

Наставно-научном већу  
Математичког факултета  
Универзитета у Београду

## Извештај Комисије за преглед и оцену докторске дисертације

*„Мерење маса црних рупа у активним галактичким језгрима  
помоћу поларизације у широким емисионим линијама”*

**кандидата Ђорђа Савића**

### Биографија кандидата

Ђорђе Савић је рођен 1990. године у Крагујевцу, где је завршио основну и средњу школу. Основне студије на Математичком факултету Универзитета у Београду, смер астрономија и астрофизика, уписао је школске 2009/10. године. Дипломирао је 2013. године са просеком 9,65. Током основних студија био је награђиван поводом Дана факултета 2012., 2013. и 2014. године за успехе постигнуте током студирања. У новембру 2013. додељена му је награда „Проф. др. Захарије Бркић“ којом се награђује најбољи дипломирани студент Катедре за астрономију у претходној школској години. Мастер студије астрономије и астрофизике на Катедри за астрономију уписао је школске 2013/14. године. Мастер студије завршио је са просечном оценом 9,75 одбравивши 7. X 2014. рад под називом „Стабилност преноса масе у тесним двојним системима са белим патуљцима“, чиме је стекао звање Мастер астроном. Докторске студије уписао је школске 2014/15. године. Почев од школске 2015/16. стипендиста је Француске владе за докторске студије у ко-менторству у сарадњи са Универзитетом у Стразбуру.

У периоду од 2014. до 2018. године, био је ангажован као тутор на предмету „Spectroscopy of Astrophysical Plasma“, у оквиру програма Erasmus Mundus заједничких мастер студија из астрономије и астрофизике - „Astromundus“. Од 1. III 2015. запослен је на Астрономској опсерваторији у Београду као истраживач приправник на пројекту 176001: „Астрофизичка спектроскопија вангалактичких објеката“.

Објавио је 4 (извор NASA ADS) научна рада у међународним часописима и имао је 7 научних саопштења на астрономским конференцијама.

## Основне поставке и проблем који се решава

Супермасивне црне рупе (СМЦР-е) се налазе у центру готово сваке масивне галаксије у свемиру. Већина су неактивне, али када се око њих нађе већа количина гаса, долази до акреције материје на њих, тако да започиње активна фаза коју називамо активно галактичко језгро (АГЈ). У активној фази, СМЦР имају велики утицај на еволуцију галаксије домаћина и њеног окружења. Поуздано мерење масе СМЦР је зато важан задатак савремене астрономије. У ту сврху, Афанасиев и Поповић (2015) су недавно предложили методу која користи ротацију позиционог угла поларизационе равни дуж профила широке емисионе линије како би детектовали кеплеровско кретање и одредили масу СМЦР-е.

Ова метода претпоставља да су широке линије емитоване из пљоснатог диско-ликог региона са кеплеровским кретањем, док је главни механизам поларизације расејање на унутрашњем делу копланарног торуса прашине – тзв. екваторијално расејање. Основни циљ тезе је теоријски испитати тачност и могућности ове методе за различите геометрије широколинијског региона. Извршене су бројне Монте Карло симулације за моделирање екваторијалног расејања код АГЈ-а користећи програм за пренос зрачења STOKES. Разматрани је и утицај комплексног кретања емисионог региона које може бити у форми радијалног прилива и вертикалног одлива гаса, или услед присуства двојне супермасивне црне рупе. Такође, одабрана су четири добро позната АГЈ-а за посматрања: NGC 4051, NGC 4151, 3C 273 и PG0844+349. Спектрополариметрија је урађена користећи SCORPIO спектрограф монтираним на 6-метарском БТА телескопу САО РАН-а. Сваки од ових АГЈ-а је моделиран узимајући податке из релевантне литературе. Резултати модела поређени су са посматрачким подацима. Добијено је изузетно добро слагање модела и посматрања.

Анализом добијених резултата закључено је да се ова метода може користити за независно мерење маса СМЦР-а код АГЈ-а. Процењене масе СМЦР-а се добро слажу са резултатима добијеним другим методама. Утицај прилива и отицања гаса се може игнорисати уколико су њихове брзине мање од брзина кеплеровског кретања. За систем двојне СМЦР-е ова метода се не може користити, међутим, добијени су јединствени профили поларизационог угла који нису уобичајени за једну СМЦР-у, што може бити коришћено за одређивање могућих кандидата за ДСМЦР-е. Процењене масе СМЦР-а за четири посматрана АГЈ-а слажу се добро са масама које су процењене другим методама, пре свега методом реверберационог мапирања.

