

Наставно-научном већу
Математичког факултета
Универзитета у Београду

Извештај Комисије за преглед и оцену докторске дисертације
„Хидродинамичка и синхротронска радио-еволуција остатака сујернових у
нехомојеној међузвезданој средини”
кандидата Петра Костића

Биографија кандидата

Петар Костић је рођен 17. 07. 1985. године у Новом Саду. Основну школу и гимназију је завршио у Новом Саду. Школске 2004/05. године уписао је основне студије астрономије (са астрофизиком) на Департману за физику, Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду. Дипломирао је са просечном оценом 9,19, а 2012/13. године на истом факултету је уписао мастер студије и завршио их 2015. године са просечном оценом 9,20, стекавши звање мастер физичар (област: физичке науке – астрономија са астрофизиком). Школске 2015/16. године је уписао докторске студије на Математичком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Астрономија и астрофизика. Положио је све испите предвиђене планом и програмом докторских студија са просечном оценом 9,75.

Од 2005. је млађи, а од 2012. стручни сарадник на програму астрономије у Истраживачкој станици Петница. У марту 2015. године је изабран у звање истраживач-приправник на Природно-математичком факултету у Новом Саду, где је 4 године волонтерски радио као асистент на предмету Општа астрономија. Од марта 2018. је запослен на Астрономској опсерваторији као технички оператер на Астрономској станици Видојевица и у јуну исте године је изабран у звање истраживач-сарадник. Истовремено је био ангажован на пројектима Министарства просвете, науке и технолошког развоја “Видљива и невидљива материја у блиским галаксијама: теорија и посматрања” (176021, руководилац др Срђан Самуровић) и “Емисионе маглине: структура и еволуција” (176005, руководилац др Дејан Урошевић), током 2018. и 2019. године.

Структура докторске дисертације

Дисертација се састоји од 99 страна текста, 9 страна библиографије и једне стране биографије аутора. Текст дисертације садржи 24 слике и 1 табелу, док библиографија има 84 референце. Структура текста је следећа:

- Садржај
- 1. Увод (1-12.)
- 2. Хидродинамичке симулације (13-36.)

3. Модел емисије (37-41.)
4. Опис симулација остатака супернових (42-54.)
5. Семи-аналитички модел хидродинамичке еволуције и емисије (55-73.)
6. Резултати (74-80.)
7. Дискусија (81-93.)
8. Сиже (94-95.)
9. Закључак (96-99.)
- Библиографија (100-108.)
- Биографија аутора

Предмет и циљ дисертације

Ова докторска дисертација се бави моделовањем остатака супернових (ОСН) и њихове радио Σ - D релације, као и моделовањем нехомогене међузвездане материје, карактеристичне за молекулске облаке. Радио-зрачење остатака супернових потиче од синхротронског зрачења убрзаних релативистичких електрона у магнетном пољу у региону ударног таласа. Важни параметри који утичу на емисију овог зрачења су густина материје испред ударног таласа и брзина ударног таласа. Аналитички модели хидродинамичке еволуције ОСН (нпр. Седов-Тејлорово решење) су раније углавном извођени коришћењем константне амбијенталне густине као једног параметра, тј. проучавају једино случај код којег је околна материја хомогена. Задатак ове дисертације је да провери и упореди резултате еволуције остатка у нехомогеној и хомогеној средини и уочи ефекте задате нехомогености на хидродинамику остатка, као и на еволуцију његове синхротронске радио-емисије. Због тога је у овом раду кључна анализа интеракције ударног таласа ОСН са густим облацима околне материје.

Радио-еволуција остатака супернових се представља такозваном Σ - D релацијом, $\Sigma=D^\beta$. Најважнији параметар ове релације је њен нагиб β , а циљ ове дисертације је праћење промене овог нагиба у зависности од задатих услова околне међузвездане средине, односно расподеле густине. Међузвездана средина у Галаксији није хомогена већ садржи велике флукуације густине које могу бити описане фракталном структуром, која је последица турбулентних кретања материје. Оваква структура је посебно изражена у молекулским облацима који су виђени као представници средине која је моделована у дисертацији. Нехомогена средина је моделована као ансамбл облака веће густине у односу на међуоблачну средину (тзв. грудваста средина), како би се на адекватан начин пронашло аналитичко решење за промену брзине ударног таласа са пречником.

