

Наставно-научном већу  
Математичког факултета  
Универзитета у Београду

## Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Саре Савић

Одлуком Наставно-научног већа Математичког факултета Универзитета у Београду, донетој на седници одржаној 28.2.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

### Утицај морфологије и судара галаксија на активност супермасивних црних рупа у космолошким симулацијама

кандидаткиње Саре Савић, Усмена одбрана предложене теме је одржана 10.3.2026. године пред Комисијом. Након излагања кандидаткиње у коме су представљени досадашњи резултати као и правци истраживања на којима се ради, уследила је дискусија у којој су предложени још неки правци истраживања. Констатовано је да је предложена тема научно заснована и актуелна.

### 1. Биографија кандидата

#### Лични подаци:

- Име и презиме: Сара Савић
- Место и датум рођења: Београд, 25. новембар 1995.
- Електронска адреса: sara@aob.rs

#### Образовање:

- Докторске студије (2022 - данас), Математички факултет, Универзитет у Београду, Катедра за астрономију, просечна оцена: 9.63
- Мастер студије (2019 - 2022), Математички факултет, Универзитет у Београду, Катедра за астрономију, просечна оцена: 8.75

- Основне студије (2014 - 2019), Математички факултет, Универзитет у Београду, Катедра за астрономију, просечна оцена: 8.54

**Радно искуство:**

-Истраживач приправник – Астрономска опсерваторија Београд (2023-данас)

-Сарадник у настави – Математички факултет, Универзитет у Београду, Катедра за астрономију (2019-2021)

**2. Издвојени научни радови и конференцијска излагања:**

Savić, S., Smole, M., Mičić, M., Mitrašinić, A., Milošević, S. 2024, Dynamics of Dual Massive Black Hole Systems Formation in Cosmological Simulations, *PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF BELGRADE*

Savić, S., Smole, M., Mičić, M., Mitrašinić, A., Milošević, S. 2023, Dynamics of Dual Massive Black Hole Systems Formation in Cosmological Simulations, *XX Serbian Astronomical Conference*

**3. Назив теме докторске дисертације**

Утицај морфологије и судара галаксија на активност супермасивних црних рупа у космолошким симулацијама

**4. Предмет и садржај докторске дисертације**

Предмет ове дисертације је утицај еволуције галаксија на раст и активност супермасивних црних рупа (СМЦР). Докторска дисертација обухватаће статистичку анализу резултата космолошких симулација из сета космолошких магнетохидродинамичких симулација IllustrisTNG са циљем да се испита физичка веза између еволуције галаксија и активности СМЦР, узимајући у обзир улогу морфологије галаксија поред улоге судара и доступности гаса.

Коеволуција галаксија и СМЦР односи се на заједнички, међусобно спрегнут еволутивни пут галаксија и СМЦР (Heckman & Best 2014, Kormendy & Ho 2013). Први указатељи ове везе су добро утврђене релације између масе СМЦР и различитих карактеристика матичне галаксије, као што су маса централног овала и дисперзија брзина (Ferrarese & Merrit,

2000). Раст СМЦР везан је за еволуцију галаксије на два начина. Хијерархијски раст галаксија кроз сударе доводи и до судара СМЦР. Симулације показују да се спајање СМЦР одвија кроз неколико фаза чији је крајњи резултат спајање две СМЦР у нову масивнију. СМЦР, такође расте акрецијом материје из своје околине. Количина материје која је доступна за акрецију, зависи од процеса унутар галаксије који могу допремати гас до СМЦР у центру.

