

## ИСТРАЖИВАЊА ГАЛАКТИЧКИХ И ВАНГАЛАКТИЧКИХ ГРАВИТАЦИОНИХ ПОЈАВА НА АСТРОНОМСКОЈ ОПСЕРВАТОРИЈИ (2017-2019)

ПРЕДРАГ ЈОВАНОВИЋ<sup>1,\*</sup>, ЛУКА Ч. ПОПОВИЋ<sup>1</sup>, НАТАША БОН<sup>1</sup>,  
ЕДИ БОН<sup>1</sup>, МАРКО СТАЛЕВСКИ<sup>1</sup>, ВЕСНА БОРКА ЈОВАНОВИЋ<sup>2</sup>,  
ДУШКО БОРКА<sup>2</sup> и МАРКО СТОЈАНОВИЋ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Астрономска опсерваторија, Волгина 7, п.фах 74, 11060 Београд, Србија  
<sup>2</sup>Институт за нуклеарне науке "Винча", Универзитет у Београду, п.фах 522,  
11001 Београд, Србија

<sup>3</sup>Медицински факултет, Универзитет у Нишу, Булевар др Зорана Ђинђића  
81, 18108 Ниш, Србија

\*E-mail: pjovanovic@aob.rs

**Резиме:** У овом раду приказана су научна истраживања урађена на пројекту 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама", представљен је истраживачки тим пројекта и дати су досадашњи остварени циљеви истраживања. Пројекат се одвија у оквиру програма основних истраживања за период 2011-2019. и финансиран је од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

**Кључне речи:** Структура космоса, гравитација, супермасивне црне рупе, гравитациона сочива, тамна материја, космологија

### 1. УВОД

Уговор из програма основних истраживања број 401-00-9/2011-01 о реализацији и финансирању научноистраживачког пројекта 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама", који је закључен 25. јануара 2011. године, и који се односи на циклус истраживања од 2011. до 2014. године, кроз више анекса је продужаван и у периоду од 2015. до 2019. године. Пројекат је у области "Геонауке и астрономија", тип пројекта је теоријско-експериментални, а по програму спада у основна истраживања (ОИ).

Реализатори истраживања су Астрономска опсерваторија у Београду (АОБ) и Институт за нуклеарне науке "Винча" (ИННВ), а од маја 2018. године као реализатор пројекта додат је и Медицински факултет Универзитета у Нишу (Унив. Ниш).

Анексима Уговора о реализацији пројекта ОИ 176003, продужавано је његово трајање у више наврата. Анекс IV Уговора о реализацији Пројекта 176003 између Републике Србије и реализатора истраживања закључен је 25. маја 2015. за продужење пројектног циклуса у току 2015. године, анекс V Уговора од 3. марта 2016. за продужење до 30. јуна 2016, анекс VI Уговора од 1. јула 2016. за продужење до 31. децембра 2016, анекс VII Уговора од 16. марта 2017. за продужење до 30. јуна 2017. године, анекс VIII Уговора од 19. јула 2017. за продужење до 30. јуна 2017. године, анекс IX Уговора од 15. априла 2018. за продужење до 31. децембра 2018. године, анекс X Уговора од 15. априла 2019. за настављање финансирања и у току 2019. године.

Укупан обим истраживања на пројекту (годишње) од почетка пројектног циклуса износио је 40 истраживачких месеци, а од маја 2018. године износи 48 истраживачких месеци. Руководилац пројекта ОИ 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама" је др Предраг Јовановић, научни саветник, запослен на Астрономској опсерваторији у Београду.

