VizieR Online Data Catalog.
- Condon, J. J. (1992). Radio emission from normal galaxies. *ARAA*, 30:575–611.
- Condon, J. J., Anderson, M. L., and Helou, G. (1991). Correlations between Far-Infrared, Radio, and Blue Luminosities of Spiral Galaxies. *ApJ*, 376:95.
- Conselice, C. J. (1997). The Symmetry, Color, and Morphology of Galaxies. *PASP*, 109:1251–1255.
- Conselice, C. J. (2003). The Relationship between Stellar Light Distributions of Galaxies and Their Formation Histories. *APJS*, 147(1):1–28.
- Conselice, C. J. (2007). Galaxy Mergers and Interactions at High Redshift. In Combes, F. and Palouš, J., editors, *Galaxy Evolution across the Hubble Time*, volume 235, pages 381–384.
- Conselice, C. J., Bershady, M. A., and Jangren, A. (2000). The asymmetry of galaxies: Physical morphology for nearby and high-redshift galaxies. *The Astrophysical Journal*, 529(2):886–910.
- Conselice, C. J., Yang, C., and Bluck, A. F. L. (2009). The structures of distant galaxies - III. The merger history of over 20000 massive galaxies at $z < 1.2$. *MNRAS*, 394(4):1956–1972.
- Cooray, A. (2005). A brighter past: galaxy luminosity function at high redshifts. *MNRAS*, 364(1):303–318.
- Coppin, K., Pope, A., Menéndez-Delmestre, K., Alexander, D. M., and Dunlop, J. (2010). Starburst or AGN Dominance in Submillimetre-Luminous Candidate

- AGN? In Debattista, V. P. and Popescu, C. C., editors, *Hunting for the Dark: the Hidden Side of Galaxy Formation*, volume 1240 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 80–81.
- Crocker, A. F., Bureau, M., Young, L. M., and Combes, F. (2011). Molecular gas and star formation in early-type galaxies. *MNRAS*, 410(2):1197–1222.
- Croom, S. M., Smith, R. J., Boyle, B. J., Shanks, T., Loaring, N. S., Miller, L., and Lewis, I. J. (2001). The 2dF QSO Redshift Survey - V. The 10k catalogue. *MNRAS*, 322(4):L29–L36.
- Croom, S. M., Smith, R. J., Boyle, B. J., Shanks, T., Miller, L., Outram, P. J., and Loaring, N. S. (2004). The 2dF QSO Redshift Survey - XII. The spectroscopic catalogue and luminosity function. *MNRAS*, 349(4):1397–1418.
- Cunha, C. E., Huterer, D., Lin, H., Busha, M. T., and Wechsler, R. H. (2014). Spectroscopic failures in photometric redshift calibration: cosmological biases and survey requirements. *MNRAS*, 444(1):129–146.
- da Cunha, E., Charlot, S., and Elbaz, D. (2008). A simple model to interpret the ultraviolet, optical and infrared emission from galaxies. *MNRAS*, 388(4):1595–1617.
- da Cunha, E., Walter, F., Smail, I. R., Swinbank, A. M., Simpson, J. M., Decarli, R., Hodge, J. A., Weiss, A., van der Werf, P. P., Bertoldi, F., Chapman, S. C., Cox, P., Danielson, A. L. R., Dannerbauer, H., Greve, T. R., Ivison, R. J., Karim, A., and Thomson, A. (2015). An ALMA Survey of Sub-millimeter Galaxies in the Extended Chandra Deep Field South: Physical Properties Derived from Ultraviolet-to-radio Modeling. *APJ*, 806(1):110.
- De Marco, B., Adhikari, T. P., Ponti, G., Bianchi, S., Kriss, G. A., Arav, N., Behar, E., Branduardi-Raymont, G., Cappi, M., Costantini, E., Costanzo, D., di Gesu, L., Ebrero, J., Kaastra, J. S., Kaspi, S., Mao, J., Markowitz, A., Matt, G., Mehdipour, M., Middei, R., Paltani, S., Petrucci, P. O., Pinto, C., Rózańska, A., and Walton, D. J. (2020). Incoherent fast variability of X-ray obscurers. The case of NGC 3783. *AAP*, 634:A65.
- Del Moro, A., Alexander, D. M., Mullaney, J. R., Daddi, E., Pannella, M., Bauer, F. E., Pope, A., Dickinson, M., Elbaz, D., Barthel, P. D., Garrett, M. A.,

- Brandt, W. N., Charmandaris, V., Chary, R. R., Dasyra, K., Gilli, R., Hickox, R. C., Hwang, H. S., Ivison, R. J., Juneau, S., Le Floc'h, E., Luo, B., Morrison, G. E., Rovilos, E., Sargent, M. T., and Xue, Y. Q. (2013). GOODS-Herschel: radio-excess signature of hidden AGN activity in distant star-forming galaxies. *AAP*, 549:A59.
- Delhaize, J., Smolčić, V., Delvecchio, I., Novak, M., Sargent, M., Baran, N., Magnelli, B., Zamorani, G., Schinnerer, E., Murphy, E. J., Aravena, M., Berta, S., Bondi, M., Capak, P., Carilli, C., Ciliegi, P., Civano, F., Ilbert, O., Karim, A., Laigle, C., Le Fèvre, O., Marchesi, S., McCracken, H. J., Salvato, M., Seymour, N., and Tasca, L. (2017). The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: The infrared-radio correlation of star-forming galaxies and AGN to $z < 6$ (D17). *AAP*, 602:A4.
- Delvecchio, I., Daddi, E., Sargent, M. T., Jarvis, M. J., Elbaz, D., Jin, S., Liu, D., Whittam, I. H., Algera, H., Carraro, R., D'Eugenio, C., Delhaize, J., Kalita, B. S., Leslie, S., Molnár, D. C., Novak, M., Prandoni, I., Smolčić, V., Ao, Y., Aravena, M., Bournaud, F., Collier, J. D., Randriamampandry, S. M., Randriamanakoto, Z., Rodighiero, G., Schober, J., White, S. V., and Zamorani, G. (2021). The infrared-radio correlation of star-forming galaxies is strongly M_* -dependent but nearly redshift-invariant since $z \sim 4$ (D21). *AAP*, 647:A123.
- Delvecchio, I., Gruppioni, C., Pozzi, F., Berta, S., Zamorani, G., Cimatti, A., Lutz, D., Scott, D., Vignali, C., Cresci, G., Feltre, A., Cooray, A., Vaccari, M., Fritz, J., Le Floc'h, E., Magnelli, B., Popesso, P., Oliver, S., Bock, J., Carollo, M., Contini, T., Le Fèvre, O., Lilly, S., Mainieri, V., Renzini, A., and Scodreggio, M. (2014). Tracing the cosmic growth of supermassive black holes to $z \sim 3$ with Herschel. *MNRAS*, 439(3):2736–2754.
- Delvecchio, I., Smolčić, V., Zamorani, G., Lagos, C. D. P., Berta, S., Delhaize, J., Baran, N., Alexander, D. M., Rosario, D. J., Gonzalez-Perez, V., Ilbert, O., Lacey, C. G., Le Fèvre, O., Miettinen, O., Aravena, M., Bondi, M., Carilli, C., Ciliegi, P., Mooley, K., Novak, M., Schinnerer, E., Capak, P., Civano, F., Fanidakis, N., Herrera Ruiz, N., Karim, A., Laigle, C., Marchesi, S., McCracken, H. J., Middleberg, E., Salvato, M., and Tasca, L. (2017). The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: AGN and host-galaxy properties out to $z \sim 6$. *AAP*, 602:A3.

