

Наставно-научном већу  
Математичког факултета  
Универзитета у Београду

Одлуком Наставно-научног већа Математичког факултета Универзитет у Београду донетој на 392. седници 15.04.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације „**Утицај интеракција удаљених галаксија на њихово нетермално радио-зрачење**”, кандидаткиње **Марине Павловић**. Након прегледа дисертације, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1 Основни подаци о кандидату и дисертацији

**Биографија кандидата:** Марина Павловић, рођена је 6.6.1993. године у Лесковцу. Основну школу и гимназију завршила је у Власотинцу. Школске 2012/2013 године уписала је основне студије физике (Астрофизика са астрономијом) на Природно-математичком факултету у Новом Саду, које је завршила 2017. године са просечном оценом 8.71. Мастер студије физике (Астрофизика са астрономијом) завршила је 2018. године са просечном оценом 10.00, такође на Прородно-математичком факултету у Новом Саду. Године 2018. је уписала докторске студије на студијском програму Астрономија и астрофизика на Математичком факултету у Београду на којем је положио све предмете предвиђене планом и програмом са просечном оценом 9.50. Од децембра 2018. године запослена је на Математичком институту Српске Академије Наука и Уметности где тренутно ради као истраживач-сарадник. Од 2012. године активно се бави промоцијом и популаризацијом науке.

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

**Обим дисертације и библиографија:** Дисертација се састоји од 117 страна и библиографије (укупно 143 стране). Главни део дисертације сачињавају увод, теоријски део у два поглавља, истраживачки део у два поглавља, закључак, литература са 192 референце и биографија аутора.

## 2 Предмет и циљ дисертације

Предмет ове докторске дисертације јесте утицај интеракција галаксија на њихово нетермално радио зрачење на високим црвеним помацима. Посебна пажња посвећена је такозваној далекој инфрацрвеној-радио корелацији (у даљем тексту ”ДИР корелација”). Ова корелација има многе примене у астрофизици, а једна од најбитнијих јесте проучавање стопе формирања звезда код звездородних галаксија у младом универзуму. Како је у скорије време показано да долази до еволуције корелације ка већим црвеним помацима, велико питање које остаје јесте шта покреће ову еволуцију? Као могући физички процес који би био заслужан за овакво понашање јесте судар или блиски пролаз између галаксија, што је у основи предмет проучавања овог рада.

У раду су представљени различити могући ефекти и последице судара између галаксија на њихово нетермално радио зрачење. У теоријском уводу налази се опис самог значаја корелације у астрофизици и проучавању далеких галаксија уопштено, те неки новији резултати и посматрања која су и довела до открића проблема еволуције корелације. Такође описана је хипотеза интеракција галаксија као физичког процеса који покреће ову еволуцију. Главни део истраживања састоји се од представљања теоријских модела утицаја судара галаксија на еволуцију корелације, конкретно на радио нетермално зрачење код ових система. Сви модели проверени су на узорку већ снимљених галаксија, а рад садржи и детаљну анализу истих, као што је одређивање морфологије галаксија, критеријуми за избацивање активних галактичких језгара (АГЈ), начини фитовања криве спектралне енергетске расподеле, као и детаљан опис свих коришћених каталога за преузимање података и начин обраде података. Коначно, у раду су приказани добијени резултати и њихова интерпретација, али и план за будуће истраживање, јер су се кроз садашње отворили нови проблеми, који би посматрану еволуцију корелације могли да доведу у питање.

Примарни научни циљ ове докторске дисертације је испитивање да ли је додатно синхротронско зрачење које настаје приликом судара галаксија довољно да објасни еволуцију Далеке инфрацрвене-радио корелације. Поред тога, разумевање ове корелације може побољшати њену употребу за одређивање стопе формирања звезда у далеким галаксијама, као и њихову еволуцију ка галаксијама у локалном универзуму. Праћење промена нетермалног радио зрачења, може се употребити за одређивање стадијума судара галаксија на великим црвеним помацима.

Секундарни циљ ове докторске дисертације је анализа устаљених критеријума за одређивање морфологије галаксија на црвеним помацима већим од 1 и критеријума за детектовање АГЈ-а као и предлог за њихову корекцију и побољшање.

### 3 Основне хипотезе од којих се полазило у истраживању

Померање од типичне ДИР корелације, и вишак радио емисије, уочен је у случајевима галаксија које су у средњем стадијуму интеракције када се између њих појављује мост од гаса са јаком емисијом синхротронског зрачења. Вишак радио зрачења (нетермалног) се вероватно јавља због убрзања наелектрисаних честица у јаким ударним таласима који настају у мосту између галаксија које интерагују. Одступање од корелације се највероватније јавља и у самим галаксијама због јаких ударних таласа, а не само у мосту између њих. Скорије хипотезе кажу да овакви ударни таласи који настају приликом интеракција (судара и блиских пролаза) галаксија, повећавају популацију такозваних плимских космичких зракова. Јасно је да ће присуство додатних космичких зрака такође утицати и на појачано нетермално радио зрачење. Све ове појаве ће довести и до дисперзије у ДИР корелацији. Идеју да судари галаксија покрећу еволуцију корелације са црвеним помаком подржава и чињеница да су судари галаксија били много учесталији на већим црвеним помацима. Такође, сматра се да су неправилне галаксије последица судара или блиских пролаза, и ова хипотеза је послужила за идеју да се утицај интеракција између галаксија на еволуцију корелације испита преко морфологије галаксија.