## 2. ИСТРАЖИВАЧКИ ТИМ ПРОЈЕКТА 176003

Наш пројекат окупља осам истраживача (видети слику 1), од којих је седам доктора наука и један студент докторских студија:

- др **Предраг П. Јовановић** (рођен 14. 04. 1968), руководилац пројекта, научни саветник, АОБ, ангажован на пројекту са 10 истраживачких месеци (ИМ) годишње
- др **Лука Ч. Поповић** (рођен 16. 04. 1964), научни саветник, АОБ, 2 ИМ
- др **Еди А. Бон** (рођен 28. 09. 1970), научни сарадник, АОБ, 6 ИМ
- др **Наташа Ж. Бон** (рођена 15. 08. 1979), научни сарадник, АОБ, 4 ИМ
- др **Марко Т. Сталевски** (рођен 07. 03. 1982), научни сарадник, АОБ, 6 ИМ
- др **Душко В. Борка** (рођен 15. 08. 1972), научни саветник, ИННВ, 4 ИМ
- др **Весна В. Борка Јовановић** (рођена 18. 03. 1974), научни сарадник, ИННВ, 8 ИМ
- **Марко Д. Стојановић** (рођен 18. 04. 1991), сарадник у настави, Унив. Ниш, 8 ИМ

Резултати рада на пројекту ОИ 176003 представљени су на више домаћих и међународних конференција (постер секције, кратка предавања, предавања по позиву) и на семинарима, и објављени су радови у домаћим и у врхунским часописима међународног значаја.



**Слика 1:** Истраживачки тим: Душко Борка, Лука Поповић, Предраг Јовановић, Еди Бон, Весна Борка Јовановић, Наташа Бон, Марко Сталевски, Марко Стојановић.

У периоду од 2017. до 2019. г. сарадници пројекта објавили су 13 радова у међународним часописима М20 (врхунски часописи међународног значаја М21 и истакнути часописи међународног значаја М22), а библиографија објављених радова је дата на крају овог рада.

Као што се може видети из списка аутора на објављеним радовима, остварена је интензивна међународна сарадња са страним колегама, што је за последицу имало вишеструку корист у погледу трансфера знања и усавршавања истраживача.

### **3. ФИНАНСИРАЊЕ ПРОЈЕКТА**

Пројекат је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Након продужетка пројекта, набављено је више рачунара као и остале ситне опреме.

Директни материјални трошкови истраживања (ДМТ), који су у функцији обављања научноистраживачког рада на пројекту, деле се на две подгрупе: ДМТ I (тј. режија) и ДМТ II. Део ДМТ I чине: трошкови рада запослених лица која обављају административне и техничке послове, трошкови електричне енергије, воде, грејања, комуналних услуга. Део ДМТ II су трошкови набавке потрошног материјала, ситне опреме и ситног инвентара, трошкови путовања, трошкови објављивања резултата, као и трошкови услуга трећим лицима.

ДМТ II су коришћени за: учешће свих чланова пројекта на међународним и домаћим конференцијама, организовање међународних конференција, набавку ситне опреме, трошкове објављивања резултата и њихову промоцију и популаризацију, као и за радне посете страних сарадника.

Накнаде за рад истраживача у бруто износу (које укључују нето износ, порез, допринос и додатна средства за време проведено на раду), исплаћене од стране Министарства по годинама, за 2017. годину су износиле: 4.390.101,42 за АОБ и 1.894.875,00 за ИННВ, што је укупно 6.284.976,42 динара. Док су за 2018. годину ова средства износила: 5.156.715,01 за АОБ и 1.989.612,00 за ИННВ, што је укупно 7.146.327,01 динара.

### **4. НАУЧНИ ЦИЉ ПРОЈЕКТА**

Основни научни циљ пројекта 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама" је истраживање вангалактичких и космолошких појава којима управља гравитација. На пројекту се бавимо истраживањима следећих гравитационих појава на галактичким, вангалактичким и космолошким скалама: појединачне и двојне супермасивне црне рупе у центрима галаксија (посматрачки ефекти јаког гравитационог поља и зрачење из њихове околине), гравитациона сочива, посматрачка космологија и космолошка инфлација (одређивање космолошких и инфлаторних

параметара), тамна материја и њене алтернативе у облику теорија модификоване гравитације, астрономска тестирања предвиђања стандардне (општа теорија релативности) и алтернативних теорија гравитације (орбитална прецесија, маса гравитона, равне ротационе криве и барионска Тали-ФишEROVA релација код спиралних галаксија, фундаментална раван код елиптичких галаксија).