Приликом акреције материје око СМЦР формира се акрециони диск који може емитовати огромне количине енергије у свим деловима електромагнетног спектра. СМЦР у овој фази активности називамо активно галактичко језгро (АГЈ). Механизам ослобађања енергије из акреционог диска АГЈ може бити радијативно ефикасан (енг. „quasar mode“) или нерадијативно ефикасан (енг. „radio mode“), где је ефикасност одређена Едингтоновим односом<sup>1</sup>. Када је он већи од 0.02 у питању је радијативно ефикасни механизам. Активност СМЦР у фази АГЈ узрокује процесе и на великим скалама (енг. „AGN feedback“) којима утиче на карактеристике галаксије (Beckmann et al. 2017). Енергија ослобођена радијативно ефикасним механизмом може загрејати хладан међузвездани гас или га избацити из галаксије, што смањује стопу формирања звезда (Di Matteo et al. 2005, Fabian 2012). Галаксије на овај начин могу прећи из звездородних у пасивне галаксије. Утицај АГЈ може изменити и међугалактичку средину тиме што обогаћује и загрева хало и околни гас (Hopkins et al. 2006). Када се енергија из акреционог диска АГЈ ослобађа нерадијативно ефикасним механизмом, на половима АГЈ се формирају релативистички млазеви. Њима се енергија преноси у хало спречавајући гас да се хлади. Тиме онемогућују доток гаса у центар галаксије и дугорочно утичу на стопу формирања звезда и доступност гаса за акрецију на СМЦР (Weinberger et al. 2018, Croton et al. 2006, McNamara & Nulsen 2007).

Еволутиван пут галаксија подразумева сударе. Према односу маса галаксија судари се могу поделити на велике ( $>0.33$ , енгл. „major“) и мале (енгл. „minor“), а према заступљености гаса на сударе богате гасом (енгл. „wet“) и сударе сиромашне гасом (енгл. „dry“). Када су у питању велики судари, истраживања показују да долази до прерасподеле материје у галаксији. Уколико су богати гасом он може бити допремљен у центар у овом процесу. Ово омогућава СМЦР да акретује материју и пређе у фазу АГЈ. Међутим истраживања показују опречне резултате. И посматрања и симулације у неким случајевима показују јасну везу између АГЈ и судара галаксија (Pierce et al. 2023, Ellison et al. 2019, Alonso et al. 2007), али и да таква веза не постоји (Shah et al. 2020, Kocevski et al. 2012, Cisternas et al. 2011). Показано је и да велики судари галаксија представљају окидаче фазе АГЈ само у случају

---

<sup>1</sup> Едингтонов однос се дефинише као однос болометријске луминозности АГЈ и његове Едингтонове луминозности,  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ .

најлуминознијих АГЈ (Treister et al. 2012). Најлуминозније АГЈ се у литератури најчешће дефинишу на основу њихове болометријске луминозности. Избор прага луминозности може зависити од величине и природе статистичког узорка, при чему се уобичајено користе вредности у опсегу  $L_{\text{bol}} > 10^{45}$  erg/s до  $L_{\text{bol}} > 10^{47}$  erg/s (Veronesi et al. 2023; Bischetti et al. 2017). Средњи пут су резултати који указују да велики судари могу али не морају утицати на активност СМЦР (Byrne-Mamahit et al. 2022).

Судари галаксија доводе до формирања двојног система СМЦР пре њиховог коначног спајања у једну централну СМЦР. Еволуција оваквих система може се описати кроз три карактеристичне фазе (Begelman et al. 1980). У почетној фази, СМЦР се налазе на међусобним растојањима од неколико килопарсека до неколико десетина килопарсека и тада се означавају као двојне СМЦР, односно као двојна АГЈ у случају да су обе компоненте активне (енг. „dual AGN“). Раздвојна моћ савремених телескопа омогућава детекцију и проучавање ових система посматрањима (Satyapal et al. 2017, Comerford et al. 2015). Током ове фазе, СМЦР интерагују са звезданом и гасном компонентом галаксије, при чему губе енергију и момент импулса услед динамичког трења. Како се њихово међусобно растојање смањује, систем прелази у следећу фазу у којој је релативна брзина кретања СМЦР већа од дисперзионе брзине звездане компоненте. У овој фази губитак енергије и момента импулса доминантно се одвија путем гравитационих интеракција са околним звездама, које бивају избачене из централног региона галаксије (енг. „gravitational slingshot“). Уколико је гасна компонента и даље присутна (Rafikov 2016, Escala et al. 2005), а систем се не налази у приближно сферном потенцијалу (Gualandris et al. 2017, Khan et al. 2011), даља еволуција може довести до формирања чврсто везаног бинарног система СМЦР (енг. „hard binary“). Растојање између СМЦР је реда величине  $\sim 1$  pc и ови системи се у литератури често називају бинарне СМЦР (Milosavljević & Merrit, 2003). Системи СМЦР на растојањима мањим од 1 pc се у литератури називају блиско двојни (енг. „close-binary“) (Colpi, 2014). У завршној фази, која почиње на овим скалама растојања, доминантан механизам губитка енергије и момента импулса постаје емисија гравитационих таласа, што коначно доводи до спајања СМЦР.

