

Наставно-научном већу  
Математичког факултета  
Универзитета у Београду

## Извештај Комисије за преглед и оцену докторске дисертације

### “Нумеричке симулације судара галаксија и настанка морфолошких подструктура”

кандидата Станислава Милошевића

#### Биографија кандидата

Станислав Милошевић је рођен 11.12.1989. године у Сремској Митровици. Основну школу је завршио у Чалми, а гимназију у Сремској Митровици. Школске 2008/2009. уписао је Математички факултет, смер астрофизика и дипломирао је 2013. просечном оценом 9,24. Исте године је уписао мастер студије на Математичком факултету које је завршио 2015. просечном оценом 9,50 и одбраном мастер рада “Одређивање параметара судара галаксије М31 и патуљасте галаксије”. Исте године је, на Математичком факултету, уписао докторске студије. Положио је све испите предвиђене планом и програмом докторских студија са просечном оценом 9,25.

Школску 2014/2015. предавао је физику у ОШ “Иван Горан Ковачић” у Београду, а од октобра 2015. ради као сарадник у настави, а од 2017. као асистент на Математичком факултету, на Катедри за астрономију. Ангажован је на предметима Радио-астрономија и Радио-астрофизика, Физички принципи структуре звезда, Модели и еволуција звезда, Методика наставе астрономије, Основи астрофизике за физичаре. Кинематика звезда и динамика звезданих система. Претходних година био је ангажован и на предметима: Технике астрофизичких посматрања, Општа астрофизика 1 и 2. Као члан Катедре за астрономију држао је наставу астрономије две школске године специјализованом одељењу Земунске гимназије. Од 2010. је млађи, а од 2014. стручни сарадник програма Астрономије у ИС Петница. Био је је руководиоца овог програма две године 2020 и 2021. Од 2018. до истека пројектног циклуса био је ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја 176005 *Емисионе маглине: структура и еволуција*. Од 2019. учествује у организацији међународне студентске школе у Петници, где се смењују теме астрофизика, космологија, општа релативност и физика елементарних честица.

Први аутор је рада објављеног у часопису категорије М21, самостални аутор рада објављеног у часопису категорије М23 као и неколико саопштења на скуповима од националног значаја. Ови радови су произашли из истраживања приказаног у овој дисертацији.

## Структура докторске дисертације

Дисертација садржи укупно 105 страна са списком коришћене литературе од 160 референци, 53 слике, 4 табеле и једном страницом биографије аутора. Структура текста је следећа:

-Садржај

1. Увод (1-36.)

2. Модели галаксија у судару (37-45.)

3. Симулације судара спиралне и патуљасте галаксије (46-56.)

4. Симулације формирања и металичност Великог звезданог тока (57-84.)

5. Симулације формирања и металичност NE и W звездане љуске (85-95.)

6. Резиме и закључак (96-97.)

- Литература (98-105.)

- Биографија аутора (106-106.)

Предмет којим се бави докторска дисертација су судари галаксија. Сударима галаксија настају структуре које можемо да посматрамо. У оквиру ове докторске дисертације, посебна пажња је усмерена на токове звезда и љуске. Посебан интерес су судари масивних спиралних галаксија попут Млечног пута и Андромеде (M31), са њиховим сателитима – патуљастим галаксијама. Морфолошки модели који се тестирају приликом репродуковања сценарија судара обухватају и хало тамне материје, што је додатни алат за одређивање укупне масе галаксије у оквиру важеће космолошке парадигме. Уколико су познате карактеристике структура насталих сударима, попут њиховог профила брзина, или металичности, могуће је повезати те особине са галаксијом чијим распадом су те структуре настале. Поред испитивања морфолошких особина токова звезда и љуски, у зависности од морфолошких особина галаксија у интеракцији, ова дисертација се бави и моделовањем металичности у галаксији, чијим распадом настају поменуте структуре, а која узрокује специфичну расподелу металичности у тим структурама. Познавање расподеле металичности је значајно за проучавање еволуције галаксије, као и за астробиолошки аспект. До сада је посматрана расподела металичности у спиралним и патуљастим галаксијама, при чему је теоријска веза расподеле металичности у патуљастој галаксији и структури насталој њеним распадом у судару са спиралном отворено питање, које обрађује ова тема. Објашњење ове везе је значајно за проучавање динамике и еволуције галаксија, у смислу модела који подразумева да масивније галаксије настају сударима мање масивних, али и динамике система спиралних галаксија и њихових сателита, каквих имамо у Локалној групи.