Ради прегледности, можемо резултате наших истраживања да сврстамо по следећим областима и подобластима:

1. Супермасивне црне рупе (СМЦР) у центрима галаксија
  - 1.1. СМЦР у језгрима активних галаксија
  - 1.2. Торус прашине око СМЦР у АГЈ
  - 1.3. Двојне СМЦР
  - 1.4. СМЦР у центру Млечног пута;
2. Барионска Тали-ФишEROVA релација (БТФР) код спиралних и фундаментална раван (ФР) код елиптичних галаксија ;
3. Одређивање космолошких параметара помоћу квазара;
4. Одређивање Хаблове константе из временског кашњења светлости код квазара под утицајем гравитационих сочива;
5. Одређивање посматрачких параметара стандардне и тахионске космолошке инфлације.

Врсте истраживања које примењујемо су: теоријска разматрања, нумеричке симулације и поређење теоријских резултата са астрономским посматрањима.

Дакле, истраживања на пројекту обухватају следеће гравитационе појаве:

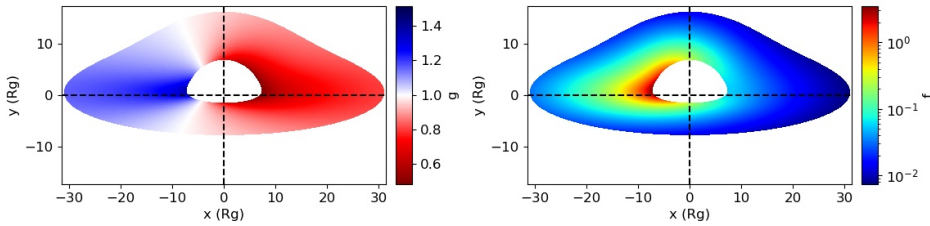
### 1. Супермасивне црне рупе (СМЦР) у центрима галаксија

За СМЦР је данас широко прихваћено мишљење да се налазе у центрима већине галаксија и да имају фундаменталан утицај на формирање и еволуцију самих галаксија-домаћина. У оквиру нашег пројекта се бавимо истраживањима ефеката јаког гравитационог поља у близини СМЦР у језгрима активних галаксија (АГ) и квазара, затим истраживањем њихове активности и зрачења из њихових релативистичких акреционих дискова, као и изучавањем инфрацрвеног зрачења емитованог из торуса прашине у језгрима активних галаксија и квазара.

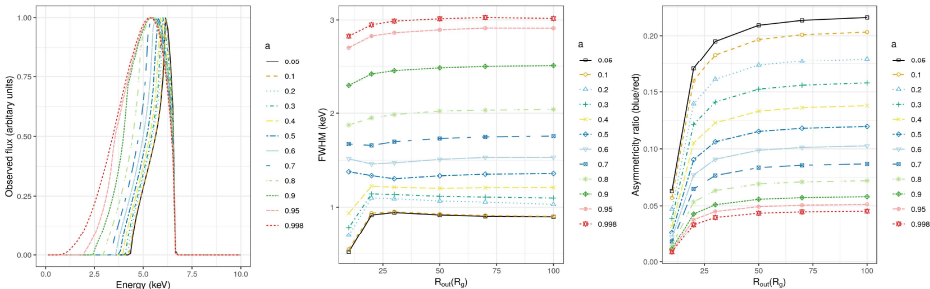
#### 1.1. СМЦР у језгрима активних галаксија