## Структура докторске дисертације

У складу са потписаним Уговором о коменторству између Универзитета у Београду и Универзитета у Стразбуру, докторска дисертација је писана на енглеском језику. Дисертација садржи укупно 151-у страницу текста са списком коришћене литературе од 447 референци, 47 слика, 7 табела и једном страном биографије аутора. Десет процената укупног текста (не укључујући странице са списком литературе) дата је у сажецима писаним на енглеском, српском и француском језику. Структура текста је следећа:

### Contents

- i Abstract (xi - xxiv)
- ii Сажетак (xxv - xxxiix)
- iii Résumé (xxxix - lii)
- 1. Introduction (1 - 34)
- 2. Polarization of AGNs (35 - 43)
- 3. Methods for measuring the SMBH masses (44 - 50)
- 4. Polarization formalism (51 - 68)
- 5. Radiative transfer (69 - 78)
- 6. Models and observations (79 - 100)
- 7. Results and discussion (101 - 123)
- 8. Conclusions and future prospects (124 - 126)
- A Detailed results of the SMBBHs polarization modeling (127 - 138)
- Bibliography (139 - 151)
- Biography (152 - 152)

У сажецима на енглеском, српском и француском дат је кратак опис проблема који се решава, методе које су коришћене и основни резултати приказани у докторској дисертацији.

У првом уводном поглављу (Introduction) дат је широк преглед основних карактеристика активних галактичких језгара, њихово историјско откриће и значај, структура, класификација и методе за њихово детектовање.

У другом поглављу (Polarization of AGNs) дат је преглед поларизационих својства активних галактичких језгара у широком фреквенционом опсегу од X-зрачења до радио-таласа. Посебан акценат је стављен на поларизацију у оптичком домену и механизам екваторијалног расејања који је доминантан код АГЈ-а типа 1 (ради се о АГЈ-има са широким емисионим линијама у спектру).

У трећем поглављу (Methods for measuring the SMBH masses) представљене су методе за мерење маса СМЦП-а. Метода којом се ова теза бави детаљно је описана, а у компаративне сврхе, детаљно је приказана и метода реверберационог мапирања.

У четвртом поглављу (Polarization formalism) дат је математички апарат за опис поларизационог стања електромагнетног зрачења. Представљени су Џонсов и Стоксов формализам, Милеров рачун и приказане су опште карактеристике Томсоновог, Рејлијевог, Мијевог и Комтоновог расејања.

У петом поглављу (Radiative transfer) формулисан је проблем преноса зрачења и приказане су најпознатије методе за његово решавање. Дат је осврт на програм STOKES који је заснован на Монте Карло алгоритму, са укљученом поларизацијом и кинематиком.

У шестом поглављу (Models and observations) описани су општи модели екваторијалног расејања. Посебно је разматран и сценарио који укључује двојне супермасивне црне рупе. У другом делу овог поглавља описана је техника описана је техника астрифизичких посматрања уз помоћ спектрополариметра и дате су основне посматрачке карактеристике одабраних објеката.

У седмом поглављу (Results and discussion) представљени су резултати моделирања. Главни резултат ове тезе је да метода за мерење маса супермасивних црних рупа помоћу поларизације у широким емисионим линијама има добру теоријску основу. Метода се може користити када утицаји прилива или вертикалног отицања гаса нису значајни у односу на кеплеровско кретање.

У осмом поглављу (Conclusions and future prospects) дати су закључци и предлози за будући рад. То обухвата примену методе за мерење маса СМЦР-а користећи поларизацију високо јонизованих емисионих линија, што подразумева посматрање АГЈ-а на већим космолошким црвеним помацима.

У додатку А детаљно су представљени резултати моделирања поларизације широких емисионих линија када се у центру активног галактичког језгра налази двојна супермасивна црна рупа.

На крају је дато 447 референци које кандидат цитира у раду, као и кратка биографија кандидата.

## Преглед најважнијих резултата

Најважнији резултат ове дисертације је провера методе за мерење масе супермасивних црних рупа у центрима активних галаксије помоћу поларизације у широким линијама. Кандидат је у тези показао и теоријски и експериментално (на оригиналним посматрачким подацима) да метода даје добре резултате и да може бити коришћена за одређивање маса супермасивних црних рупа. Посебно је значајно што је у овој дисертацији показано да се ова метода може користити независно (од других метода) за мерење маса супермасивних црних рупа, при чему се добијене масе овом методом добро слажу са масама добијеним методом реверберационог мапирања. То је од изузетног значаја за будућа истраживања која се баве утицајем супермасивних црних рупа на еволуцију галаксија домаћина и непосредне околине.