- Dempsey J.T., Holland W. S., and Chrysostomou A. (2012). Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. *SPIE*, 8452:p.845202.
- Dobbs, C. L. (2014). Star formation in galaxies: the role of spiral arms. In Feltzing, S., Zhao, G., Walton, N. A., and Whitelock, P., editors, *Setting the scene for Gaia and LAMOST*, volume 298, pages 221–227.
- Donevski, D. and Prodanović, T. (2015). Possible breaking of the FIR-radio correlation in tidally interacting galaxies (D15). *MNRAS*, 453(1):638–644.
- Donley, J. L., Koekemoer, A. M., Brusa, M., Capak, P., Cardamone, C. N., Civano, F., Ilbert, O., Impey, C. D., Kartaltepe, J. S., Miyaji, T., Salvato, M., Sanders, D. B., Trump, J. R., and Zamorani, G. (2012). Identifying Luminous Active Galactic Nuclei in Deep Surveys: Revised IRAC Selection Criteria. *ApJ*, 748(2):142.
- Donley, J. L., Rieke, G. H., Rigby, J. R., and Pérez-González, P. G. (2005). Unveiling a Population of AGNs Not Detected in X-Rays. *ApJ*, 634(1):169–182.
- Dopita, M. A., Pereira, M., Kewley, L. J., and Capaccioli, M. (2002). Star formation rates in interacting starburst galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 143(1):47–72.
- Drzazga, R. T., Chyży, K. T., Jurusik, W., and Wiórkiewicz, K. (2011). Magnetic field evolution in interacting galaxies. *AAP*, 533:A22.
- Dudzevičiūtė, U., Smail, I., Swinbank, A. M., Stach, S. M., Almaini, O., da Cunha, E., An, F. X., Arumugam, V., Birkin, J., Blain, A. W., Chapman, S. C., Chen, C. C., Conselice, C. J., Coppin, K. E. K., Dunlop, J. S., Farrah, D., Geach, J. E., Gullberg, B., Hartley, W. G., Hodge, J. A., Ivison, R. J., Maltby, D. T., Scott, D., Simpson, C. J., Simpson, J. M., Thomson, A. P., Walter, F., Wardlow, J. L., Weiss, A., and van der Werf, P. (2020). An ALMA survey of the SCUBA-2 CLS UDS field: physical properties of 707 sub-millimetre galaxies. *MNRAS*, 494(3):3828–3860.
- Dwek, E. and Arendt, R. G. (1992). Dust-gas interactions and the infrared emission from hot astrophysical plasmas. *ARAA*, 30:11–50.

- Elbaz, D., Leiton, R., Nagar, N., Okumura, K., Franco, M., Schreiber, C., Pannella, M., Wang, T., Dickinson, M., Díaz-Santos, T., Ciesla, L., Daddi, E., Bournaud, F., Magdis, G., Zhou, L., and Rujopakarn, W. (2018). Starbursts in and out of the star-formation main sequence. *AAP*, 616:A110.
- Elvis, M., Civano, F., Vignali, C., Puccetti, S., Fiore, F., Cappelluti, N., Aldcroft, T. L., Fruscione, A., Zamorani, G., Comastri, A., Brusa, M., Gilli, R., Miyaji, T., Damiani, F., Koekemoer, A. M., Finoguenov, A., Brunner, H., Urry, C. M., Silverman, J., Mainieri, V., Hasinger, G., Griffiths, R., Carollo, C. M., Hao, H., Guzzo, L., Blain, A., Calzetti, D., Carilli, C., Capak, P., Etori, S., Fabbiano, G., Impey, C., Lilly, S., Mobasher, B., Rich, M., Salvato, M., Sanders, D. B., Schinnerer, E., Scoville, N., Shopbell, P., Taylor, J. E., Taniguchi, Y., and Volonteri, M. (2009). The Chandra COSMOS Survey. I. Overview and Point Source Catalog. *ApJs*, 184(1):158–171.
- Ferrarese, L. (2002). Beyond the Bulge: A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Dark Matter Halos. *APJ*, 578(1):90–97.
- Ferreira, L., Adams, N., Conselice, C. J., Sazonova, E., Austin, D., Caruana, J., Ferrari, F., Verma, A., Trussler, J., Broadhurst, T., Diego, J., Frye, B. L., Pascale, M., Wilkins, S. M., Windhorst, R. A., and Zitrin, A. (2022). Panic! At the Disks: First Rest-frame Optical Observations of Galaxy Structure at $z > 3$ with JWST in the SMACS 0723 Field. *arXiv e-prints*, page arXiv:2207.09428.
- Ferreira, L., Conselice, C. J., Duncan, K., Cheng, T.-Y., Griffiths, A., and Whitney, A. (2020). Galaxy Merger Rates up to $z \sim 3$ Using a Bayesian Deep Learning Model: A Major-merger Classifier Using IllustrisTNG Simulation Data. *APJ*, 895(2):115.
- Friedmann, A. (1999). On the Curvature of Space. *General Relativity and Gravitation*, 31:1991.
- Gawiser, E., van Dokkum, P. G., Herrera, D., Maza, J., Castander, F. J., Infante, L., Lira, P., Quadri, R., Toner, R., Treister, E., Urry, C. M., Altmann, M., Assef, R., Christlein, D., Coppi, P. S., Durán, M. F., Franx, M., Galaz, G., Huerta, L., Liu, C., López, S., Méndez, R., Moore, D. C., Rubio, M., Ruiz, M. T., Toft, S., and Yi, S. K. (2006). The Multiwavelength Survey by Yale-Chile (MUSYC): Survey Design and Deep Public UBVRIZ Images and Catalogs of the Extended Hubble Deep Field-South. *APJS*, 162(1):1–19.

- Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Green, R., Grillmair, C., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J., Pinkney, J., Richstone, D., and Tremaine, S. (2000). A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. *APJL*, 539(1):L13–L16.
- Georgantopoulos, I. and Akylas, A. (2010). Comparison between the luminosity functions of X-ray and [OIII] selected AGN. *AAP*, 509:A38.
- Gilli, R., Comastri, A., and Hasinger, G. (2007). The synthesis of the cosmic X-ray background in the Chandra and XMM-Newton era. *AAP*, 463(1):79–96.
- González, J. E., Lacey, C. G., Baugh, C. M., and Frenk, C. S. (2011). The role of submillimetre galaxies in hierarchical galaxy formation. *MNRAS*, 413(2):749–762.
- Gültekin, K., Cackett, E. M., Miller, J. M., Di Matteo, T., Markoff, S., and Richstone, D. O. (2009). The Fundamental Plane of Accretion onto Black Holes with Dynamical Masses. *APJ*, 706(1):404–416.
- Gürkan, G., Hardcastle, M. J., Smith, D. J. B., Best, P. N., Bourne, N., Calistro-Rivera, G., Heald, G., Jarvis, M. J., Prandoni, I., Röttgering, H. J. A., Sabater, J., Shimwell, T., Tasse, C., and Williams, W. L. (2018). LOFAR/H-ATLAS: the low-frequency radio luminosity-star formation rate relation. *MNRAS*, 475(3):3010–3028.
- Helou, G., Soifer, B. T., and Rowan-Robinson, M. (1985). Thermal infrared and nonthermal radio : remarkable correlation in disks of galaxies. *ApJl*, 298:L7–L11.
- Hogan, M. T., Edge, A. C., Hlavacek-Larrondo, J., Grainge, K. J. B., Hamer, S. L., Mahony, E. K., Russell, H. R., Fabian, A. C., McNamara, B. R., and Wilman, R. J. (2015). A comprehensive study of the radio properties of brightest cluster galaxies. *MNRAS*, 453(2):1201–1222.
- Hopkins, P. F., Bundy, K., Murray, N., Quataert, E., Lauer, T. R., and Ma, C.-P. (2009). Compact high-redshift galaxies are the cores of the most massive present-day spheroids. *MNRAS*, 398(2):898–910.