У оквиру истраживања зрачења из релативистичких акреционих дискова око СМЦР, у периоду 2017-2019. покушали смо да, уз помоћ претходно развијених нумеричких симулација (пример приказан на слици 2), установимо зашто је релативистичка спектрална линија гвожђа Ка

детектована само у мање од половине активних галаксија типа I, а не у свима њима. У том циљу смо испитивали како различити параметри акреционог диска и СМЦР, као што су спин СМЦР, нагиб диска, његов унутрашњи и спољашњи радијус и емисивност, утичу на неке карактеристике поменуте линије као што су њена ширина на половини максимума и асиметрија између плавог и црвеног дела те линије (видети слику 3). Добијени резултати су показали да до недостатка детекције релативистичке линије гвожђа код наведених активних галаксија може доћи не само због неких специфичних вредности за спољашњи радијус и нагиб диска, већ и због недовољне спектралне резолуције и осетљивости данашњих детектора за X-зрачење (М. Milošević, М. Pursiainen, Р. Jovanović, Л. Ђ. Popović, IJMPA, 33, 1845016 (2018)).



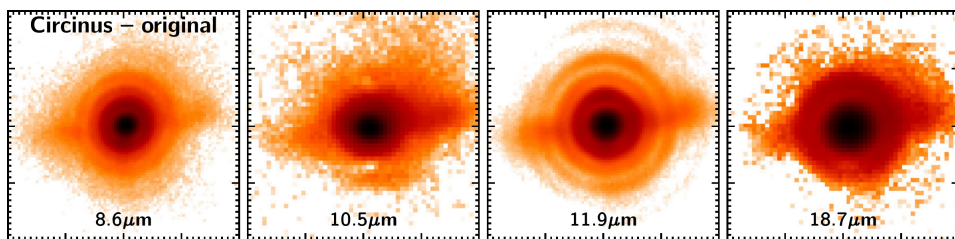
Слика 2: X-зрачење из релативистичког акреционог диска око СМЦР.



Слика 3: Утицај спина СМЦР на симулиране профиле линија (лево), ширина линије на средини максимума (средина) и однос асиметрије (десно). Резултати одговарају инклинацији диска од  $20^\circ$  и индексу степеног закона емисивности  $q = 4$ . (М. Milošević, М. Pursiainen, Р. Jovanović, Л. Ђ. Popović, IJMPA, 33, 1845016 (2018)).

### 1.2. Торус прашине око СМЦР у АГЈ

Осим Х-зрачења, активне галаксије емитују и у инфрацрвеном (ИЦ) делу спектра. То ИЦ зрачење потиче из прашине која окружује централну СМЦР и њен акрециони диск и која по стандардном моделу заузима област у облику торуса. У оквиру нашег пројекта бавили смо се не само теоријским истраживањима и нумеричким симулацијама торуса прашине и емитованог ИЦ зрачења, већ и прикупљањем и обрадом одговарајућих посматрања. Пример посматраног торуса прашине код блиске активне галаксије дат је на слици 4. Међутим, моделовањем тих посматрања помоћу симулација преноса зрачења је установљено да у случају ове активне галаксије ИЦ зрачење не потиче из области која има тороидни облик (као што се то обично мисли), већ формира сложенију структуру која се састоји од диска и конусне љуске (M. Stalevski, D. Asmus, K. R. W. Tristram, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 472, 3854 (2017); M. Stalevski, K. R. W. Tristram, D. Asmus, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 484, 3334 (2019)).