У првом, уводном поглављу, представљене су основне теоријске поставке дисертације и мотив за истраживање. Дат је преглед морфолошких типова галаксија и њихове особине. Описане су спиралне, елиптичне и патуљасте галаксије. Објашњена је теорема виријала као важна теорема која важи за гравитационо стабилне системе и која се примењује у нумеричким симулацијама еволуције и судара галаксија. Поред објашњења самог настанка и интеракција галаксија, наглашена је важност проучавања структура насталих сударима галаксија, како за објашњење самог сударног процеса, тако и за еволуцију галаксија уопште. С тим у вези фокус је стављен на Велики звездани ток у галаксији M31, као и звездане љуске, с претпоставком да су ове структуре настале у истом сударном процесу и од исте патуљасте галаксије, која је сателит M31. Дат је преглед радова који су се бавили овом темом, како посматрачки, тако и теоријски, односно кроз нумеричке симулације. Важна претпоставка рада јесте да се почетном расподелом металичности у патуљастој галаксији пре судара, може објаснити расподела металичности у Великом звезданом току и звезданим љускама, након судара, односно пошто се ове структуре формирају.

У другом поглављу дати су параметри модела N-тела за спиралну галаксију, као и за две различите морфологије патуљасте галаксије. Велика спирална галаксија и патуљаста галаксија са диском имају три компоненте: централни овал, диск и тамни хало, док сфероидна патуљаста има сферносиметричну барионску материју и тамни хало, другим речима нема диск. Поред вредности параметара за моделе галаксија у интеракцији, описани су и сударни сценарији којима се бави дисертација. Такође, дат је опис алата којим се генеришу почетни услови за стабилне моделе галаксија и извршавају симулације судара галаксија.

Поглавље три даје резултате судара велике спиралне галаксије и патуљасте галаксије која је њен сателит и која може да има две поменуте морфологије. Испитано је 5 сценарија судара за патуљасту галаксију са диском и 3 сценарија за сфероидну патуљасту. Фокус је на испитивању утицаја морфологије патуљасте галаксије, инклинације орбите и смера ротације, на формиране структуре након судара.

У четвртном поглављу дати су главни резултати симулација судара галаксије M31 и сфероидне патуљасте која је њен сателит. Том приликом се формира Велики звездани ток и у овом поглављу су дате морфологија тока, као и кинематички опис. Поред ових особина, помоћу Монте Карло симулација испитан је радијални градијент металичности у патуљастој галаксији, односно утицај расподеле металичности у патуљастој галаксији на посматрану расподелу у Великом звезданом току. Анализирани су и пикови у посматраној расподели металичности.

Пето поглавље се наставља на четврто и у њему су представљени резултати формирања Североисточне и Западне звездане љуске, као структура које се формирају у истом сударном процесу, као и Велики звездани ток. Поред морфологије љуски, истим градијентом металичности за патуљасту галаксију, објашњава се посматрана расподела металичности у звезданим љускама.

У последњем, шестом поглављу, дат је резиме и осврт на главне резултате ове дисертације.

## Преглед важнијих резултата

Један од главних резултата ове дисертације је објашњење посматране расподеле металичности у Великом звезданом току. Након првих посматрачких радова који су дали расподелу металичности дуж тока, уочено је да металичност расте од дела тока који је најближи галаксији М31, до средине тока, затим опада од средишњег дела ка делу тока који је најудаљенији од М31. Ова расподела има два градијента са два пика расподеле у централним деловима тока. По први пут је објашњена ова расподела, помоћу почетне расподеле металичности у патуљастој галаксији пре судара. Узето је да је расподела у патуљастој галаксији линеарно опадајућа од централних делова галаксије ка ободу. Након судара, у областима посматрачких поља, упоређена је симулирана и посматрана металичност.

Два пика у расподели металичности су објашњени као привремене структуре, које постоје услед специфичне кинематике тока, односно постојања најмање две кинематичке групе звезда од којих се једна креће ка, а друга од М31.

Поред Великог звезданог тока, потврђени су резултати претходних радова који сугеришу да у истом сударном процесу настају и две звездане љуске. У првом пролазу кроз перицентар своје путање, патуљаста галаксија расипа материјал и формира звездани ток, а у наредна два пролаза и звездане љуске. Истим градијентом металичности у патуљастој галаксији, којим је објашњена расподела у звезданом току, објашњена је расподела металичности и у звезданим љускама. То даје додатне ограничавајуће параметре на могуће особине патуљасте галаксије.

Пошто особине структура насталих у халоу спиралних галаксија зависе од особина патуљасте сателитске галаксије, испитане су структуре које настају сударом велике спиралне галаксије са патуљастом са диском и у другом случају са сфероидном патуљастом. У обе групе сценарија судара, формирају се звездани токови и љуске, при чему њихов интензитет у фазном простору радијалне удаљености (од центра спиралне галаксије) и брзине зависи од морфологије, смера ротације (у случају патуљасте са диском) и инклинације орбите (у односу на диск велике спиралне галаксије).