- Hu, E. M., Cowie, L. L., and McMahon, R. G. (1998). The Density of Ly α Emitters at Very High Redshift. *APJL*, 502(2):L99–L103.
- Hubble, E. (1929). A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proceedings of the National Academy of Science*, 15(3):168–173.
- Hubble, E. (1936). Effects of Red Shifts on the Distribution of Nebulae. *APJ*, 84:517.
- Huggins, W. (1868). Further Observations on the Spectra of Some of the Stars and Nebulae, with an Attempt to Determine Therefrom Whether These Bodies are Moving towards or from the Earth, Also Observations on the Spectra of the Sun and of Comet II., 1868. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 158:529–564.
- Ivison, R. J., Smail, I., Papadopoulos, P. P., Wold, I., Richard, J., Swinbank, A. M., Kneib, J. P., and Owen, F. N. (2010). Gas, dust and stars in the SCUBA galaxy, SMMJ02399-0136: the EVLA reveals a colossal galactic nursery. *MNRAS*, 404(1):198–205.
- Jones, A. P., Fanciullo, L., Köhler, M., Verstraete, L., Guillet, V., Bocchio, M., and Ysard, N. (2013). The evolution of amorphous hydrocarbons in the ISM: dust modelling from a new vantage point. *AAP*, 558:A62.
- Kennicutt, R. C. (1998). Star formation in galaxies along the hubble sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1):189–231.
- Khochfar, S. and Burkert, A. (2003). The importance of spheroidal and mixed mergers for early-type galaxy formation. *The Astrophysical Journal*, 597(2):L117–L120.
- Khusanova, Y., Le Fèvre, O., Cassata, P., Cucciati, O., Lemaux, B. C., Tasca, L. A. M., Thomas, R., Garilli, B., Le Brun, V., Maccagni, D., Pentericci, L., Zamorani, G., Amorín, R., Bardelli, S., Castellano, M., Cassarà, L. P., Cimatti, A., Giavalisco, M., Hathi, N. P., Ilbert, O., Koekemoer, A. M., Marchi, F., Pforr, J., Ribeiro, B., Schaerer, D., Tresse, L., Vergani, D., and Zucca, E. (2020). UV and Ly α luminosity functions of galaxies and star formation rate density at the end of HI reionization from the VIMOS UltraDeep Survey (VUDS). *AAP*, 634:A97.

- Klein, U., Lisenfeld, U., and Verley, S. (2018). Radio synchrotron spectra of star-forming galaxies. *AAP*, 611:A55.
- Kotarba, H., Karl, S. J., Naab, T., Johansson, P. H., Dolag, K., Lesch, H., and Stasyszyn, F. A. (2010). Simulating Magnetic Fields in the Antennae Galaxies. *ApJ*, 716(2):1438–1452.
- Koutoulidis, L., Mountrichas, G., Georgantopoulos, I., Pouliaxis, E., and Plionis, M. (2022). Host galaxy properties of X-ray active galactic nuclei in the local Universe. *AAP*, 658:A35.
- Labiano, A., Argyriou, I., Álvarez-Márquez, J., Glasse, A., Glauser, A., Patapis, P., Law, D., Brandl, B. R., Justtanont, K., Lahuis, F., Martínez-Galarza, J. R., Mueller, M., Noriega-Crespo, A., Royer, P., Shaughnessy, B., and Vandenbussche, B. (2021). Wavelength calibration and resolving power of the JWST MIRI Medium Resolution Spectrometer. *AAP*, 656:A57.
- Lacy, M., Petric, A. O., Sajina, A., Canalizo, G., Storrie-Lombardi, L. J., Armus, L., Fadda, D., and Marleau, F. R. (2007). Optical Spectroscopy and X-Ray Detections of a Sample of Quasars and Active Galactic Nuclei Selected in the Mid-Infrared from Two Spitzer Space Telescope Wide-Area Surveys. *AJ*, 133(1):186–205.
- Laigle, C., McCracken, H. J., Ilbert, O., Hsieh, B. C., Davidzon, I., Capak, P., Hasinger, G., Silverman, J. D., Pichon, C., Coupon, J., Aussel, H., Le Borgne, D., Caputi, K., Cassata, P., Chang, Y. Y., Civano, F., Dunlop, J., Fynbo, J., Kartaltepe, J. S., Koekemoer, A., Le Fèvre, O., Le Floc’h, E., Leauthaud, A., Lilly, S., Lin, L., Marchesi, S., Milvang-Jensen, B., Salvato, M., Sanders, D. B., Scoville, N., Smolcic, V., Stockmann, M., Taniguchi, Y., Tasca, L., Toft, S., Vaccari, M., and Zabl, J. (2016). The COSMOS2015 Catalog: Exploring the $1 < z < 6$ Universe with Half a Million Galaxies. *ApJs*, 224(2):24.
- Latif, M. A., Schleicher, D. R. G., Spaans, M., and Zaroubi, S. (2011). Lyman alpha emission from the first galaxies: implications of UV backgrounds and the formation of molecules. *AAP*, 532:A66.
- Lau, R. M., Herter, T. L., Morris, M. R., Li, Z., and Adams, J. D. (2015). Old supernova dust factory revealed at the Galactic center. *Science*, 348(6233):413–418.

- Le Fèvre, O., Tasca, L. A. M., Cassata, P., Garilli, B., Le Brun, V., Maccagni, D., Pentericci, L., Thomas, R., Vanzella, E., Zamorani, G., Zucca, E., Amorin, R., Bardelli, S., Capak, P., Cassarà, L., Castellano, M., Cimatti, A., Cuby, J. G., Cucciati, O., de la Torre, S., Durkalec, A., Fontana, A., Giavalisco, M., Grazian, A., Hathi, N. P., Ilbert, O., Lemaux, B. C., Moreau, C., Paltani, S., Ribeiro, B., Salvato, M., Schaerer, D., Scoddeggio, M., Sommariva, V., Talia, M., Taniguchi, Y., Tresse, L., Vergani, D., Wang, P. W., Charlot, S., Contini, T., Fotopoulou, S., López-Sanjuan, C., Mellier, Y., and Scoville, N. (2015). The VIMOS Ultra-Deep Survey: *AAP*, 576:A79.
- Lee, N., Sanders, D. B., Casey, C. M., Toft, S., Scoville, N. Z., Hung, C.-L., Le Floch, E., Ilbert, O., Zahid, H. J., Aussel, H., Capak, P., Kartaltepe, J. S., Kewley, L. J., Li, Y., Schawinski, K., Sheth, K., and Xiao, Q. (2015). A Turnover in the Galaxy Main Sequence of Star Formation at $M_* \sim 10^{10} M_\odot$ for Redshifts $z < 1.3$. *APJ*, 801(2):80.
- Lemaître, G. (1931a). Expansion of the universe, A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extragalactic nebulae. *MNRAS*, 91:483–490.
- Lemaître, G. (1931b). Expansion of the universe, The expanding universe. *MNRAS*, 91:490–501.
- Liddle, A. (2003). *An introduction to modern cosmology; 2nd ed.* Wiley, Chichester.
- Lilly, S. J., Le Fèvre, O., Renzini, A., Zamorani, G., Scoddeggio, M., Contini, T., Carollo, C. M., Hasinger, G., Kneib, J. P., Iovino, A., Le Brun, V., Maier, C., Mainieri, V., Mignoli, M., Silverman, J., Tasca, L. A. M., Bolzonella, M., Bongiorno, A., Bottini, D., Capak, P., Caputi, K., Cimatti, A., Cucciati, O., Daddi, E., Feldmann, R., Franzetti, P., Garilli, B., Guzzo, L., Ilbert, O., Kampczyk, P., Kovac, K., Lamareille, F., Leauthaud, A., Le Borgne, J. F., McCracken, H. J., Marinoni, C., Pello, R., Ricciardelli, E., Scarlata, C., Vergani, D., Sanders, D. B., Schinnerer, E., Scoville, N., Taniguchi, Y., Arnouts, S., Aussel, H., Bardelli, S., Brusa, M., Cappi, A., Ciliegi, P., Finoguenov, A., Foucaud, S., Franceschini, A., Halliday, C., Impey, C., Knobel, C., Koekemoer, A., Kurk, J., Maccagni, D., Maddox, S., Marano, B., Marconi, G., Meneux, B., Mobasher, B., Moreau, C., Peacock, J. A., Porciani, C., Pozzetti, L.,