Ова дисертација полази од хипотезе, која је анализирана у раду Костића и сарадника (2016), да се нагиб Σ - D релације устрмљује у присуству фрагментиране густине молекулских облака. Ради детаљније анализе еволуције ОСН у присуству облака околне средине, развијен је нумерички код за хидродинамичке симулације ОСН у задатој средини који је установљен у самосталном раду аутора (Костић, 2019). Развој кода сам по себи представља велики део рада на дисертацији. Коришћењем овог кода су пуштане симулације ОСН у моделираној грудвастој средини различитих

параметара. Други важан део дисертације је семи-аналитички модел хидродинамичке еволуције ОСН у грудвастој средини који је развијен на основу резултата добијених из симулација. Допринос овог модела докторској дисертацији је прављење синтетичког узорка ОСН, који еволуирају у различитим срединама, помоћу којег се анализира расподела посматраног Галактичког узорка ОСН на Σ - D дијаграму. Узорак ОСН у Млечном путу броји преко 100 остатака, а њихова расподела у Σ - D равни је предмет многих досадашњих истраживања. У последњем делу, дисертација нуди објашњење расподеле Галактичког узорка и промене нагиба Σ - D релације, али такође отвара и многа питања која би тек требало размотрити у будућем раду. С обзиром да је у овој области до сада Галактички узорак анализиран углавном преко константног нагиба β по целом узорку, рашчлањивање овог проблема и његова параметризација кроз особине околне међузвездане материје представља велики и важан корак у области еволуције ОСН.

У првој глави је дат увод у област ОСН, уз четири поглавља која представљају рекапитулацију теоријске позадине области истраживања и уводе контекст ове дисертације. Дата је дефиниција Σ - D релације и представљен је посматрани Галактички узорак ОСН у Σ - D равни који се користи у постављању хипотезе и дискусији резултата. Дат је теоријски опис хидродинамичке еволуције ОСН, односно Седов-Тејлоров закон и Ранкин-Игониоове релације које описују скокове хидродинамичких стања на ударном таласу. Такође, представљена је актуелна теорија убрзавања честица на ударном таласу, тзв. механизам дифузног убрзавања на ударном таласу. На крају је дат осврт на нехомогене структуре окозвездане и међузвездане материје, и уведена хипотеза о њиховом утицају на нагиб и облик Σ - D релације ОСН.

Друга глава даје детаљан опис развоја нумеричког кода за хидродинамичке симулације ОСН, из којег је произашао рад Костића (2019). Ова глава има четири поглавља. У првом поглављу је представљен математички модел динамике стишљивог флуида у тродимензионом простору, која се описује Ојлеровим једначинама идеалног гаса. Друго поглавље даје опис нумеричких метода које се користе за решавање ових једначина, док је у трећем поглављу представљена MUSCL-Nupsock шема, нумерички метод који је коришћен у дисертацији. У четвртном поглављу су приказани тестови валидације кода.

У трећој глави је представљен развој модела синхротронске емисије. Модел се заснива на апроксимацији тест-честице са подразумеваном степеном расподелом убрзаних протона и електрона. Магнетно поље и његово појачање се рачунају на основу параметара ударног таласа, као што су Махов број и густина, уз поједине апроксимације које су преузете из литературе.

У четвртој глави је дат опис извршених симулација. Прво су пуштене симулације ОСН у разређеном мехуру како би била проучена хидродинамичка еволуција ударног таласа и унутрашњости остатка након преласка ударног таласа из ретке у густу средину. Потом је извршена група симулација у грудвастој средини која је моделована као ансамбл насумично распоређених грудви полупречника око 1 pc, које су од 3 до 300 пута гушће од околне средине. Такође, коришћене су поставке са различитим запреминским уделима грудви, од 10% и 25%.

У петој глави је представљен семи-аналитички 3Д сферносиметрични модел хидродинамичке еволуције ОСН у грудвастој средини, који је развијен на основу резултата симулација. Модел се заснива на сложеној геометрији површине ударног таласа који се простире кроз грудвасту средину и скоковима хидродинамичких параметара стања ударног таласа при интеракцији са грудвама. Након имплементације модела емисије у семи-аналитички модел добијен је програмски код који на основу дате енергије експлозије остатка и параметара грудвасте средине даје коначну Σ - D релацију.