Поред овог, кандидат је испитивао утицај различитих расподела брзина и структуре емисионг гаса, који емитује широке линије, на поларизовану светлост. Пре свега разматрано је кеплеровско кретање (које је очекивано за гас у јаком гравитационом пољу), приливе и одливе материје (често посматране у околини црних рупа), као и динамику двојне супермасивне црне рупе. Пре свега ове различите структуре и расподеле брзина су проучаване у циљу њиховог утицаја на мерење масе супермасивних црних рупа, а додатно ова истраживања су интересантна и значајна сама по себи и сагледана су у једном ширем контексту који се односи на изучавања унутрашње структуре активних галактичких језгара. Посебно везано за проблем који је данас веома актуелан, а то је питање да ли у центру активних галаксија можемо очекивати двојне супермасивне црне рупе које би могле да емитују гравитационе таласе. Као један од резултата, симулирани су специфични облици поларизационог угла (расподела поларизационог угла у функцији таласне дужине дуж емисионе линије) у случају када је у центру присутан систем двојних црних рупа, што се може користити за детекцију ових система у центрима галаксија.

Један од значајних резултата добијених у овој тези је да облик профила поларизационог угла у линији указује на смер ротације гаса у области која је блиска супермасивној црној рупи, што може да се користи за испитивање везе између кинематике емисионог гаса у околини црне рупе и звезда које окружују ову област. Другим речима показано је да поларизација у линији код активних галаксија може дати доста информација о централном делу ових објеката (карактеристична ротација, димензије емисионих региона и њихова инклинација), које нам нису доступне из стандардних оптичких посматрања.

На крају треба поменути да је ова дисертација резултат успешно започете научне сарадње између Астрономске опсерваторије у Београду и Астрономске опсерваторије у Стразбуру, а да су представљени посматрачки подаци резултат већ постојеће дугогодишње сарадње Астрономске опсерваторије у Београду и Специјалне астрофизичке опсерваторије (САО) у Русији. У оквиру рада на дисертацији,

имплементиран је STOKES код обрачунавања преноса зрачења и поларизације. Додатно су иницирана нова посматрања активних галаксија помоћ 6м телескопа на САО. Резултати (теоријски и посматрачки) објављени у овој тези и пратећим радовима су оригинални и имаће утицај на будућа истраживања у овој области.

У наставку дајемо преглед радова које је кандидат објавио, а који садрже резултате добијене у раду на овој тези. Један део резултата који ће произаћи из модела који је разрађен у тези ће тек бити објављен, што је најављено у перспективама за будући рад.

### Научни радови из области истраживања који су презентовани у дисертацији

1. **Savić, Đ.**; Goosmann, R.; Popović, L. Č.; Marin, F.; Afanasiev, V. L., *AGN black hole mass estimates using polarization in broad emission lines*, **ASTRONOMY & ASTROPHYSICS**, Volume: **614**, Article Number: A120, DOI: 10.1051/0004-6361/201732220, Published: JUN 28 2018, ISSN:0004-6361 (M21, импакт фактор 6.209 у 2018.)
2. **Savić, Đ.**; Marin, F.; Popović, L. Č., *Predicting the broad-lines polarization emitted by supermassive binary black holes*, **ASTRONOMY & ASTROPHYSICS** Volume: **623**, Article Number: A56, DOI: 10.1051/0004-6361/201834443, Published: MAR 5 2019, ISSN:0004-6361 (M21, импакт фактор 6.209 у 2018.)
3. **Savić, Đ.**, *Comparison between the Influence of Outflows and Supermassive Binary Black Holes in Active Galactic Nuclei on the Polarization Angle Profiles*, **INTERNATIONAL JOURNAL OF COSMOLOGY, ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, MADRIDGE PUBLISHERS**, FEB 2019, DOI: 10.18689/ij-caa-1000113

### Остали научни радови кандидата

1. Lobos, P. A. Rojas; Goosmann, R. W.; Marin, F.; **Savić, Đ.**, *Modeling optical and UV polarization of AGNs IV. Polarization timing*, **ASTRONOMY & ASTROPHYSICS**, Volume: **611**, Article Number: A39, DOI: 10.1051/0004-6361/201731331, Published: MAR 20 2018, ISSN:0004-6361 (M21, импакт фактор 6.209 у 2018.)