- Scaramella, R., Schiminovich, D., Shopbell, P., Smail, I., Thompson, D., Tresse, L., Vettolani, G., Zanichelli, A., and Zucca, E. (2007). zCOSMOS: A Large VLT/VIMOS Redshift Survey Covering $0 < z < 3$ in the COSMOS Field. *ApJs*, 172(1):70–85.
- Lisenfeld, U., Perez-Torres, M. A., Alberdi, A., Colina, L., Garcia-Burillo, S., and Alonso-Herrero, A. (2015). *The far-infrared-radio correlation in galaxies*. Spanish SKA White Book.
- Lisenfeld, U. and Völk, H. J. (1993). Dust heating in spiral galaxies and the far-infrared-radio correlation. In *Star Formation, Galaxies and the Interstellar Medium*, page 76.
- Lisenfeld, U. and Völk, H. J. (2010). Shock acceleration of relativistic particles in galaxy-galaxy collisions. *AAP*, 524:A27.
- Livio, M. (2011). Mystery of the missing text solved. *Nature*, 479:173.
- Livio, M. and Riess, A. G. (2013). Measuring the Hubble constant. *Physics Today*, 66(10):41.
- Lonsdale, C. J., Farrah, D., and Smith, H. E. (2006). Ultraluminous Infrared Galaxies. In Mason, J. W., editor, *Astrophysics Update 2*, page 285. Harvard press.
- Lorenz, M. O. (1905). Methods of measuring the concentration of wealth. *Publications of the American Statistical Association*, 9(70):209–219.
- Lotz, J. M., Primack, J., and Madau, P. (2004). A New Nonparametric Approach to Galaxy Morphological Classification. *AJ*, 128(1):163–182.
- Lutz, D., Poglitsch, A., Altieri, B., Andreani, P., Aussel, H., Berta, S., Bongiovanni, A., Brisbin, D., Cava, A., Cepa, J., Cimatti, A., Daddi, E., Dominguez-Sanchez, H., Elbaz, D., Förster Schreiber, N. M., Genzel, R., Grazian, A., Gruppioni, C., Harwit, M., Le Floc’h, E., Magdis, G., Magnelli, B., Maiolino, R., Nordon, R., Pérez García, A. M., Popesso, P., Pozzi, F., Riguccini, L., Rodighiero, G., Saintonge, A., Sanchez Portal, M., Santini, P., Shao, L., Sturm, E., Tacconi, L. J., Valtchanov, I., Wetzstein, M., and Wierprecht, E. (2011). PACS Evolutionary Probe (PEP) - A Herschel key program. *AAP*, 532:A90.

- Madau, P. and Dickinson, M. (2014). Cosmic Star-Formation History. *ARAA*, 52:415–486.
- Madau, P., Pozzetti, L., and Dickinson, M. (1998). The Star Formation History of Field Galaxies. *APJ*, 498(1):106–116.
- Magnelli, B., Ivison, R. J., Lutz, D., Valtchanov, I., Farrah, D., Berta, S., Bertoldi, F., Bock, J., Cooray, A., Ibar, E., Karim, A., Le Floc’h, E., Nordon, R., Oliver, S. J., Page, M., Popesso, P., Pozzi, F., Rigopoulou, D., Riguccini, L., Rodighiero, G., Rosario, D., Roseboom, I., Wang, L., and Wuyts, S. (2015). The far-infrared/radio correlation and radio spectral index of galaxies in the SFR- M_* plane up to $z \sim 2$. *AAP*, 573:A45.
- Magnelli, B., Lutz, D., Berta, S., Altieri, B., Andreani, P., Aussel, H., Castañeda, H., Cava, A., Cepa, J., Cimatti, A., Daddi, E., Dannerbauer, H., Dominguez, H., Elbaz, D., Förster Schreiber, N., Genzel, R., Grazian, A., Gruppioni, C., Magdis, G., Maiolino, R., Nordon, R., Pérez Fournon, I., Pérez García, I., Poglitsch, A., Popesso, P., Pozzi, F., Riguccini, L., Rodighiero, G., Saintonge, A., Santini, P., Sanchez-Portal, M., Shao, L., Sturm, E., Tacconi, L., Valtchanov, I., Wieprecht, E., and Wieworrek, E. (2010). Far-infrared properties of submillimeter and optically faint radio galaxies. *AAP*, 518:L28.
- Maiolino, R. and Mannucci, F. (2019). De re metallica: the cosmic chemical evolution of galaxies. *AAPR*, 27(1):3.
- Marchesi, S., Civano, F., Elvis, M., Salvato, M., Brusa, M., Comastri, A., Gilli, R., Hasinger, G., Lanzuisi, G., Miyaji, T., Treister, E., Urry, C. M., Vignali, C., Zamorani, G., Allevato, V., Cappelluti, N., Cardamone, C., Finoguenov, A., Griffiths, R. E., Karim, A., Laigle, C., LaMassa, S. M., Jahnke, K., Ranalli, P., Schawinski, K., Schinnerer, E., Silverman, J. D., Smolcic, V., Suh, H., and Trakhtenbrot, B. (2016). The Chandra COSMOS Legacy survey: optical/IR identifications. *ApJ*, 817(1):34.
- Martin, G., Kaviraj, S., Devriendt, J. E. G., Dubois, Y., Laigle, C., and Pichon, C. (2017). The limited role of galaxy mergers in driving stellar mass growth over cosmic time. *MNRAS*, 472(1):L50–L54.

- Mazoochi, F., Miraghaei, H., and Riazi, N. (2022). The relation between the radio emission of the core and host galaxy properties in Fanaroff-Riley type II radio galaxies. *PASA*, 39:e021.
- McAlpine, S., Smail, I., Bower, R. G., Swinbank, A. M., Trayford, J. W., Theuns, T., Baes, M., Camps, P., Crain, R. A., and Schaye, J. (2019). The nature of submillimetre and highly star-forming galaxies in the EAGLE simulation. *MNRAS*, 488(2):2440–2454.
- Michałowski, M., Hjorth, J., and Watson, D. (2010). Cosmic evolution of submillimeter galaxies and their contribution to stellar mass assembly. *AAP*, 514:A67.
- Miettinen, O., Delvecchio, I., Smolčić, V., Aravena, M., Brisbin, D., Karim, A., Magnelli, B., Novak, M., Schinnerer, E., Albrecht, M., Aussel, H., Bertoldi, F., Capak, P. L., Casey, C. M., Hayward, C. C., Ilbert, O., Intema, H. T., Jiang, C., Le Fèvre, O., McCracken, H. J., Muñoz Arancibia, A. M., Navarrete, F., Padilla, N. D., Riechers, D. A., Salvato, M., Scott, K. S., Sheth, K., and Tasca, L. A. M. (2017). An ALMA survey of submillimetre galaxies in the COSMOS field: Physical properties derived from energy balance spectral energy distribution modelling. *AAP*, 606:A17.
- Miller, N. A. and Owen, F. N. (2001). The Far-Infrared-Radio Correlation in Nearby Abell Clusters. *AJ*, 121(4):1903–1914.
- Miller, T. B., Hayward, C. C., Chapman, S. C., and Behroozi, P. S. (2015). The bias of the submillimetre galaxy population: SMGs are poor tracers of the most-massive structures in the $z \sim 2$ Universe. *MNRAS*, 452(1):878–883.
- Molnár, D. C., Sargent, M. T., Delhaize, J., Delvecchio, I., Smolčić, V., Novak, M., Schinnerer, E., Zamorani, G., Bondi, M., Herrera-Ruiz, N., Murphy, E. J., Vardoulaki, E., Karim, A., Leslie, S., Magnelli, B., Carollo, C. M., and Middelberg, E. (2018). The infrared-radio correlation of spheroid- and disc-dominated star-forming galaxies to $z \sim 1.5$ in the COSMOS field (M18). *MNRAS*, 475(1):827–838.
- Mortlock, A., Conselice, C. J., Hartley, W. G., Ownsworth, J. R., Lani, C., Bluck, A. F. L., Almaini, O., Duncan, K., van der Wel, A., Koekemoer, A. M., Dekel, A., Davé, R., Ferguson, H. C., de Mello, D. F., Newman, J. A., Faber,