ПРЕЛИМИНАРНИ РЕЗУЛТАТИ У ОКВИРУ АНАЛИЗЕ TNG СИМУЛАЦИЈЕ УКАЗУЈУ НА ТО ДА СУ ДВОЈНА АГЈ УГЛАВНОМ ПОВЕЗАНА СА ВЕЛИКИМ СУДАРИМА ГАЛАКСИЈА, АЛИ И ДА СЕ МОГУ ФОРМИРАТИ НАКОН МАЛИХ СУДАРА (Savić et al. 2024). Овакви резултати потврђују да иако судари имају важну улогу у покретању активности СМЦР, нису једини механизам који доводи до тога. Стога је извесно да постоје и други процеси који могу довести до настанка АГЈ. Ово се односи на секуларне процесе у галаксији. Галактичка пречка гравитационо интерагујући са гасом смањује момент импулса гаса и доводи до његовог прилива у централни део галаксије (Athanasoulas, 2013). Ово је показано и у симулацијама (Maciejewski et al. 2002).

Посматрања, такође, указују на повезаност АГЈ и галактичке пречке. АГЈ су заступљенија у галаксијама са пречком у поређењу са галаксијама без пречке (Marels et al. 2025, Silva-Lima et al. 2022). Међутим, и овде постоје истраживања која нису нашла доказе да таква веза постоји (Goulding 2017, Cisternas, 2013).

Имајући све наведено у виду, судари и морфологија галаксија имају улогу у покретању активности СМЦР, али њихов допринос није у потпуности разјашњен у досадашњим студијама. Стога, космолошке симулације које омогућују статистички преглед али и историју појединачних галаксија у космолошком контексту, представљају значајан аспект у разумевању процеса коеволуције. У овој дисертацији биће по први пут систематски испитан утицај заступљености гаса и улога морфологије галаксија на двојне системе СМЦР након судара, у оквиру TNG симулације. Конкретно, биће испитана заступљеност гаса у централним регионима галаксија након судара, са циљем да се квантификује веза између судара и ефикасности дотока гаса ка централним деловима галаксије. Посебна пажња биће посвећена испитивању морфолошких особина галаксија са двојним АГЈ која нису настала као последица великих судара, као и морфологије целокупног узорка галаксија које садрже двојне системе СМЦР. Коначно, како би се ови резултати сагледали у ширем контексту коеволуције галаксија и СМЦР, анализа ће бити проширена на популацију појединачних СМЦР у симулацији, где ће се испитати утицај морфолошких својстава галаксија на активност СМЦР независно од постојања двојних система.

## **5. Научни циљ докторске дисертације**

Научни циљ докторске дисертације је да се испита физичка веза између еволуције галаксија и активности СМЦР узимајући у обзир улогу морфологије галаксија поред улоге судара и доступности гаса. Досадашња истраживања су показала да судари галаксија и морфологија галаксија могу бити окидачи фазе АГЈ, али механизми којима се то дешава нису у потпуности разјашњени. У овој дисертацији биће систематски испитана њихова улога у оквиру космолошких симулација, који омогућава истовремено праћење судара, морфологије, заступљености гаса и активности СМЦР. Циљ рада је да се утврди у којој мери судари галаксија и унутрашња структура галаксије утичу на доток гаса у централни регион, како би се проценио утицај на покретање активности појединачних СМЦР, као и двојних система СМЦР. Такође, циљ је да се истражи да ли најлуминознија АГЈ могу настати као последица морфолошких процеса у галаксији. Коришћењем космолошких хидродинамичких симулација, циљ дисертације је да се квантитативно повежу морфолошке особине галаксија, садржај гаса у њиховим централним деловима и

активност СМЦР, чиме се доприноси разумевању њихове заједничке еволуције у космолошком контексту.

