

**Наставно-научном већу  
Математичког факултета  
Универзитета у Београду**

На 338. седници Наставно-научног већа Математичког факултета Универзитета у Београду, од 20.01.2017. године одређени смо у Комисију за преглед и оцену докторске дисертације „**Моделовање радио-евоуције остатака супернових на основу хидродинамичких симулација и нелинеарног дифузног убрзавања честица**” кандидата Марка Павловића. На основу увида у садржај дисертације подносимо следећи

## **ИЗВЕШТАЈ**

### **Биографија кандидата**

Марко Павловић је рођен 16.07.1987. године у Пироту. Основну школу и гимназију завршио је у Пироту. Школске 2006/07. године уписао је основне студије на Математичком факултету Универзитета у Београду, смер Астрофизика. Дипломирао је са просечном оценом 9,97, а школске 2010/11. године на истом факултету уписује мастер студије. Мастер студије завршава 2011. године са просечном оценом 10,00 и стиче звање мастер-астроном. Школске 2011/12. године уписује докторске студије на Математичком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Астрономија и астрофизика.

Од јануара 2011. године је запослен на Математичком факултету у Београду, као истраживач-приправник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја „Емисионе маглине: структура и евоуција” (176005), под руководством проф. др Дејана Урошевића. У звање истраживач-сарадник изабран је у јуну 2012. године, а у исто звање је реизабран у јуну 2015. године.

### **Научно-истраживачки рад кандидата**

Научно-истраживачки рад кандидата се одвија у области проучавања остатака супернових, њихове радио-евоуције и дифузног убрзавања честица на ударним таласима. Кандидат се бави нумеричким моделовањем радио-евоуције остатака супернових применом хидродинамичких симулација у које је укључен модел нелинеарног дифузног убрзавања честица. За извршавање нумеричких симулација кандидат је користио суперачунарски кластер PARADOX IV, Института за физику у Земуну. Кандидат је учествовао и у раду групе која се бавила детекцијом III региона и остатака супернових кроз оптичка посматрања у ускопојасним филтерима (H $\alpha$ , [SII] и црвени континуум) и то на Националној астрономској опсерваторији Рожен у Бугарској, као и на Националној опсерваторији Тубитак у Анталији, Турска. Аутор је, односно коаутор, 12 научних радова објављених у научним часописима са рецензијом и 6 радова приказаних на научним скуповима у земљи и иностранству.

## Кратак приказ и структура докторске дисертације

Дисертација садржи укупно 172 странице текста са списком коришћене литературе од 246 референци, 43 слике, 3 табеле и једном страницом биографије аутора. Структура текста је следећа:

1. Увод (1-5)
2. Нелинеарно дифузно убрзавање честица на ударним таласима (6-26)
3. Нумерички методи у динамици флуида (27-70)
4. Радио-еволуција остатка G1.9+0.3 (71-113)
5. Општи модел радио-еволуције остатака супернових (114-140)
6. Физичка заснованост еквипартиције код остатака супернових (141-155)
7. Закључак и планови за даљи рад (156-159)
8. Литература (160-171)
9. Биографија аутора (172)

У дисертацији је анализирана радио-еволуција остатака супернових применом тродимензионалних хидродинамичких симулација и нелинеарног дифузног убрзавања честица. Хидродинамичке симулације, развијане и прилагођаване у овој дисертацији, омогућавају рачунање модификације ударних таласа од стране космичких зрака. Такође, развијен је конзистентан нумерички третман појачања магнетног поља услед резонантних и нерезонантних нестабилности изазваних космичким зрачењем. После кратког увода, у дисертацији је представљен Блазијев модел нелинеарног дифузног убрзавања честица на ударним таласима, који омогућава рачунање спектра убрзаних честица и ефективног адијабатског индекса флуида састављеног од гаса и убрзаних честица. У следећем поглављу су описане теоријске основе нумеричких метода које се примењују за хидродинамичко моделовање остатака супернових. У наредним поглављима дат је увид у главне резултате дисертације. Приказан је нумерички модел радио-еволуције најмлађег познатог Галактичког остатка G1.9+0.3 и дато објашњење растуће радио-емисије, која је честа појава код јако младих остатака супернових. Примењени модел даје важне закључке о садашњем и предвиђања о будућем понашању радио-емисије овог остатка. Развијен је и општи модел радио-еволуције остатака супернових, применом симулација на широки спектар релевантних физичких параметара, као што су густина околне средине, енергија експлозије супернове, ефикасност убрзавања и појачање магнетног поља. Добијене су радио-еволутивне траке које показују добро слагање са посматрачким узорком, који се састоји од Галактичких и вангалактичких остатака супернових. У дисертацији је анализирана физичка заснованост еквипартиције у остацима супернових, која представља битан аспект у разумевању магнетног поља у овим објектима. Разматра се и механизам којим се постиже еквипартиција између космичких зрака и магнетног поља у међузвезданој материји. На крају дисертације дати су закључци, као и планови за будући рад и развој области. За извршавање нумеричких симулација коришћен је суперрачунарски кластер PARADOX IV, Института за физику у Земуну.