### 4 Кратак опис садржаја дисертације

Уз увод, литературу и закључак, рад је подељен на теоријски и истраживачки део. Структура текста је следећа:

Резиме

Abstract

Садржај

1. Увод (1 - 26)
2. ДИР корелација код субмилиметарских галаксија (27 - 41)
3. Анализа могућих проблема (42 - 67)
4. Утицај интеракција галаксија на параметар ДИР корелације (68 - 96)
5. Резултати и дискусија (97 - 105)
6. Резиме и закључак (106 - 111)
  - Додатак (112 - 117)
  - Литература (118 - 143)
  - Биографија

У сажецима на српском и енглеском језику дат је кратак опис проблема који

се решава, методе које су коришћене и основни резултати приказани у докторској дисертацији.

У првом поглављу (*Увод*) дат је општи приказ проучавања галаксија на високим црвеним помацима а посебна пажња посвећена је субмилиметарским галаксијама где су дате њихове опште карактеристике. У овом поглављу дефинисана је и Далека инфрацрвена-радио корелација, физички узрок и значај саме корелације као и примери посматрања корелације у локалном универзуму.

У другом поглављу (*ДИР корелација код субмилиметарских галаксија*) дат је приказ свих скорашњих релевантних резултата за истраживање, који су показали да постоји еволуција ДИР корелације са црвеним помаком, пре свега код субмилиметарских галаксија. Описана су истраживања ДИР корелације код галаксија у интеракцији, код сфероидних галаксија и галаксија у чијој морфологији доминира диск. У овом поглављу описан је и утицај звездане масе галаксија на ДИР корелацију.

У трећем поглављу (*Анализа могућих проблема*) представљени су сви критеријуми који се користе за детектовање АГЈ као и њихове ограничености које могу довести до контаминације узорка активним галаксијама. Дати су и описи начина на које су овакви проблеми решени у истраживању у овој докторској дисертацији. Други део овог поглавља садржи опис свих параметра који се користе за одређивање морфологије галаксија.

У четвртном поглављу (*Утицај интеракција галаксија на параметар ДИР корелације*) детаљно су представљени посматрачки подаци коришћени у дисертацији, као и целокупна анализа утицаја интеракција галаксија на њихово нетермално радио-зрачење која је урађена у овој докторској дисертацији.

У петом поглављу (*Резултати и дискусија*) детаљно су описани сви најважнији резултати добијени у овој докторској дисертацији, дискусија са већ постојећим резултатима као и предлози за будући рад.

У шестом поглављу (*Закључак*) даје се кратак преглед истраживања и најважнијих резултата као и сви закључци до којих се дошло приликом истраживања.

*Литература* саржи списак 192 референце које кандидат цитира у раду.

На крају је дата кратка биографија кандидата.

## 5 Остварени резултати и научни допринос

Главни циљ ове докторске дисертације јесте да се испита да ли интеракције између галаксија и појачано нетермално зрачење које се јавља у овим системима покреће еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. Како би се оваква хипотеза испитала, постављени су параметарски модели еволуције ДИР корелације са црвеним помаком, са претпоставком да интеракције воде ову еволуцију јер се њихов прој повећава како се крећемо ка већим црвеним помацима. Као индикацију судара или блиских пролаза узимала се неправилна морфологија галаксија. Показало се да већина параметарских модела заснованих на интерагујућим системима показује

еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком, што је у сагласности са скорашњим истраживањима.

Модели су испитани прво на малом, већ обрађеном узорку галаксија који је по морфологији подељен на два подузорка на дисколике и неправилне галаксије. На оба подузорка испитана је еволуција ДИР корелације са црвеним помаком, и у ниједном случају није пронађена статистички значајна еволуција, али се такође показало да је еволуција корелације са црвеним помаком нешто јача код неправилних галаксија. Када се ДИР корелација испитала на целом узорку који сачињавају и дисколике и неправилне галаксије, пронађена је еволуција ДИР корелације са црвеним помаком, што је указивало на то да је бар једна од морфологија заслужна за овакво понашање. Прва анализа показала је да постоји индикација да су неправилне галаксије (галаксије у судару и блиском пролазу) заслужне за раније виђену еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком.