## Научна саопштења на домаћим и међународним конференцијама

1. **Savić, Đ.**, Popović, L. Č., Goosmann, R., Marin, F., Afanasiev, V. L., *Modeling the broad emission line polarization in active galactic nuclei*, 12th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Vrdnik, 3. - 7. Jun, 2019 (предавање)
2. **Savić, Đ.**; Marin, F.; Popović, L. Č., *Polarization in broad lines of SMBHBs*, Serbian-Chinese Astronomical Scientific Meeting: Physics and Nature of Active Galactic Nuclei, Book of Abstracts, Beograd, Srbija, 16. - 19. Apr, 2018 (предавање)
3. **Savić, Đ.**, *NLS1 vs BLS1: Polarization observations and modeling*, Revisiting narrow-line Seyfert 1 galaxies and their place in the Universe, Padova, Italija, 9. - 13. Apr, 2018 (постер)
4. **Savić, Đ.**, Popović, L. Č., Goosmann, R., Marin, F., *Super massive binary black hole and polarisation in the broad lines*, 11th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Šabac, 21. - 25. Aug, 2017 (предавање)
5. **Savić, Đ.**, Goosmann, R., Marin, F., Afanasiev, V. L., Popović, L. Č., *Polarization of broad lines in AGNs and black hole mass estimation*, Quasars at all cosmic epochs, Padova, Italija, 2. - 7. Apr, 2017 (предавање)
6. **Savić, Đ.**, Popović, L. Č., Goosmann, R., Marin, F., Ilić, D., Afanasiev, V. L., *Measuring Black Hole Masses in Active Galactic Nuclei Using Polarization in Broad Line Profiles*, 28th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Faculty of Physics, University of Belgrade, pp. 429-432, ISSN: 978-86-84539-14-6, DOI: 978-86-84539-14-6, Srbija, 29. Aug - 2. Sep, 2016 (постер)
7. **Savić, Đ.**, Popović, L. Č., Goosmann, R., Gaskell, M., Marin, F., *POLARIZATION IN AGN BROAD EMISSION LINES – THE CENTRAL SOURCE ANISOTROPY AND GAS KINEMATICS*, Book of abstracts of the X Serbian-Bulgarian Astronomical Conference, Astronomical Observatory, Belgrade, no. 10, pp. 48 - 48, Srbija, 30. May - 3. Jun, 2016 (предавање)

## Закључак и предлог

Докторска дисертација под називом „Мерење маса црних рупа у активним галактичким језгрима помоћу поларизације у широким емисионим линијама“ Ђорђа Савића представља целовито научно дело. Проблематика која се разматра изложена је структурно, са јасним дефинисањем проблема, методама које су коришћене, описом посматрања и дискусијом добијених резултата, што је поткрепљено изузетно комплетним списком коришћене литературе. Поглавља дисертације представљају независне јединице који су повезане у целину како би се добила комплетнија слика о оптичкој поларизацији у широким емисионим линијама код активних галактичких језгара, као и под каквим све околностима се она може користити за мерења маса супермасивних црних рупа и детекцију двојних супермасивних црних рупа.

Кандидат је показао широко познавање ове области која се односи на поларизацију код активних галаксија, служећи се подједнако аналитичким и нумеричким методама. Истичемо да је кандидат успешно савладао проблем моделирања поларизације у широким линијама код активних галаксије узимајући различите геометрије области која емитује ове линије, урадио је нова посматрања која су затим фитована са моделима који укључују поларизацију зрачења.

Резултати дисертације представљају важан научни допринос у испитивању методе за независно мерење маса супермасивних црних рупа, који је у овом раду теоријски и експериментално проверен, што има веома велики утицај на будуће одређивања маса супермасивних црних рупа које се налазе у центрима галаксија. Стога је овај рад од изузетног значаја за будућа истраживања која се баве утицајем супермасивних црних рупа на еволуцију галаксија домаћина и своје непосредне околине јер је добијена нова и независна метода за њихово директно мерење.

Из научне области којом се бави у својој дисертацији, кандидат је објавио, самостално и као коаутор, три рада у међународним часописима на SCI листи, од којих су два објављена у водећим међународном часопису (где је кандидат први аутор).



Имајући у виду горе речено, предлажемо Наставно-научном већу Математичког факултета да прихвати овај извештај и позитивну оцену докторске дисертације „Мерење маса црних рупа у активним галактичким језгрима помоћу поларизације у широким емисионим линијама“ Ђорђа Савића и одреди комисију за њену одбрану.

Београд, 07. 10. 2019.

Комисија за преглед и оцену:

---

проф. др Лука Ч. Поповић  
научни саветник,  
Астрономска опсерваторија

---

др Марко Сталевски  
научни сарадник,  
Астрономска опсерваторија

---

проф. др Драгана Илић  
ванредни професор,  
Математички факултет