## **6. Основне хипотезе од којих се полази**

Основна хипотеза ове докторске дисертације је да морфолошке особине галаксија могу имати значајан утицај на доток гаса ка централним регионима и самим тим на активност СМЦР. Једна од полазних претпоставки је да велики судари галаксија нису једини окидач који може довести до АГЈ, те да морфологија галаксија и секуларни процеси могу ефикасно допринети смањивању момента импулса гасне компоненте и њеном транспорту ка центру галаксије. Претходна истраживања су показала да велики судари галаксија имају улогу у покретању активности СМЦР, али и да се АГЈ могу наћи у галаксијама које нису прошле кроз судар. Такође, досадашње студије су показале да су АГЈ у корелацији са галаксијама које поседују пречку. Стога се претпоставља да галактичка пречка може довести до прилива гаса у центар галаксије и активности СМЦР чак и у одсуству великих судара.

## **7. Методе које се користе у истраживању**

У овом истраживању користиће се резултати IllustrisTNG (TNG) космолошке магнетохидродинамичке симулације (Springel et al. 2018; Pillepich et al. 2018a; Naiman et al. 2018; Nelson et al. 2018a; Marinacci et al. 2018). За истраживање статистички великог узорка биће коришћена симулација TNG300, а за детаљније испитивање улоге морфологије биће коришћена симулација TNG50. Главни резултати представљени снимцима (енг. „snapshots“) биће повезани са додатним каталозима.

Космолошке симулације представљају значајан метод за истраживање Универзума. Космолошки модел може да предвиди заступљеност халоа у функцији масе и црвеног помака, расподелу параметра спина и учесталост великих и малих судара. Међутим, за еволуцију галаксија доминантну улогу имају барионски процеси. Због своје комплексности, барионски процеси често нису у потпуности и квантитативно разјашњени. То важи за процесе повратног деловања АГЈ. Значај хидродинамичких космолошких симулација као што је TNG се огледа у могућности да укључе барионске процесе који се одвијају на малим скалама растојања у космолошки контекст.

TNG је пројекат који садржи сет космолошких симулација формирања галаксија различитих по величини симулационе кутије и масеној резолуцији. Симулације су назване по приближној величини странице симулационе кутије у Мpc: TNG50, TNG100 и TNG300. Највећа симулација, TNG300, има могућност узимања великог статистичког узорка и погодна је за статистичка истраживања. Међутим, има најнижу масену резолуцију. Масена резолуција износи  $5.9 \cdot 10^7 M_{\odot}$  и  $1.1 \cdot 10^7 M_{\odot}$  за тамну и барионску материју редом, што одговара просторној резолуцији од  $\sim 1.5$  kpc. Насупрот њој, симулација TNG50 има најмању запремину, мањи узорак галаксија али најбољу резолуцију те омогућава испитивање морфологије и унутрашњих процеса у галаксијама. Овде масена резолуција износи  $4.5 \cdot 10^5 M_{\odot}$  и  $8.5 \cdot 10^4 M_{\odot}$  за тамну и барионску материју редом, што одговара просторној резолуцији од  $\sim 0.3$  kpc. Симулација TNG100 представља компромис између ове две кутије. Симулације из овог сета се заснивају на стандардном космолошком моделу са вредностима параметара  $\Omega_{\Lambda,0} = 0.6911$ ,  $\Omega_{m,0} = 0.3089$ ,  $\Omega_{b,0} = 0.0486$ ,  $\sigma_8 = 0.8159$ ,  $n_s = 0.9667$  и  $h = 0.6774$  преузетим из Планк колаборације (Planck Collaboration, 2016), где су  $\Omega_{\Lambda,0}$ ,  $\Omega_{m,0}$  и  $\Omega_{b,0}$  бездимензиони параметри космолошке константе, густине материје и густине барионске материје,  $\sigma_8$  параметар нормализације,  $n_s$  спектрални индекс, а  $h$  вредност Хабловог параметра у јединицама  $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Укључени су и физички процеси примордијалног хлађења и хлађења линијама метала, стохастичко формирање звезда у густим деловима међузвездане материје, притисак међузвездане материје услед супернових, еволуције звездане популације и обогаћивања металима, повратног деловања звезда, зачетак и раст СМЦР, процеси повратног деловања СМЦР у два различита енергетска мода и магнетна поља. Резултати симулација су спаковани у снимке, групне каталоге, дрва судара и додатне каталоге података.