## Преглед важнијих резултата дисертације

Главна идеја ове докторске дисертације је била да се примени што већи део досадашњих сазнања о остацима супернових, убрзању честица и појачању магнетног поља у један комплетан и конзистентан нумерички модел радио-еволуције остатака супернових. Кандидат је током рада на овој дисертацији развио модел састављен из два међусобно повезана дела. Први део обухвата динамичку еволуцију у нерадијативним фазама, коју је моделовао применом паралелизованог хидродинамичког кода PLUTO, намењеног решавању система парцијалних диференцијалних једначина методом Годунова. Кандидат је модификовао овај код увођењем временски и просторно зависног адијабатског индекса гаса, на који утичу убрзане честице присутне у гасу. Други део модела обухвата рачунање спектра убрзаних космичких зрака применом Блазијевог семи-аналитичког модела нелинеарног дифузног убрзавања на ударним таласима. Кандидат је, по први пут, у симулацијама овог типа, укључио ефекат појачавања магнетног поља удруженим ефектом резонантних и нерезонантних нестабилности изазваних током космичких зрака. У оквиру дисертације је моделована радио-еволуција најмлађег познатог Галактичког остатка G1.9+0.3 и уједено процењена старост овог остатка и густина околне међузвездане материје. Утврђено је да се стрмији спектрални индекси код младих остатака супернових добијају путем ефикасног механизма нелинеарног дифузног убрзавања и одговарајућег појачања магнетног поља. Нумерички модел који је развијен у тези предвиђа раст радио-емисије остатка G1.9+0.3 током фазе слободног ширења, достиже максималну вредности, да би затим укупан сјај опадао до краја фазе слободног ширења и у фази Седов-Тејлора. Показано је да је пораст радио-емисије уобичајена појава код младих остатака супернових. Поред радио-емисије, у тези је имплементиран модел за синтезу синхротронског спектра остатка G1.9+0.3 од радио до X-подручја, који показује добро слагање са посматрањима. Развијен је и апроксимативни модел гама емисије којим се предвиђа да ће овај остатак бити видљив будућим инструментима, укључујући СТА. У оквиру дисертације развијен је општи модел радио-еволуције остатака супернових, применом симулација на шири спектар релевантних физичких параметара, као што су густина околне средине, енергија експлозије супернове, ефикасност убрзавања и појачање магнетног поља. Корелација између околне густине и положаја на  $\Sigma$ -D дијаграму није једнозначна, посебно у случају старијих остатака. У симулацијама се добијају  $\Sigma$ -D нагиби између -4 и -6 за потпуни режим Седов-Тејлора, који се добро слажу са теоријским предвиђањима и вредностима за посматране узорке остатака супернових. У случају да се  $\Sigma$ -D релација примењује за одређивање даљине, симулације указују на постојање грешке од око 50%, чак и када се занемаре морфолошке карактеристике. Ова докторска дисертација даје и важан резултат везан за еквипартицију између космичких зрака и магнетног поља у остацима супернових. Показано је да је еквипартиција оправдана претпоставка за енергију електрона и магнетног поља у старијим остацима, током фазе Седов-Тејлора. Такође, у дисертацији је понуђено могуће објашњење за еквипартицију између космичких зрака и магнетног поља у међузвезданој материји. Очекује се да ће модели, развијени у овој дисертацији, представљати користан алат за будуће посматраче на радио-телескопима као што су ALMA, MWA, ASKAP, SKA и FAST. Симулације пружају неопходне податке о еволутивној фази посматраних остатака супернових, као и о физичким условима на ударним таласима где се убрзавају честице до релативистичких енергија. Симулације имају важну улогу у предвиђању научних резултата будућих великих посматрачких пројеката као и објашњавању нових, често неочекиваних резултата добијених посматрањима.