Резултати симулација, уз упоредни приказ семи-аналитичког модела, су представљени у Глави 6. Приказано поклапање модела са резултатима симулација је на задовољавајућем нивоу.

У седмој глави (Дискусија) је помоћу анализе семи-аналитичког модела приказан утицај који грудваста средина има на резултујуће Σ - D релације. Овај модел је омогућио креирање вештачких узорака великог броја ОСН у Σ - D равни, због кратког процесорског времена извршења кода модела. Поређењем овако генерисаних Σ - D узорака и Галактичког узорка извучени су вредни закључци о утицају грудвасте средине на расподелу Галактичких ОСН у Σ - D равни и облик њихове Σ - D релације, који су дати у Глави 9 (Закључак). Такође, направљена је анализа примењене апроксимације тест-честице у односу на модификовани ударни талас из радова других аутора. На крају је дискутован могући утицај селекционих ефеката у Галактичком узорку на закључке овог рада.

У Глави 9 су, поред закључака који директно следе из резултата ове дисертације, дате шире импликације који се односе на коришћене апроксимације у раду, што закључке чини потпунијим и информативнијим. У овој глави се отварају нова питања која јасно установљују пут ка даљим истраживањима у овој области.

Преглед важнијих резултата

Научни циљ ове докторске дисертације био је да се испита разлика у еволуцији остатака који еволуирају у интеракцији са молекулским облацима у односу на оне у релативно хомогенијој и најчешће знатно ређој средини. Ова два случаја најчешће одговарају остацима који потичу од супернових типа II и Ia, респективно. Док у раној фази еволуције значајнију улогу игра енергија експлозије, у каснијим фазама (фаза Седова и касније) значајно је већи утицај карактеристика међузвездане средине у којој остатак еволуира. Ово, поред других ефеката, узрокује расипање остатака на Σ - D дијаграму (које је евидентно у посматраним узорцима). Боље разумевање интеракције облака међузвездане материје са ударним таласом ОСН доприноси самом разумевању њихове хидродинамичке еволуције. Σ - D релација може да се употреби као метода процене и одређивања растојања до остатака па је истраживање расипања посматрачких података које потиче од различитих услова међузвездане средине важно са аспекта усавршавања ове методе и њеног евентуалног будућег унапређења.

Резултати ове дисертације су показали да нехомогена структура околне међузвездане средине може значајно да утиче на еволуцију ОСН и њихову Σ - D релацију. Научни резултат који се највише истиче је немогућност објашњења расподеле Галактичког узорка ОСН у Σ - D равни

претпоставком еволуције ОСН у хомогеним срединама (уз усвојени модел синхротронске емисије). Просечна Σ - D релација у средишњем делу узорка има сувише благ нагиб у односу на модел хомогених средина. На основу овога се може извући закључак да густа хетерогена материја у звезданој околини, која је по свему судећи грудваста, пружа добро објашњење за поравнавање посматраног Σ - D узорка од ≈ 13 до ≈ 50 рс, као и велико расипање тачака. Према приказаним резултатима, значајан утицај грудвастих облака почиње на пречницима у интервалу 14–70 рс, а просечан скок густине хипотетичке грудвасте средине износи ~ 2 –20 пута, зависно од густине околне средине, односно мехура звезданог ветра. Што је мања густина околне средине, очекује се већи скок просечне густине при изласку из мехура или при наиласку на густе облаке гаса. Семи-аналитички модел који је развијен у дисертацији пружа добру основу за развој сложенијих модела, који би укључивали фракталну структуру материје и/или радијативне губитке на облацима. Такође, узимање у обзир различитих типова ОСН и проширивање Галактичког узорка могло би да омогући детаљнију и бољу анализу феномена који су истраживани у овој докторској дисертацији. Нумерички код за симулације ОСН, који је развијен за потребе овог рада, подложен је даљем усавршавању, укључивањем магнетног поља и/или адаптивне прецизности мреже.