- S. M., Grogin, N. A., Kocevski, D. D., and Lai, K. (2013). The redshift and mass dependence on the formation of the Hubble sequence at $z > 1$ from CANDELS/UDS. *MNRAS*, 433(2):1185–1201.
- Mundy, C. J., Conelice, C. J., Duncan, K. J., Almaini, O., Häußler, B., and Hartley, W. G. (2017). A consistent measure of the merger histories of massive galaxies using close-pair statistics - I. Major mergers at $z < 3.5$. *MNRAS*, 470(3):3507–3531.
- Murphy, E. J. (2009). The Far-Infrared-Radio Correlation at High Redshifts: Physical Considerations and Prospects for the Square Kilometer Array. *APJ*, 706(1):482–496.
- Murphy, E. J. (2013). THE ROLE OF MERGER STAGE ON GALAXY RADIO SPECTRA IN LOCAL INFRARED-BRIGHT STARBURST GALAXIES. *ApJ*, 777(1):58.
- Murphy, E. J., Bremseth, J., Mason, B. S., Condon, J. J., Schinnerer, E., Aniano, G., Armus, L., Helou, G., Turner, J. L., and Jarrett, T. H. (2012). The Star Formation in Radio Survey: GBT 33 GHz Observations of Nearby Galaxy Nuclei and Extranuclear Star-forming Regions. *ApJ*, 761(2):97.
- Murphy, E. J., Kenney, J. D. P., Helou, G., Chung, A., and Howell, J. H. (2009). ENVIRONMENTAL EFFECTS IN CLUSTERS: MODIFIED FAR-INFRARED-RADIO RELATIONS WITHIN VIRGO CLUSTER GALAXIES. *AAS*, 694(2):1435–1451.
- Netzer, H. (2013). *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*. Cambridge University Press.
- Norris, R. P., Afonso, J., Appleton, P. N., Boyle, B. J., Ciliegi, P., Croom, S. M., Huynh, M. T., Jackson, C. A., Koekemoer, A. M., Lonsdale, C. J., Middelberg, E., Mobasher, B., Oliver, S. J., Polletta, M., Siana, B. D., Smail, I., and Voronkov, M. A. (2006). Deep ATLAS Radio Observations of the Chandra Deep Field-South/Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Field. *AJ*, 132(6):2409–2423.
- Oesch, P. A., van Dokkum, P. G., Illingworth, G. D., Bouwens, R. J., Momcheva, I., Holden, B., Roberts-Borsani, G. W., Smit, R., Franx, M., Labbé, I.,

- González, V., and Magee, D. (2015). A Spectroscopic Redshift Measurement for a Luminous Lyman Break Galaxy at $z = 7.730$ Using Keck/MOSFIRE. *APJL*, 804(2):L30.
- Oliver, S. J., Bock, J., Altieri, B., Amblard, A., Arumugam, V., Aussel, H., Babbedge, T., Beelen, A., Béthermin, M., Blain, A., Boselli, A., Bridge, C., Brisbin, D., Buat, V., Burgarella, D., Castro-Rodríguez, N., Cava, A., Chanical, P., Cirasuolo, M., Clements, D. L., Conley, A., Conversi, L., Cooray, A., Dowell, C. D., Dubois, E. N., Dwek, E., Dye, S., Eales, S., Elbaz, D., Farrah, D., Feltre, A., Ferrero, P., Fiolet, N., Fox, M., Franceschini, A., Gear, W., Giovannoli, E., Glenn, J., Gong, Y., González Solares, E. A., Griffin, M., Halpern, M., Harwit, M., Hatziminaoglou, E., Heinis, S., Hurley, P., Hwang, H. S., Hyde, A., Ibar, E., Ilbert, O., Isaak, K., Ivison, R. J., Lagache, G., Le Floc'h, E., Levenson, L., Faro, B. L., Lu, N., Madden, S., Maffei, B., Magdis, G., Mainetti, G., Marchetti, L., Marsden, G., Marshall, J., Mortier, A. M. J., Nguyen, H. T., O'Halloran, B., Omont, A., Page, M. J., Panuzzo, P., Papageorgiou, A., Patel, H., Pearson, C. P., Pérez-Fournon, I., Pohlen, M., Rawlings, J. I., Raymond, G., Rigopoulou, D., Riguccini, L., Rizzo, D., Rodighiero, G., Roseboom, I. G., Rowan-Robinson, M., Sánchez Portal, M., Schulz, B., Scott, D., Seymour, N., Shupe, D. L., Smith, A. J., Stevens, J. A., Symeonidis, M., Trichas, M., Tugwell, K. E., Vaccari, M., Valtchanov, I., Vieira, J. D., Viero, M., Vigroux, L., Wang, L., Ward, R., Wardlow, J., Wright, G., Xu, C. K., and Zemcov, M. (2012). The Herschel Multi-tiered Extragalactic Survey: HerMES. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(3):1614–1635.
- Osterbrock, D. E. (1991). *ACTIVE GALACTIC NUCLEI*. Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey, 54 (1991) 579-633.
- Ouchi, M., Ono, Y., and Shibuya, T. (2020). Observations of the lyman- α universe. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 58(1):617–659.
- Park, S. Q., Barmby, P., Fazio, G. G., Nandra, K., Laird, E. S., Georgakakis, A., Rosario, D., Willner, S. P., Rieke, G. H., Ashby, M. L. N., Ivison, R. J., Coil, A. L., and Miyazaki, S. (2008). AEGIS: Radio and Mid-Infrared Selection of Obscured AGN Candidates. *ApJ*, 678(2):744–750.
- Pavlović, M. (2021). Does the fir-radio correlation evolve with redshift in irregular and disk galaxies? *Serbian Astronomical Journal*, 203:15–27.

- Pavlović, M. and Prodanović, T. (2019). Impact of galactic interactions on the evolution of the far-infrared-radio correlation. *MNRAS*, 489(4):4557–4564.
- Pearson, W. J., Wang, L., Trayford, J. W., Petrillo, C. E., and van der Tak, F. F. S. (2019). Identifying galaxy mergers in observations and simulations with deep learning. *AAP*, 626:A49.
- Penzias, A. A. and Wilson, R. W. (1965). A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *APJ*, 142:419–421.
- Pettini, M., King, D. L., Smith, L. J., and Hunstead, R. W. (1997). Dust in High-Redshift Galaxies. *APJ*, 478(2):536–541.
- Pier, E. A. and Krolik, J. H. (1993). Infrared Spectra of Obscuring Dust Tori around Active Galactic Nuclei. II. Comparison with Observations. *APJ*, 418:673.
- Pilbratt, G. L., Riedinger, J. R., Passvogel, T., Crone, G., Doyle, D., Gageur, U., Heras, A. M., Jewell, C., Metcalfe, L., Ott, S., and Schmidt, M. (2010). Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy. *AAP*, 518:L1.
- Pillepich, A., Springel, V., Nelson, D., Genel, S., Naiman, J., Pakmor, R., Hernquist, L., Torrey, P., Vogelsberger, M., Weinberger, R., and Marinacci, F. (2018). Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model. *MNRAS*, 473(3):4077–4106.
- Planck Collaboration, Aghanim, N., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Ballardini, M., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartolo, N., Basak, S., Battye, R., Benabed, K., Bernard, J. P., Bersanelli, M., Bielewicz, P., Bock, J. J., Bonaldi, A., Bonavera, L., Bond, J. R., Borrill, J., Bouchet, F. R., Boulanger, F., Bucher, M., Burigana, C., Butler, R. C., Calabrese, E., Cardoso, J. F., Carron, J., Challinor, A., Chiang, H. C., Colombo, L. P. L., Combet, C., Comis, B., Coulais, A., Crill, B. P., Curto, A., Cuttaia, F., Davis, R. J., de Bernardis, P., de Rosa, A., de Zotti, G., Delabrouille, J., Delouis, J. M., Di Valentino, E., Dickinson, C., Diego, J. M., Doré, O., Douspis, M., Ducout, A., Dupac, X., Efstathiou, G., Elsner, F., Enßlin, T. A., Eriksen, H. K., Falgarone, E., Fantaye, Y., Finelli, F., Forastieri, F., Frailis, M., Fraisse, A. A., Franceschi, E., Frolov, A., Galeotta, S., Galli, S., Ganga, K., Génova-Santos, R. T., Gerbino, M., Ghosh, T., González-Nuevo, J., Górski, K. M., Gratton, S., Gruppuso, A.,