Симулација TNG300 ће се користити за статистичку анализу везе између судара галаксија и активности двојних система СМЦР. Поред основних резултата, ова симулација има додатни каталог са детаљима о СМЦР и сударима СМЦР (Blackhole mergers and details; Kelley et al. 2017; Blecha et al. 2016) који омогућују праћење СМЦР и дају прецизније вредности параметара који их описују. У симулацији до спајања СМЦР у једну долази када две СМЦР ступе на растојање мање од просторне резолуције, што износи  $\sim 1.5$  kpc. У реалности, последње фазе двојног система СМЦР одвијају се на много мањим просторним скалама. Стога, овде претпостављамо да тренутак који у TNG300 представља спајање СМЦР, може значити формирање двојног система СМЦР на растојању мањем од 1 kpc. Прелиминарни резултати показују да у овако постављеном сценарију, велики судари јесу углавном окидачи активности СМЦР, али то није нужно случај. Двојна АГЈ могу настати и након малих судара. Зато ће бити испитана улога гаса у централном делу галаксије на активност двојних СМЦР. Такође, галаксије из овог узорка биће повезане са каталогом

циркуларности („*Stellar Circularities, Angular Momenta, Axis Ratios*“). Овај каталог садржи податке о масеним уделима звезда које вероватно припадају диску и звезда које вероватно припадају централном овалу одређених на основу специфичног момента импулса звездане честице (Genel, 2015). Показано је да овај каталог може бити добар представник морфолошке структуре галаксија (Baucalo и Mitrašinović, 2025). Помоћу њега ће бити одрађена статистичка анализа утицаја морфологије галаксија на активност двојних система.

Симулација TNG50 има запремину симулационе кутије  $(51.7\text{cMpc})^3$ . Симулација не обухвата велики број галаксија, али зато много боље може описати детаље галаксије. Једино ова симулациона кутија има додатан каталог морфологије галаксија и карактеристике галактичке пречке („*Galaxy Morphologies (Kinematic) and Bar Properties*“). Овај каталог раздваја звезде у различите морфолошке компоненте: танки диск, дебели диск, псеудо-овал, класични централни овал и сферни звездани хало, а уколико је присутна пречка одређује и њене карактеристике (Zana, 2022). Такође, за ову симулацију је доступан и каталог судара („*Merger History*“) који садржи информације о статистици и историји судара галаксија (Rodríguez-Gomez 2017; Eisert et al. 2023). Резултати TNG50 симулације ће бити коришћени за испитивање активности СМЦР неvezано за то да ли се ради о двојном систему или једној СМЦР.

## 8. Преглед предложене литературе

1. Alonso, M. S. et al. 2007, Active galactic nuclei and galaxy interactions, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 375, 3
2. Athanassoula, E. 2013, Bars and secular evolution in disk galaxies: theoretical input, *Secular Evolution of Galaxies*
3. Baucalo, K. & Mitrašinović, A. 2025, Galaxy morphology classification: are stellar circularities enough?, *Serbian Astronomical Journal*, 210
4. Begelman, M. C. et al. 1980, Massive black hole binaries in active galactic nuclei, *Nature*, 287
5. Beckmann, R. S. et al. 2017, Cosmic evolution of stellar quenching by AGN feedback: clues from the Horizon-AGN simulation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472, 1
6. Bischetti, M. et al. 2017, The WISSH quasars project. I. Powerful ionised outflows in hyper-luminous quasars, *Astronomy & Astrophysics*, 598