## Библиографија кандидата

А) Научни радови објављени у часописима међународног значаја, из дисертације:

1. Urošević, D., Pavlović, M. Z., Arbutina, B., 2018: "On the foundation of equipartition in supernova remnants", *Astrophys. J.*, u štampi **(M21, IF: 5.533)**
2. Pavlović, M. Z., Urošević, D., Arbutina, B., Orlando, S., Maxted, N., Filipović, M., 2018: "Radio evolution of supernova remnants including non-linear particle acceleration: insights from hydrodynamic simulations", *Astrophys. J.*, 852, 84 **(M21, IF: 5.533)**
3. Pavlović, M. Z., 2017: "Hydrodynamical and radio evolution of young supernova remnant G1.9+0.3 based on the model of diffusive shock acceleration", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 468, 1616 **(M21, IF: 4.961)**

Б) Научна саопштења на конференцијама штампана у целини, из дисертације:

1. Pavlović, M. Z., Urošević, D., Arbutina, B., 2016: "Radio evolution of supernova remnants including non-linear particle acceleration", *Cosmic Ray Origin - beyond the standard models*, 18-24. September 2016, San Vito di Cadore, Italy, Nuclear and Particle Physics Proceeding, u štampi **(M33)**

Г) Научна саопштења на конференцијама штампана у изводу, из дисертације:

1. Pavlović, M. Z., 2016: "Radio evolution of supernova remnants including non-linear particle acceleration", *Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death*, Proceedings of the Conference held 6-11 June 2016, in Chania, Greece, Online at <http://snr2016.astro.noa.gr>, id. 102 **(M34)**

Д) Остали научни радови објављени у часописима међународног значаја:

1. Yew, M., Filipović, M., Roper, Q., Collier, J. D., Crawford, E. J., O'Brien, A., Tothill, N. F. H., Pavlović, M. Z., Pannuti, T. G., Galvin, T. J., Kapinska, A., Cluver, M. E., Jarrett, T., 2018: "A Multi-Frequency Study of the Milky Way-like Spiral Galaxy NGC6744", *Publ. Astron. Soc. Aust.*, u štampi **(M21, IF: 4.095)**
2. Bozzetto, L. M., Filipović, M. D., Vukotić, B., Pavlović, M. Z., Urošević, D., Kavanagh, P. J., Arbutina, B., Maggi, P., Sasaki, M., Haberl, F., Crawford, E. J., Roper, Q., Grieve, K., Points, S. D., 2017: "Statistical analysis of supernova remnants in the large magellanic cloud", *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 230, 2 **(M21a, IF: 8.955)**
3. Vučetić, M. M., Ćiprijanović, A., Pavlović, M. Z., Pannuti, T. G., Petrov, N., Goker, U. D., Ercan, E. N., 2015: "Optical Observations of the Nearby Galaxy IC342 with Narrow Band [SII] and H $\alpha$  Filters. II – Detection of 16 optically-identified supernova remnant candidates", *Serb. Astron. J.*, 191, 67 **(M23, IF: 1.100)**
4. Pavlović, M. Z., Dobardžić, A., Vukotić, B., Urošević, D., 2014: "Updated radio  $\Sigma$ -D relation for Galactic supernova remnants", *Serb. Astron. J.*, 189, 25 **(M23, IF: 1.100)**