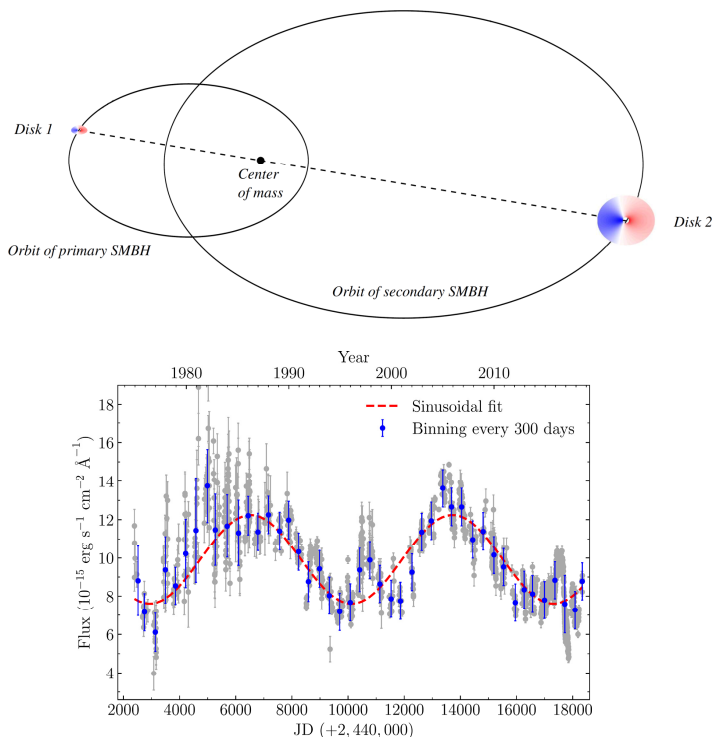


**Слика 4:** Инфрацрвене слике АГЈ-а у Цирцинусу добијене помоћу VLT/VISIR. (M. Stalevski, D. Asmus, K. R. W. Tristram, *MNRAS* 472, 3854 (2017)).

### 1.3. Двојне СМЦР

Релативно честа појава која може да се посматра на вангалактичким скалама је судар две галаксије. Приликом таквог судара, њихове централне СМЦР постају гравитационо везане и почињу да орбитирају око заједничког центра масе, формирајући тако двојни систем СМЦР (видети илустрацију на горњем панелу слике 5). Временом те две СМЦР се спирално приближавају једна другој, да би се на крају сјединиле у једну резултујућу СМЦР. Сједињавања таквих двојних СМЦР представљају најмоћније изворе гравитационих таласа у природи, због чега су изузетно важна њихова истраживања којима се и ми бавимо у оквиру нашег пројекта. Конкретно, када се ради о двојном систему у активним галаксијама, онда око његових компоненти постоје акрециони дискови који зраче у различитим спектралним областима, па се такви системи могу детектовати на основу

периодичности у њиховим посматраним електромагнетним спектрима и кривама сјаја (видети доњи панел слике 5).



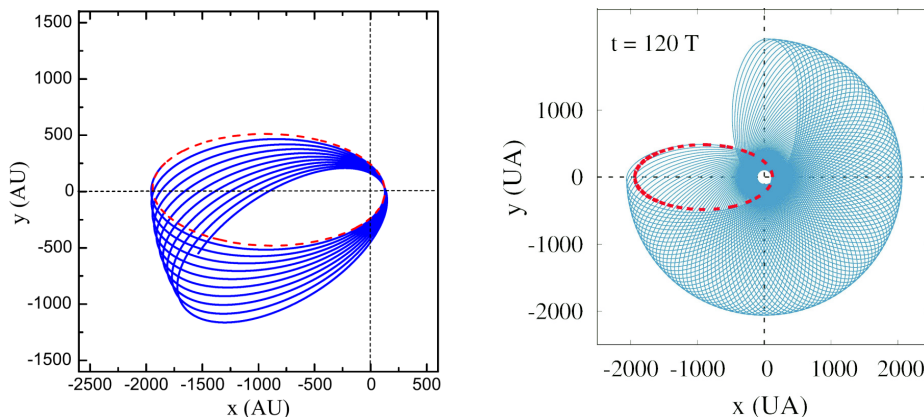
**Слика 5:** Горe: шематски приказ два акрециона диска око компоненти бинарног система СМЦР, ротирајући дуж кеплеровске орбите. (P. Jovanović, V. Borka Jovanović, D. Borka, T. Bogdanović, *Adv. Space Res.* 54, 1448 (2014)). Доле: периодичне промене оптичке криве сјаја код активне галаксије Ark 120. (Y.-R. Li, J.-M. Wang, Z.-X. Zhang et al., *Astrophys. J. Supp. Ser.* 241, 33 (2019)).