7. Blecha, L., Sijacki, D., Hernquist, L. et al. 2016, Recoiling black holes: prospects for detection and implications of spin alignment, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 456, 1
8. Cisternas, M. et al. 2011, The bulk of the black hole growth since  $z \sim 1$  occurs in a secular universe: no major merger–AGN connection, *The Astrophysical Journal*, 726, 2
9. Cisternas, M. et al. 2013, X-ray nuclear activity in S<sup>4</sup>G barred galaxies: no link between bar strength and co-occurent supermassive black hole fueling, *The Astrophysical Journal*, 776, 1
10. Colpi, M. 2014, Massive black hole binaries: from pairing to coalescence, *Space Science Reviews*, 183, 1-4
11. Comerford, J. M. et al. 2015, Merger-driven fueling of active galactic nuclei: six dual and offset AGNs discovered with Chandra and Hubble Space Telescope observations, *The Astrophysical Journal*, 806, 2
12. Croton, D. J. et al. 2006, The many lives of active galactic nuclei: cooling flows, black holes and the luminosities of galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 365, 1
13. Di Matteo, T. et al. 2005, Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies, *Nature*, 433
14. Eisert, L. et al. 2023, ERGO-ML I: inferring the assembly histories of IllustrisTNG galaxies from integral observable properties via invertible neural networks, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519, 2
15. Ellison, S. L. 2019, A definitive merger-AGN connection at  $z \sim 0$  with CFIS: mergers have an excess of AGN and AGN hosts are more frequently disturbed, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487, 2
16. Escala, A. et al. 2005, The role of gas in the merging of massive black holes in galactic nuclei. II. Black hole merging in a nuclear gas disk, *The Astrophysical Journal*, 630, 1
17. Fabian, A. C. 2012, Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50
18. Ferrarese, L. & Merritt, D. 2000, A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 539, 1
19. Genel, S. et al. 2015, Introducing the Illustris Project: the stellar mass–angular momentum relation of galaxies, *The Astrophysical Journal*, 804, 2
20. Goulding, A. D. et al. 2017, Galaxy-scale bars in late-type Sloan Digital Sky Survey galaxies do not influence the average accretion rates of supermassive black holes, *The Astrophysical Journal*, 843, 2
21. Gualandris, A. et al. 2017, Collisionless loss-cone refilling: there is no final parsec problem, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 2

22. Heckman, T. M. & Best, P. N. 2014, The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52
23. Hopkins, P. F. et al. 2006, A Unified, Merger-driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 163, 1
24. Kelley, L. Z. et al. 2017, Massive black hole binary mergers in dynamical galactic environments, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 3
25. Khan, F. M. et al. 2011, Mergers of supermassive black holes in astrophysical environments, *The Astrophysical Journal*, 732, 2
26. Kocevski, D. D. et al. 2012, CANDELS: constraining the AGNmerger connection with host morphologies at  $z \sim 2$ , *The Astrophysical Journal*, 744, 2
27. Kormendy, J. & Ho, L. C. 2013, Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51, 1
28. Marels, V. et al. 2025, The role of bars in triggering active galactic nucleus galaxies, *Astronomy & Astrophysics*, 699, A204
29. Marinacci, F. et al. 2018, First results from the IllustrisTNG simulations: magnetic fields, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 1
30. McNamara, B. R. & Nulsen, P. E. J. 2007, Heating Hot Atmospheres with Active Galactic Nuclei, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 45, 1
31. Maciejewski, W. et al. 2002, Gas inflow in barred galaxies — effects of secondary bars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 329, 3
32. Milosavljević, M. & Merritt, D. 2003, The long-term evolution of massive black hole binaries, *The Astrophysical Journal*, 596, 2
33. Naiman, J. P. et al. 2018, First results from the IllustrisTNG simulations: black hole growth and feedback, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477, 1
34. Nelson, D. et al. 2018, The IllustrisTNG simulations: Public data release, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 1
35. Nelson, D. et al. 2019a, First results from the TNG50 simulation: the evolution of the galaxy stellar mass function, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490, 3
36. Pierce, J. C. S. et al. 2023, Galaxy interactions are the dominant trigger for local type 2 quasars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 522, 2
37. Pillepich, A. et al. 2018, Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473, 3
38. Pillepich, A. et al. 2019, First results from the TNG50 simulation: the evolution of the stellar mass–size relation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490, 3