Библиографија кандидата, повезана са радом на докторској дисертацији:

Радови објављени у врхунским међународним часописима (M21):

1. **Kostić, P.**, Vukotić, B., Urošević, D., Arbutina, B., Prodanović, T., 2016: “Interstellar medium structure and the slope of the radio Σ - D relation of supernova remnants”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 461, 1421-1430, IF(2016): 4.961, <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1381>

Радови објављени у међународним часописима (M23):

1. **Kostić, P.**, 2019: “A new numerical code for hydrodynamical 3D simulations of supernova remnants”, *Serbian Astronomical Journal*, 199, 65-82, IF(2019): 0.565, <https://doi.org/10.2298/SAJ1999065K>
2. **Kostić, P.**, Knežević, S., Vukotić, B., 2019: “Hydrodynamics of supernova remnants: interaction with interstellar medium”, *Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes II, Tatranská Lomnica, Slovakia, September 24-28, 2018, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, 49, 377-379, IF(2019): 0.636, ISSN: 1336-0337

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34):

1. **Kostić, P.**, 2022: “Synchrotron Emission of SNRs in Clumpy Medium”, 3D Supernova (Remnants). How to connect simulations and observations?, Valencia, Spain, September 5-8, 2022
2. **Kostić, P.**, Arbutina, B., Vukotić, B., Urošević, D., 2022: “Synchrotron Emission of SNRs in Clumpy Medium”, Supernova Remnants and their Progenitors, Hybrid (hosted virtually and at the Center for Astrophysics, Harvard & Smithsonian), USA, August 16-18, 2022
3. **Kostić, P.**, 2019: “3D hydrodynamical simulation of the clumpy supernova ejecta”, Anisotropies in core-collapse supernova explosions, Palermo, Italy, October 21-23, 2019
4. **Kostić, P.**, Vukotić, B., 2019: “Hydrodynamical simulations of supernova remnant in fractal interstellar medium: morphology of the shock-wave”, Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death, Chania, Grece, June 3-8, 2019, Abstract book, p. 71.

Библиографија кандидата, која није повезана са радом на докторској дисертацији:

Радови објављени у врхунским међународним часописима (M21):

1. Wadhwa, S. S., Landin, N. R., **Kostić, P.**, Vince, O., Arbutina, B., De Horta, A. Y., Filipovic, M. D., Tothill N. F. H., Petrovic, J., Djurasevic, G., 2023: "Effects of Metallicity on the Instability Mass Ratio of Low Mass Contact Binary Systems", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, (Accepted), IF(2023): 4.8, <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3129>

Радови објављени у међународним часописима (M23):

1. **Kostić, P.**, Vince, O., Samurović, S., Vudragović, A., 2019: „Current status of the Milanković telescope”, Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes II, Tatranská Lomnica, Slovakia, September 24-28, 2018, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, 49, 148-150, IF(2019): 0.636, ISSN: 1336-0337

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34):

1. **Kostić, P.**, Vudragović, A., Vukotić, B., 2019: "Test observations of galactic supernova remnant G67.7+1.8 with 1.4m telescope Milanković at Astronomical Station Vidojevica, Serbia", *Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death*, Chania, Grece, June 3-8, 2019, Abstract book, p. 29.

Саопштења са скупа националног значаја штампана у изводу (M64):

1. Arbutina B., Vučetić, M. M., **Kostić, P.**, 2020: "Observations of selected standard stars in narrow-band filters from the AS Vidojevica", XIX Serbian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia, October 13-17, 2020

Закључак и предлог Комисије

Докторска дисертација под називом “Хидродинамичка и синхротронска радио-еволуција остатака супернових у нехомогеној међузвезданој средини” Петра Костића представља целовито научно дело. Кандидат је показао самосталност у раду и широко познавање области остатака супернових, служећи се напредним методама и развијајући сопствене алате за нумеричке симулације као и аналитичке моделе за анализу добијених података из симулација. Резултати дисертације представљају научни допринос истраживању интеракције остатака супернових са нехомогеном међузвезданом материјом, као и њихове синхротронске радио-емисије и Σ - D релације. Дат је значајан допринос разумевању посматраног узорка OCH у Млечном путу и јасно постављен пут ка даљем истраживању у овој области. 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 “Хидродинамичка и синхротронска радио-еволуција остатака супернових у нехомогеној међузвезданој средини” Петра Костића и одреди комисију за њену одбрану.

У Београду, _____

Комисија:

проф. др Дејан Урошевић,
редовни професор Математичког факултета

проф. др Бојан Арбутина,
ванредни професор Математичког факултета

др Душан Онић,
доцент Математичког факултета

др Слађана Кнежевић,
научни сарадник Астрономске опсерваторије