Анализа насталих структура у сударима галаксија је важна за проучавање самих галаксија и сценарија судара. Такође, отвара питање особина патуљасте галаксије, затим расподеле металичности у њима, која зависи од физичких процеса еволуције гаса и звезда у овим галаксијама, али и од окружења у којем ове галаксије динамички еволуирају. У том смислу, ова дисертација сугерише и параметре патуљасте галаксије, односно њене динамичке историје, што је у контексту важеће космолошке парадигме и хејерархијског сценарија раста структура, од велике важности.

## Научни радови објављени у међународним часописима

**S. Milošević**, M. Mičić, G. F. Lewis, 2022, Metallicity distribution of the progenitor of Giant Stellar Stream in the Andromeda Galaxy, MNRAS, 511, 2868 (M21, IF=5,357)  
doi:10.1093/mnras/stac249

**S. Milošević**, Dependence of stellar substructures in M31 type galaxy on satellite morphology in galaxy mergers, Serbian Astronomical Journal, 205, 33 (M23, IF=1,1)

## Саопштења са скупа националног значаја штампана у целини (M63)

**S. Milošević**, M. Mičić, N. Martinović, M. Smole, A. Mitrašinović, Influence of the softening length on stability of spiral galaxies in N-body simulations, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, Astronomical Observatory, Volgina 7, 11160 Beograd, Serbia, vol. 98, pp. 161 - 166, issn: 0373-3742

M. Smole, M. Mičić, N. Martinović, A. Mitrašinović, **S. Milošević**, Early growth of supermassive black holes and gravitational wave recoil, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, Astronomical Observatory, Volgina 7, 11160 Beograd, Serbia, vol. 98, pp. 187 - 194, issn: 0373-3742

Lazar Živadinović, **Stanislav Milošević**, Damjan Milić, Density profile of the Milky Way: comparison of dynamical model and Monte Carlo method for determining stellar space densities, Proceedings of the XVIII Serbian Astronomical Conference, Astronomska opservatorija u Beogradu, no. 98, pp. 257 - 262, issn: 0373-3742

A. Mitrašinović, M. Mičić, N. Martinović, M. Smole, **S. Milošević**, Bar detection in N-body simulations using Fourier analysis, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, Astronomical Observatory, Volgina 7, 11160 Beograd, Serbia, vol. 98, pp. 167 - 173, issn: 0373-3742

Martinović, N., Mičić, Miroslav, Mičić, Milica, Obuljen, A., Smole, M., **Milošević, S.**, Mitrašinović, A., Stojanović, M., Smailagić, M., 2017, Recommendation for running pure N-body simulations on computing facilities in Serbia, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, Astronomical Observatory, Volgina 7, 11160 Beograd, Serbia, 96, 257

Martinovic, N., Micic, M., Mitrasinovic, A., **Milosevic, S.**, and Smole, M., 2018, Reconstructing formation and evolution of compact dwarf candidates in clusters of galaxies, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, Astronomical Observatory, Volgina 7, 11160 Beograd, Serbia, 98, 145

## Закључак и предлог Комисије

Докторска дисертација под називом “Нумеричке симулације судара галаксија и настанка морфолошких подструктура” Станислава Милошевића представља целовито научно дело. Кандидат је показао самосталност у раду и широко познавање области вангалактичке астрономије, служећи се напредним методама и алатима за нумеричке симулације као и за анализу добијених података из симулација. Резултати дисертације представљају научни допринос истраживању судара галаксије и формирања структура у халоима галаксија, као и динамици и еволуцији галаксија уопште. Дат је значајан допринос проучавању звезданих токова, насталих у сударима и дат пример могућности анализе ових структура ради описивања галаксија од којих су настали и дијагностике особина халоа тамне материје. Из научне области којом се бави, кандидат је објавио два рада у часописима са SCI листе: један као први аутор у водећем међународном часопису категорије M21 и други самостално у часопису категорије M23.

На основу наведеног, предлажемо Наставно-научном већу Математичког факултета да прихвати овај извештај и позитивну оцену докторске дисертације “Нумеричке симулације судара галаксија и настанка морфолошких подструктура” Станислава Милошевића и одреди комисију за њену одбрану.

У Београду, 17.07.2023.

Комисија:

---

др Мирослав Мићић  
виши научни сарадник Астрономске опсерваторије

---

проф. др Драгана Илић  
ванредни професор Математичког факултета

---



др Бранислав Вукотић  
научни саветник Астрономске опсерваторије