39. Planck Collaboration et al. 2016, Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters, *Astronomy & Astrophysics*, 594, A13
40. Rafikov, R. R. 2016, Accretion and orbital inspiral in gas-assisted supermassive black hole binary mergers, *The Astrophysical Journal*, 827, 2
41. Rodriguez-Gomez, V. et al. 2017, The role of mergers and halo spin in shaping galaxy morphology, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467, 3
42. Satyapal, S. et al. 2017, Buried AGNs in advanced mergers: mid-infrared color selection as a dual AGN candidate finder, *The Astrophysical Journal*, 848, 2
43. Savić, S. et al. 2024, Dynamics of Dual Massive Black Hole Systems Formation in Cosmological Simulations, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF BELGRADE
44. Shah, E. A. et al. 2020, Investigating the effect of galaxy interactions on the enhancement of active galactic nuclei at  $0.5 < z < 3.0$ , *The Astrophysical Journal*, 904, 2
45. Silva-Lima, L. A. et al. 2022, Revisiting the role of bars in AGN fuelling with propensity score sample matching, *Astronomy & Astrophysics*, 661, A105
46. Springel, V. et al. 2018, First results from the IllustrisTNG simulations: matter and galaxy clustering, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 1
47. Treister, E. et al. 2012, Major galaxy mergers only trigger the most luminous active galactic nuclei, *The Astrophysical Journal Letters*, 758, 2
48. Veronesi, N. et al. 2023, The most luminous AGN do not produce the majority of the detected stellar-mass black hole binary mergers in the local Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 526, 4
49. Weinberger, R. et al. 2018, Supermassive black holes and their feedback effects in the IllustrisTNG simulation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479, 3
50. Zana, T. et al. 2022, Morphological decomposition of TNG50 galaxies: methodology and catalogue, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515, 1

## 8. Закључак и предлог комисије

Предложена тема је врло актуелна у области вангалактичке астрономије и наставља тренд најновијих истраживања. Од посебног значаја је што су питања на која докторска дисертација покушава да понуди одговор и даље актуелна, будући да посматрачки радови на исту тему дају опречне резултате. Стога је главни очекивани резултат добијање одговора на неколико актуелних питања са теоријског аспекта и поређење са посматрачким резултатима, као и добијање разјашњења у вези опречних посматрачких резултата који могу бити услед недостатака или ограничења тренутних и досадашњих

метода. Важан очекивани резултат је и конструисање додатног каталога карактеристика супермасивних црних рупа у космолошких симулацији TNG50, који ће омогућити класификацију галаксија на нормалне и активне и директно поређење са посматрањима.

Кандидаткиња је успешно положила све испите предвиђене планом докторских студија. Објавила је један коауторски рад, а након дискусије са комисијом, утврђено је да се током текуће и наредне године планира објављивање једног коауторског и једног самосталног рада, директно везаним за пријављену тему докторске дисертације, у међународним часописима са SCI листе. Након тога је планирано објављивање још једног рада, са поменутиим каталогом карактеристика СМЦР.

Имајући све ово у виду, Комисија предлаже Наставно-научном већу Математичког факултета Универзитета у Београду да Сари Савић одобри израду докторске дисертације, под насловом "Утицај морфологије и судара галаксија на активност супермасивних црних рупа у космолошким симулација" и да за ко-менторе одреди др Мајду Плиансри, вишег научног сарадника Астрономске опсерваторије и проф. др Драгану Илић, редовног професора Математичког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 12. март 2026



проф. др Анђелка Ковачевић  
редовни професор Математичког факултета



др Ана Митрашиновић  
научни сарадник Астрономске опсерваторије



др Мирослав Мићић  
научни саветник Астрономске опсерваторије



др Марко Сталевски,  
научни саветник Астрономске опсерваторије