- Gudmundsson, J. E., Hansen, F. K., Helou, G., Henrot-Versillé, S., Herranz, D., Hivon, E., Huang, Z., Ilić, S., Jaffe, A. H., Jones, W. C., Keihänen, E., Keskitalo, R., Kisner, T. S., Knox, L., Krachmalnicoff, N., Kunz, M., Kurki-Suonio, H., Lagache, G., Lamarre, J. M., Langer, M., Lasenby, A., Lattanzi, M., Lawrence, C. R., Le Jeune, M., Leahy, J. P., Levrier, F., Liguori, M., Lilje, P. B., López-Caniego, M., Ma, Y. Z., Macías-Pérez, J. F., Maggio, G., Mangilli, A., Maris, M., Martin, P. G., Martínez-González, E., Matarrese, S., Mauri, N., McEwen, J. D., Meinhold, P. R., Melchiorri, A., Mennella, A., Migliaccio, M., Miville-Deschênes, M. A., Molinari, D., Moneti, A., Montier, L., Morgante, G., Moss, A., Mottet, S., Naselsky, P., Natoli, P., Oxborrow, C. A., Pagano, L., Paoletti, D., Partridge, B., Patanchon, G., Patrizzii, L., Perdereau, O., Perotto, L., Pettorino, V., Piacentini, F., Plaszczyński, S., Polastri, L., Polenta, G., Puget, J. L., Rachen, J. P., Racine, B., Reinecke, M., Remazeilles, M., Renzi, A., Rocha, G., Rossetti, M., Roudier, G., Rubiño-Martín, J. A., Ruiz-Granados, B., Salvati, L., Sandri, M., Savelainen, M., Scott, D., Sirri, G., Sunyaev, R., Suur-Uski, A. S., Tauber, J. A., Tenti, M., Toffolatti, L., Tomasi, M., Tristram, M., Trombetti, T., Valiviita, J., Van Tent, F., Vibert, L., Vielva, P., Villa, F., Vittorio, N., Wandelt, B. D., Watson, R., Wehus, I. K., White, M., Zacchei, A., and Zonca, A. (2016). Planck intermediate results. XLVI. Reduction of large-scale systematic effects in HFI polarization maps and estimation of the reionization optical depth. *AAP*, 596:A107.
- Popović, Luka i Ilić, D. (2017). *Aktivna galaktička jezgra*. Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, ISBN 978-86-7589-120-8.
- Prodanović, T., Bogdanović, T., and Urošević, D. (2013). Galactic fly-bys: New source of lithium production. *PRD*, 87(10):103014.
- Quadri, R. F. and Williams, R. J. (2010). Quantifying Photometric Redshift Errors in the Absence of Spectroscopic Redshifts. *APJ*, 725(1):794–802.
- Ricci, C., Walter, R., Courvoisier, T. J. L., and Paltani, S. (2011). Reflection in Seyfert galaxies and the unified model of AGN. *AAP*, 532:A102.
- Ricciardelli, E., Trujillo, I., Buitrago, F., and Conselice, C. J. (2010). The evolutionary sequence of submillimetre galaxies: from diffuse discs to massive compact ellipticals? *MNRAS*, 406(1):230–236.

- Robertson, B. E., Ellis, R. S., Dunlop, J. S., McLure, R. J., and Stark, D. P. (2010). Early star-forming galaxies and the reionization of the Universe. *NAT*, 468(7320):49–55.
- Rodriguez-Gomez, V., Genel, S., Vogelsberger, M., Sijacki, D., Pillepich, A., Sales, L. V., Torrey, P., Snyder, G., Nelson, D., Springel, V., Ma, C.-P., and Hernquist, L. (2015). The merger rate of galaxies in the Illustris simulation: a comparison with observations and semi-empirical models. *MNRAS*, 449(1):49–64.
- Romero, G. E., Müller, A. L., and Roth, M. (2018). Particle acceleration in the superwinds of starburst galaxies. *AAP*, 616:A57.
- Rowlands, K., Gomez, H. L., Dunne, L., Aragón-Salamanca, A., Dye, S., Maddox, S., da Cunha, E., and van der Werf, P. (2014). The dust budget crisis in high-redshift submillimetre galaxies. *MNRAS*, 441(2):1040–1058.
- Sajina, A., Yan, L., Lutz, D., Steffen, A., Helou, G., Huynh, M., Frayer, D., Choi, P., Tacconi, L., and Dasyra, K. (2008). Spitzer Mid-Infrared Spectroscopy of Infrared Luminous Galaxies at $z \sim 2$. III. Far-IR to Radio Properties and Optical Spectral Diagnostics. *ApJ*, 683(2):659–682.
- Salvato, M., Hasinger, G., Ilbert, O., Zamorani, G., Brusa, M., Scoville, N. Z., Rau, A., Capak, P., Arnouts, S., Aussel, H., Bolzonella, M., Buongiorno, A., Cappelluti, N., Caputi, K., Civano, F., Cook, R., Elvis, M., Gilli, R., Jahnke, K., Kartaltepe, J. S., Impey, C. D., Lamareille, F., Le Floc’h, E., Lilly, S., Mainieri, V., McCarthy, P., McCracken, H., Mignoli, M., Mobasher, B., Murayama, T., Sasaki, S., Sanders, D. B., Schiminovich, D., Shioya, Y., Shopbell, P., Silverman, J., Smolčić, V., Surace, J., Taniguchi, Y., Thompson, D., Trump, J. R., Urry, M., and Zamojski, M. (2009). Photometric Redshift and Classification for the XMM-COSMOS Sources. *APJ*, 690(2):1250–1263.
- Salvato, M., Ilbert, O., and Hoyle, B. (2019). The many flavours of photometric redshifts. *Nature Astronomy*, 3:212–222.
- Sanders, D. B. and Mirabel, I. F. (1996). Luminous Infrared Galaxies. *ARAA*, 34:749.
- Santini, P., Maiolino, R., Magnelli, B., Lutz, D., Lamastra, A., Li Causi, G., Eales, S., Andreani, P., Berta, S., Buat, V., Cooray, A., Cresci, G., Daddi, E.,

- Farrah, D., Fontana, A., Franceschini, A., Genzel, R., Granato, G., Grazian, A., Le Floch, E., Magdis, G., Magliocchetti, M., Mannucci, F., Menci, N., Nordon, R., Oliver, S., Popesso, P., Pozzi, F., Riguccini, L., Rodighiero, G., Rosario, D. J., Salvato, M., Scott, D., Silva, L., Tacconi, L., Viero, M., Wang, L., Wuyts, S., and Xu, K. (2014). The evolution of the dust and gas content in galaxies. *AAP*, 562:A30.
- Sargent, M. T., Carollo, C. M., Lilly, S. J., Scarlata, C., Feldmann, R., Kampczyk, P., Koekemoer, A. M., Scoville, N., Kneib, J. P., Leauthaud, A., Massey, R., Rhodes, J., Tasca, L. A. M., Capak, P., McCracken, H. J., Porciani, C., Renzini, A., Taniguchi, Y., Thompson, D. J., and Sheth, K. (2007). The Evolution of the Number Density of Large Disk Galaxies in COSMOS. *ApJs*, 172(1):434–455.
- Sargent, M. T., Schinnerer, E., Murphy, E., Carilli, C. L., Helou, G., Aussel, H., Le Floch, E., Frayer, D. T., Ilbert, O., Oesch, P., Salvato, M., Smolčić, V., Kartaltepe, J., and Sanders, D. B. (2010). No Evolution in the IR-Radio Relation for IR-luminous Galaxies at $z < 2$ in the COSMOS Field. *ApJL*, 714(2):L190–L195.
- Scarlata, C., Carollo, C. M., Lilly, S., Sargent, M. T., Feldmann, R., Kampczyk, P., Porciani, C., Koekemoer, A., Scoville, N., Kneib, J. P., Leauthaud, A., Massey, R., Rhodes, J., Tasca, L., Capak, P., Maier, C., McCracken, H. J., Mobasher, B., Renzini, A., Taniguchi, Y., Thompson, D., Sheth, K., Ajiki, M., Aussel, H., Murayama, T., Sanders, D. B., Sasaki, S., Shioya, Y., and Takahashi, M. (2007). COSMOS Morphological Classification with the Zurich Estimator of Structural Types (ZEST) and the Evolution Since $z = 1$ of the Luminosity Function of Early, Disk, and Irregular Galaxies. *ApJs*, 172(1):406–433.
- Schawinski, K., Koss, M., Berney, S., and Sartori, L. F. (2015). Active galactic nuclei flicker: an observational estimate of the duration of black hole growth phases of $\sim 10^5$ yr. *MNRAS*, 451(3):2517–2523.
- Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., McCarthy, I. G., Helly, J. C., Jenkins, A., Rosas-Guevara, Y. M., White, S. D. M., Baes, M., Booth, C. M., Camps, P., Navarro, J. F., Qu, Y., Rahmati, A., Sawala, T., Thomas, P. A., and Trayford, J. (2015). The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. *MNRAS*, 446(1):521–554.