#### 1.4. СМЦР у центру Млечног пута

Осим СМЦР у другим галаксијама, у оквиру нашег пројекта бавимо се и истраживањима везаним за СМЦР која се налази у центру наше Галаксије, а који је познат као Sgr A\*. На невеликом растојању око Sgr A\* кружи јато тзв. S-звезда, које због своје близине СМЦР представљају идеалну лабораторију за проверу предвиђања опште теорије релативности (ОТР) као и алтернативних теорија гравитације. Ми смо се веома интензивно бавили овим истраживањима могућих одступања од ОТР као стандардне теорије гравитације, тако што смо из астрометријских посматрања S2 звезде одређивали њену посматрану орбиталну прецесију и поредили је са предвиђањима ОТР и неким теоријама модификоване гравитације (видети

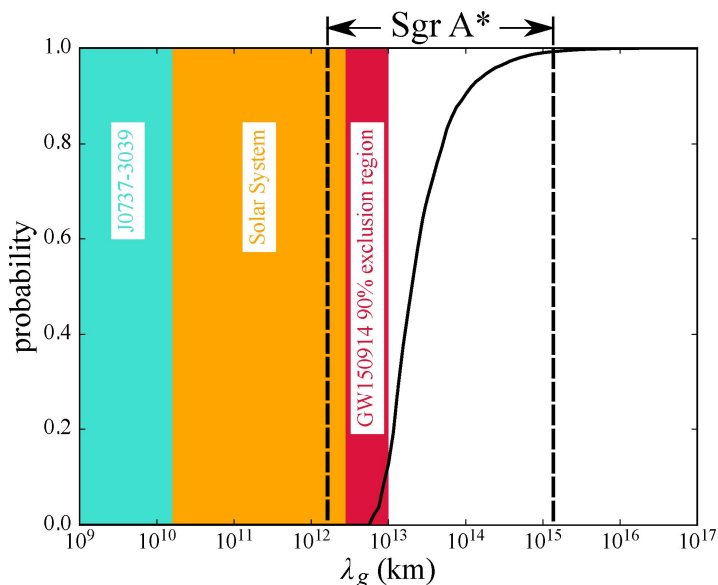


слику 6 за примере симулираних орбита у две алтернативне теорије гравитације).



**Слика 6:** Симулиране орбите S2 звезде око СМЦР у центру наше Галаксије, у Yukawa (лево) и скалар-тензорској гравитацији (десно). (D. Borka, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, A. F. Zakharov, JCAP 11, 050 (2013); S. Gravina, S. Capozziello, D. Borka, V. Borka Jovanović, Publ. AOB 98, 129 (2018)).