Претходна анализа урађена је на већем узорку преузетом из *COSMOS* поља галаксија. Помоћу три морфолошка каталога одређена је морфологија галаксија и узорак је поново подељен на дисколике и неправилне галаксије посебно. За разлику од претходне анализе на овим подузorcима није пронађена никаква еволуција ДИР корелације са црвеним помаком. Анализа целог узорка галаксија такође није показала тражену еволуцију. Овакав резултат није у сагласности са скорашњим испитивањима ДИР корелације код галаксија на великим црвеним помацима, што указује на то да еволуција ДИР корелације можда не постоји и представља последицу селекционих ефеката или погрешно интерпретирање физике галаксија на великим црвеним помацима. Међутим, у овој анализи показало се да је средња вредност параметра ДИР корелације мања код неправилних галаксија него код дисколикних, што указује на појачано радио зрачење у овим системима, и може бити заслужно за еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком ако се број оваквих галаксија повећа у узорку галаксија који се испитује. Сви наведени резултати показали су да вишак радио зрачења које се јавља код система у судару и блиском пролазу значајно утиче на параметар ДИР корелације.

Ово истраживање довело је до многих отворених питања која треба да се испитају у будућности ради бољег разумевања физике галаксија на великим црвеним помацима али и њихову еволуцију. Пре свега, параметри који се користе за одређивање морфологије галаксија постају веома непоуздани након црвеног помака 1, што значи да можда добијени подузорци нису потпуно морфолошки чисти, што би прекрило еволуцију корелације са црвеним помаком. Ово значи да би требао да се пронађе један или комбинација више морфолошких параметара који ће сигурно показивати сударе и блиске пролазе галаксија на великим црвеним помацима. Са друге стране, тренутна анализа показала је да је параметар ДИР корелације веома осетљив на радио спектрални индекс, који је у већини претходних анализа, али и у овој узиман као константа, што може довести до погрешне интерпретације самих резултата. Будући рад засниваће се на испитивању утицаја радио спектралног индекса на еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком.

## 6 Објављени и саопштени резултати из области истраживања презентованог у дисертацији

1. **Pavlović, M.**, & Prodanović, T., 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489, 4557–4564, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2473> (**M21, IF 2019 = 5.357**)
2. **Pavlović, M.**, & Prodanović, T., 2019, *Matica Srpska J. Nat. Sci. Novi Sad*, 137: 9-16, <https://doi.org/10.2298/ZMSPN1937009P> (M51)
3. Radulović, N., Prodanović, T., & **Pavlović, M.**, 2019, *Matica Srpska J. Nat. Sci. Novi Sad*, 137: 21-31, <https://doi.org/10.2298/ZMSPN1937023R> (M51)
4. **Pavlović, M.**, 2021, *Serbian Astronomical Journal*, 203, 15–27, <https://doi.org/10.2298/SAJ2103015P> (**M23, IF 2021 = 1.1**)

Саопштења која су у вези са темом дисертације: Rezultati istrazhivanja predstavljени su na seminarima i konferencijama u Srbiji i regionu.

## 7 Закључак и предлог

Докторска дисертација под називом „Утицај интеракција удаљених галаксија на њихово нетермално радио-зрачење“ Марине Павловић представља целовито научно дело. Проблематика која се разматра изложена је структурно, са јасним дефинисањем проблема, методама које су коришћене, описом посматрачких података, презентацијом и дискусијом добијених резултата, што је поткрепљено обимним списком коришћене литературе. Поглавља дисертације представљају независне јединице који су повезане у целину како би се добила комплетнија слика о проблему проучавања галаксија на великим црвеним помацима, одређивања њихове морфологије, са нагласком на проучавање еволуције ДИР корелације са црвеним помаком и утицајем интеракција галаксија на ДИР корелацију. Такође, кандидаткиња је показала познавање и разумевање физике интерагујућих система на високим црвеним помацима.

Резултати дисертације представљају важан научни допринос у области истраживања физике интерагујућих галаксија. Посебно значајан резултат представља појава индикације да интеракције између галаксија могу бити заслужне за раније виђену еволуцију ДИР корелације са црвеним помаком. Ово може у многоме утицати на истраживање удаљених галаксија и разумевање процеса формирања звезда у овим системима сто представља кључну тачку приликом проучавања младог универзума и процеса формирања и еволуције галаксија.

Из научне области којом се бави у својој дисертацији, кандидаткиња је објавила, самостално и као коаутор, четири научна рада у међународним часописима, од којих је један објављен у водећим међународном часопису категорије М21.

Имајући у виду горе речено, предлажемо Наставно-научном већу Математичког факултета да прихвати овај извештај и позитивну оцену докторске дисертације „Утицај интеракција удаљених галаксија на њихово нетермално радио-зрачење“ Марина Павловић и одреди комисију за њену одбрану.

Београд, 19. 09. 2022.

Комисија за преглед и оцену:

---

проф. др Дејан Урошевић  
редовни професор,  
Универзитет у Београду - Математички факултет

---

проф. др Драгана Илић  
ванредни професор,  
Универзитет у Београду - Математички факултет

---

др Мајда Смоле  
научни сарадник,  
Астрономска опсерваторија, Београд