- Schechter, P. (1976). An analytic expression for the luminosity function for galaxies. *APJ*, 203:297–306.
- Schinnerer, E., Sargent, M. T., Bondi, M., Smolcic, V., Datta, A., Carilli, C. L., Bertoldi, F., Blain, A., Ciliegi, P., Koekemoer, A., and Scoville, N. Z. (2010). VizieR Online Data Catalog: The VLA-COSMOS survey. IV. (Schinnerer+, 2010). In *VizieR Online Data Catalog*, page J/ApJS/188/384. VizieR Online Data Catalog.
- Schleicher, D. R. G. and Beck, R. (2016). Star-forming dwarf galaxies: the correlation between far-infrared and radio fluxes. *AAP*, 593:A77.
- Schreiber, C., Elbaz, D., Pannella, M., Ciesla, L., Wang, T., and Franco, M. (2018). Dust temperature and mid-to-total infrared color distributions for star-forming galaxies at $0 < z < 4$. *AAP*, 609:A30.
- Schreiber, C., Pannella, M., Elbaz, D., Béthermin, M., Inami, H., Dickinson, M., Magnelli, B., Wang, T., Aussel, H., Daddi, E., Juneau, S., Shu, X., Sargent, M. T., Buat, V., Faber, S. M., Ferguson, H. C., Giavalisco, M., Koekemoer, A. M., Magdis, G., Morrison, G. E., Papovich, C., Santini, P., and Scott, D. (2015). The Herschel view of the dominant mode of galaxy growth from $z = 4$ to the present day. *AAP*, 575:A74.
- Sedgwick, T. M., Baldry, I. K., James, P. A., Kaviraj, S., and Martin, G. (2021). The Star Formation Rates of Elliptical Galaxies from Core-Collapse Supernovae. *arXiv e-prints*, page arXiv:2106.13812.
- Shangguan, J., Ho, L. C., Li, R., Zhuang, M.-Y., Xie, Y., and Li, Z. (2019). Interstellar Medium and Star Formation of Starburst Galaxies on the Merger Sequence. *APJ*, 870(2):104.
- Simpson, J. M., Smail, I., Swinbank, A. M., Alexander, D. M., Auld, R., Baes, M., Bonfield, D. G., Clements, D. L., Cooray, A., Coppin, K. E. K., Danielson, A. L. R., Dariush, A., Dunne, L., de Zotti, G., Harrison, C. M., Hopwood, R., Hoyos, C., Ibar, E., Ivison, R. J., Jarvis, M. J., Lapi, A., Maddox, S. J., Page, M. J., Riechers, D. A., Valiante, E., and van der Werf, P. P. (2012). The evolutionary connection between QSOs and SMGs: molecular gas in far-infrared luminous QSOs at $z \sim 2.5$. *MNRAS*, 426(4):3201–3210.

- Simpson, J. M., Swinbank, A. M., Smail, I., Alexander, D. M., Brandt, W. N., Bertoldi, F., de Breuck, C., Chapman, S. C., Coppin, K. E. K., da Cunha, E., Danielson, A. L. R., Dannerbauer, H., Greve, T. R., Hodge, J. A., Ivison, R. J., Karim, A., Knudsen, K. K., Poggianti, B. M., Schinnerer, E., Thomson, A. P., Walter, F., Wardlow, J. L., Weiß, A., and van der Werf, P. P. (2014). AN ALMA SURVEY OF SUBMILLIMETER GALAXIES IN THE EXTENDED CHANDRA DEEP FIELD SOUTH: THE REDSHIFT DISTRIBUTION AND EVOLUTION OF SUBMILLIMETER GALAXIES. *The Astrophysical Journal*, 788(2):125.
- Smail, I., Ivison, R. J., and Blain, A. W. (1997). A Deep Sub-millimeter Survey of Lensing Clusters: A New Window on Galaxy Formation and Evolution. *APJL*, 490(1):L5–L8.
- Smith, D. J. B., Jarvis, M. J., Hardcastle, M. J., Vaccari, M., Bourne, N., Dunne, L., Ibar, E., Maddox, N., Prescott, M., Vlahakis, C., Eales, S., Maddox, S. J., Smith, M. W. L., Valiante, E., and de Zotti, G. (2014). The temperature dependence of the far-infrared-radio correlation in the Herschel-ATLAS. *MNRAS*, 445(3):2232–2243.
- Smolčić, V. (2009). The Radio AGN Population Dichotomy: Green Valley Seyferts Versus Red Sequence Low-Excitation Active Galactic Nuclei. *APJ*, 699(1):L43–L47.
- Smolčić, V., Delvecchio, I., Zamorani, G., Baran, N., Novak, M., Delhaize, J., Schinnerer, E., Berta, S., Bondi, M., Ciliegi, P., Capak, P., Civano, F., Karim, A., Le Fevre, O., Ilbert, O., Laigle, C., Marchesi, S., McCracken, H. J., Tasca, L., Salvato, M., and Vardoulaki, E. (2017a). The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Multiwavelength counterparts and the composition of the faint radio population. *AAP*, 602:A2.
- Smolčić, V., Karim, A., Miettinen, O., Novak, M., Magnelli, B., Riechers, D. A., Schinnerer, E., Capak, P., Bondi, M., Ciliegi, P., Aravena, M., Bertoldi, F., Bourke, S., Banfield, J., Carilli, C. L., Civano, F., Ilbert, O., Intema, H. T., Le Fèvre, O., Finoguenov, A., Hallinan, G., Klöckner, H. R., Koekemoer, A., Laigle, C., Masters, D., McCracken, H. J., Mooley, K., Murphy, E., Navarette, F., Salvato, M., Sargent, M., Sheth, K., Toft, S., and Zamorani, G. (2015).

- Physical properties of $z > 4$ submillimeter galaxies in the COSMOS field. *AAP*, 576:A127.
- Smolčić, V., Novak, M., Bondi, M., Ciliegi, P., Mooley, K. P., Schinnerer, E., Zamorani, G., Navarrete, F., Bourke, S., Karim, A., Vardoulaki, E., Leslie, S., Delhaize, J., Carilli, C. L., Myers, S. T., Baran, N., Delvecchio, I., Miettinen, O., Banfield, J., Baloković, M., Bertoldi, F., Capak, P., Frail, D. A., Hallinan, G., Hao, H., Herrera Ruiz, N., Horesh, A., Ilbert, O., Intema, H., Jelić, V., Klöckner, H. R., Krpan, J., Kulkarni, S. R., McCracken, H., Laigle, C., Middleberg, E., Murphy, E. J., Sargent, M., Scoville, N. Z., and Sheth, K. (2017b). The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Continuum data and source catalog release. *AAP*, 602:A1.
- Springel, V. and Hernquist, L. (2005). Formation of a Spiral Galaxy in a Major Merger. *APJL*, 622(1):L9–L12.
- Steffen, A. T., Barger, A. J., Cowie, L. L., Mushotzky, R. F., and Yang, Y. (2003). The Changing Active Galactic Nucleus Population. *APJL*, 596(1):L23–L26.
- Strong, A. W., Moskalenko, I. V., and Ptuskin, V. S. (2007). Cosmic-ray propagation and interactions in the galaxy. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 57(1):285–327.
- Sunyaev, R. A. (1974). *The Thermal History of the Universe and the Spectrum of Relic Radiation*, pages 167–173. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Tasca, L. A. M., Kneib, J. P., Iovino, A., Le Fèvre, O., Kovač, K., Bolzonella, M., Lilly, S. J., Abraham, R. G., Cassata, P., Cucciati, O., Guzzo, L., Tresse, L., Zamorani, G., Capak, P., Garilli, B., Scodreggio, M., Sheth, K., Zucca, E., Carollo, C. M., Contini, T., Mainieri, V., Renzini, A., Bardelli, S., Bongiorno, A., Caputi, K., Coppa, G., de La Torre, S., de Ravel, L., Franzetti, P., Kampczyk, P., Knobel, C., Koekemoer, A. M., Lamareille, F., Le Borgne, J. F., Le Brun, V., Maier, C., Mignoli, M., Pello, R., Peng, Y., Perez Montero, E., Ricciardelli, E., Silverman, J. D., Vergani, D., Tanaka, M., Abbas, U., Bottini, D., Cappi, A., Cimatti, A., Ilbert, O., Leauthaud, A., Maccagni, D., Marinoni, C., McCracken, H. J., Memeo, P., Meneux, B., Oesch, P., Porciani, C., Pozzetti, L., Scaramella, R., and Scarlata, C. (2009). The zCOSMOS redshift survey: the role of environment and stellar mass in shaping the rise of the morphology-density relation from $z \sim 1$. *AAP*, 503(2):379–398.