5. Zeković, V., Arbutina, B., Dobardžić, A., Pavlović, M. Z., 2013: “Relativistic Non-Thermal Bremsstrahlung Radiation”, *Int. J. Mod. Phys. A*, 28, 1350141 **(M22, IF: 1.127)**
6. Vučetić, M. M., Arbutina, B., Urošević, D., Dobardžić, A.; Pavlović, M. Z., Pannuti, T. G., Petrov, N., 2013: “Optical Observations of the Nearby Galaxy IC342 with Narrow Band [SII] and H $\alpha$  Filters. I”, *Serb. Astron. J.*, 187, 11 **(M23, IF: 1.100)**
7. Arbutina, B., Urošević, D., Vučetić, M. M., Pavlović, M. Z., Vukotić, B., 2013: “Modified Equipartition Calculation for Supernova Remnants. Cases  $\alpha = 0.5$  and  $\alpha = 1$ ”, *Astrophys. J.*, 777, 31 **(M21, IF: 6.733)**
8. Arbutina, B., Urošević, D., Andjelić, M., Pavlović, M., Vukotić, B., 2012.: “Modified equipartition calculation for supernova remnants”, *Astrophys. J.*, 746, 79 **(M21, IF: 6.733)**
9. Pavlović, M. Z., Urošević, D., Vukotić, B., Arbutina, B., Göker, Ü. D., 2013: “The radio surface-brightness-to-diameter relation for galactic supernova remnants: sample selection and robust analysis with various fitting offsets”, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 204, 4 **(M21a, IF: 16.238)**

Ћ) Остала научна саопштења на конференцијама штампана у целини:

1. Urošević, D., Pavlović, M. Z., Arbutina, B., Dobardžić, A., 2015: “The modified equipartition calculation for supernova remnants with the spectral index  $\alpha = 0.5$ ”, *Highlights of Astronomy*, Volume 16, pp. 398-398 **(M33)**

Е) Остала научна саопштења на конференцијама штампана у изводу:

1. Arbutina, B., Vučetić, M. M., 2016: “Some statistics of optical supernova remnant candidates in nearby galaxies”, *Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death*, Proceedings of the Conference held 6-11 June 2016, in Chania, Greece. Online at <http://snr2016.astro.noa.gr>, id. 13 **(M34)**
2. Vučetić, M. M., Arbutina, B., Pavlović, M. Z., Ćiprijanović, A.; Urošević, D.; Petrov, N.; Onić, D.; Trčka, A., 2016: “Observations of NGC 185 galaxy – study of supernova remnant in a dwarf elliptical galaxy”, 10th Serbian-Bulgarian Astronomical Conference, June, 2016, Belgrade **(M34)**
3. Anđelić, M. M., Arbutina, B., Urošević, D., Dobardžić, A., Pavlović, M. Z., 2012: “Observations of Galaxy IC342 in Narrow Band [SII] and H $\alpha$  Filters”, 8th Serbian-Bulgarian Astronomical Conference, May 08-12, 2012, Leskovac **(M34)**

## Закључак и предлог комисије

Докторска дисертација Марка Павловића под називом **„Моделовање радио-еволуције остатака супернових на основу хидродинамичких симулација и нелинеарног дифузног убрзавања честица”** је целовито научно дело које прегледно разматра неколико тема везаних за радио-еволуцију остатака супернових и дифузно убрзавање честица. Дисертација је изложена структурно јасно, са детаљним прегледом свих потребних тема чиме је кандидат показао висок ниво знања и разумевања проучаване материје. Резултати дисертације представљају оригинални научни допринос проучавању остатака супернових и њихове радио-еволуције. Покривајући тему своје дисертације, кандидат је објавио, самостално или као коаутор, три рада у међународним часописима категорије М21, као и по један рад из категорија М33 и М34. Поред тога имао је и неколико саопштења на научним конференцијама у земљи и иностранству.

Стога, предлажемо Наставно-научном већу Математичког факултета Универзитета у Београду, да прихвати овај извештај и позитивну оцену докторске дисертације **„Моделовање радио-еволуције остатака супернових на основу хидродинамичких симулација и нелинеарног дифузног убрзавања честица”** кандидата Марка Павловића, и одреди комисију за њену одбрану.

У Београду,  
12. фебруара 2018. године

Комисија за преглед и оцену:

---

проф. др Дејан Урошевић  
редовни професор (ментор)

---

др Бојан Арбутина  
доцент

---

др Бранислав Вукотић  
виши научни сарадник

---

др Душан Оних  
доцент