- Tasca, L. A. M., Le Fèvre, O., Ribeiro, B., Thomas, R., Moreau, C., Cassata, P., Garilli, B., Le Brun, V., Lemaux, B. C., Maccagni, D., Pentericci, L., Schaerer, D., Vanzella, E., Zamorani, G., Zucca, E., Amorin, R., Bardelli, S., Cassarà, L. P., Castellano, M., Cimatti, A., Cucciati, O., Durkalec, A., Fontana, A., Giavalisco, M., Grazian, A., Hathi, N. P., Ilbert, O., Paltani, S., Pforr, J., Scoddeggio, M., Sommariva, V., Talia, M., Tresse, L., Vergani, D., Capak, P., Charlot, S., Contini, T., de la Torre, S., Dunlop, J., Fotopoulou, S., Guaita, L., Koekemoer, A., López-Sanjuan, C., Mellier, Y., Salvato, M., Scoville, N., Taniguchi, Y., and Wang, P. W. (2017). The VIMOS Ultra Deep Survey first data release: Spectra and spectroscopic redshifts of 698 objects up to z_{spec} 6 in CANDELS. *AAP*, 600:A110.
- Tielens, A. G. G. M. (1998). Interstellar Depletions and the Life Cycle of Interstellar Dust. *APJ*, 499(1):267–272.
- Toomre, A. (1977). Mergers and Some Consequences. In Tinsley, B. M. and Larson, Richard B. Gehret, D. C., editors, *Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, page 401.
- Toomre, A. and Toomre, J. (1972). Galactic Bridges and Tails. *APJ*, 178:623–666.
- Tozzi, P., Gilli, R., Mainieri, V., Norman, C., Risaliti, G., Rosati, P., Bergeron, J., Borgani, S., Giacconi, R., Hasinger, G., Nonino, M., Streblyanska, A., Szokoly, G., Wang, J. X., and Zheng, W. (2006). X-ray spectral properties of active galactic nuclei in the Chandra Deep Field South. *AAP*, 451(2):457–474.
- Treister, E., Urry, C. M., Chatzichristou, E., Bauer, F., Alexander, D. M., Koekemoer, A., Van Duyne, J., Brandt, W. N., Bergeron, J., Stern, D., Moustakas, L. A., Chary, R.-R., Conselice, C., Cristiani, S., and Grogin, N. (2004). Obscured Active Galactic Nuclei and the X-Ray, Optical, and Far-Infrared Number Counts of Active Galactic Nuclei in the GOODS Fields. *APJ*, 616(1):123–135.
- van der Kruit, P. C. (1971). Observations of core sources in Seyfert and normal galaxies with the Westerbork synthesis radio telescope at 1415 MHz. *AAP*, 15:110–122.

- Vega, O., Clemens, M. S., and Bressan, A. (2009). *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica: Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 61C:101–101.
- Ventou, E. (2018). *Cosmological evolution of the galaxy merger rate from MUSE deep fields*. Theses, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Ventou, E., Contini, T., Bouché, N., Epinat, B., Brinchmann, J., Bacon, R., Inami, H., Lam, D., Drake, A., Garel, T., Michel-Dansac, L., Pello, R., Steinmetz, M., Weilbacher, P. M., Wisotzki, L., and Carollo, M. (2017). The MUSE Hubble Ultra Deep Field Survey. IX. Evolution of galaxy merger fraction since $z \approx 6$. *AAP*, 608:A9.
- Vito, F., Brandt, W. N., Yang, G., Gilli, R., Luo, B., Vignali, C., Xue, Y. Q., Comastri, A., Koekemoer, A. M., Lehmer, B. D., Liu, T., Paolillo, M., Ranalli, P., Schneider, D. P., Shemmer, O., Volonteri, M., and Wang, J. (2018). High-redshift AGN in the Chandra Deep Fields: the obscured fraction and space density of the sub- L_* population. *MNRAS*, 473(2):2378–2406.
- Vito, F., Gilli, R., Vignali, C., Comastri, A., Brusa, M., Cappelluti, N., and Iwasawa, K. (2014). The hard X-ray luminosity function of high-redshift ($3 < z < 5$) active galactic nuclei. *MNRAS*, 445(4):3557–3574.
- Vogelsberger, M., Nelson, D., Pillepich, A., Shen, X., Marinacci, F., Springel, V., Pakmor, R., Tacchella, S., Weinberger, R., Torrey, P., and Hernquist, L. (2020). High-redshift JWST predictions from IllustrisTNG: dust modelling and galaxy luminosity functions. *MNRAS*, 492(4):5167–5201.
- Wang, L., Gao, F., Duncan, K. J., Williams, W. L., Rowan-Robinson, M., Sabater, J., Shimwell, T. W., Bonato, M., Calistro-Rivera, G., Chyży, K. T., Farrah, D., Gürkan, G., Hardcastle, M. J., McCheyne, I., Prandoni, I., Read, S. C., Röttgering, H. J. A., and Smith, D. J. B. (2019). A LOFAR-IRAS cross-match study: the far-infrared radio correlation and the 150 MHz luminosity as a star-formation rate tracer. *AAP*, 631:A109.
- Wang, T. (2019). ALMA unveils massive galaxies at $z > 3$ that are hidden from Hubble. In *ALMA2019: Science Results and Cross-Facility Synergies*, page 6.
- Yun, M. S., Reddy, N. A., and Condon, J. J. (2001). Radio Properties of Infrared-selected Galaxies in the IRAS 2 Jy Sample (Y01). *ApJ*, 554(2):803–822.

Биографија аутора

Марина Павловић, мастер физике (астрофизике), запослена као истраживач сарадник на Математичком институту Српске академије наука и уметности. Тренутно студент докторских студија Астрономије и астрофизике на Математичком факултету, универзитета у Београду. Основне и мастер студије физике - Астрономија са астрофизиком завршила на Природно-математичком факултету у Новом Саду. Ужа научна област истраживања: Морфологија галаксија на великим црвеним помацима, Судари галаксија, Далека инфрацрвена-радио корелација, Ударни таласи у међузвезданој средини, Космичко зрачење. Члан управног одбора Невладине Организације *Centre for Astronomy*, од оснивања 2019. године. Члан надзорног одбора Астрономског друштва Нови Сад, а активан члан друштва од октобра 2012. године (организатор догађаја, популаризација науке, радионице за децу, кратке школе астрономије, астрономска посматрања, пројекције испод куполе за грађанство, школе и вртиће, рад са телескопом, рад у покретном планетаријуму). Редован члан Клуба Физичара Природно математичког факултета (организатор догађаја и радионица, научни саветник, популаризација науке). Члан организационог одбора конференције „Елементи и догађаји у астрономији и физици на подручју данашње Војводине“ за 2019. и 2020. годину. Члан Друштва Астронома Србије и Међународне заједнице „Тамно Небо“. Од 2021. године, члан националног тима за образовање у Астрономији у Међународној Астрономској Унији.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Марина Павловић

број индекса 2008/2018

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

УТИЦАЈ ИНТЕРАКЦИЈА УДАЉЕНИХ ГАЛАКСИЈА НА ЊИХОВО НЕТЕРМАЛНО
РАДИО-ЗРАЧЕЊЕ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 16.3.2022.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Марина Павловић

Број индекса 2008/2018

Студијски програм Астрономија и астрофизика

Наслов рада Утицај интеракција удаљених галаксија на њихово нетермално радио-зрачење

Ментор проф. Др Тијана Продановић

Потписани/а Марина Павловић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 16.3.2022.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Утицај интеракција удаљених галаксија на њихово нетермално радио-зрачење“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 16.3.2022.