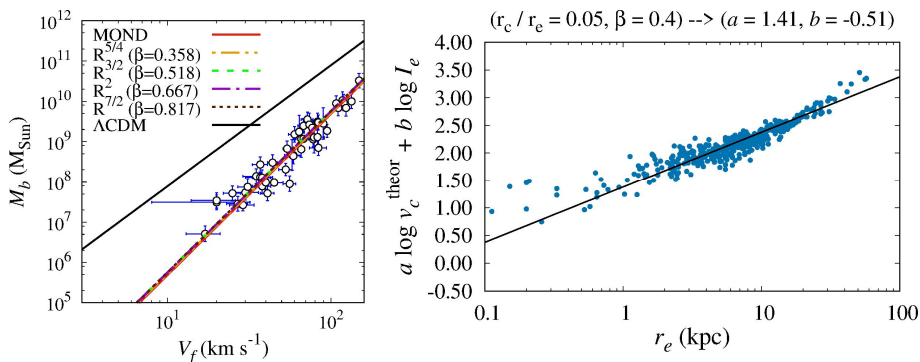
Једна од тих теорија предвиђа и поправку Њутновог гравитационог потенцијала у облику додатног експоненцијалног члана (Yukawa гравитација). Ова гравитација укључује и један параметар који одговара Комптоновој таласној дужини гравитона па се може користити за одређивање масе гравитона. На тај начин могуће је проверити да ли посматрања S-звезда потврђују предвиђања ОТР да гравитон нема масу и да се креће брзином светлости, или су ипак више у складу са предвиђањима Yukawa гравитације која предвиђа да гравитон има веома малу масу и да се креће нешто спорије од брзине светлости. На слици 7 су приказани наши резултати за Комптонову таласну дужину гравитона, добијени поређењем симулиране орбите S2 звезде у Yukawa гравитацији са њеном посматраном орбитом, што представља нови и независан метод за одређивање масе гравитона. Добијени резултати су такође упоређени са одговарајућим проценама *LIGO* колаборације за масу гравитона, са којима су, као што се може видети, у складу и сасвим упоредиви.



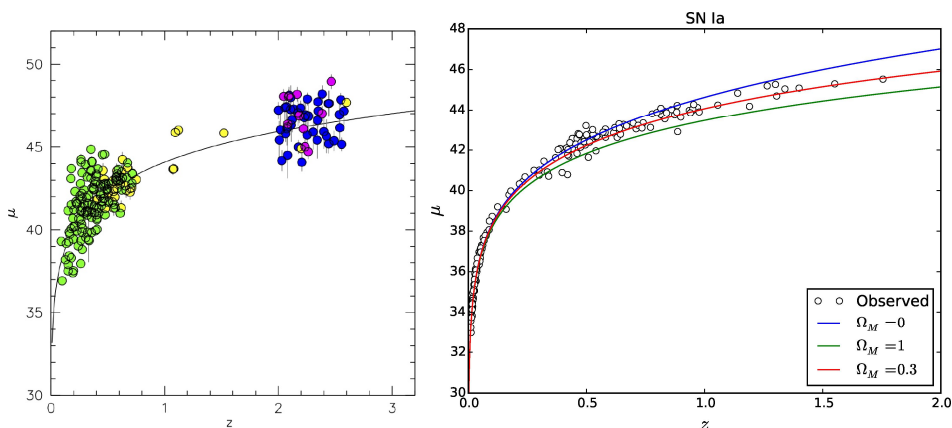
**Слика 7:** Поређење наших и LIGO резултата за Комптонову таласну дужину гравитона, чија маса (у енергетским јединицама) је дата помоћу:  $m_g = hc/\lambda_g$ .

## 2. Барионска Тали-ФишEROVA релација (БТФР) код спиралних и фундаментална раван (ФР) код елиптичних галаксија

Интензиван развој теорије модификоване гравитације мотивисан је немогућношћу стандардне теорије гравитације (тј. ОТО) да без додатне хипотезе о тамној материји (чије постојање још увек није експериментално потврђено) објасни неке појаве на вангалактичким и космолошким скалама као што су: равне ротационе криве спиралних галаксија, њихова барионска Тали-ФишEROVA релација, као и слична емпиријска релација у случају елиптичних галаксија познатија под називом фундаментална раван (ФР). У оквиру нашег пројекта испитивали смо могућност неких теорија модификоване гравитације да објасне поменуте посматране феномене без хипотезе о тамној материји, што је илустровано на слици 8. Као што се може видети, ове теорије у потпуности могу да објасне наведене појаве у случају како елиптичних тако и спиралних галаксија, и на тај начин представљају валидну алтернативу тамној материји. Поред тога, добијени резултати су нам



**Слика 8:** Најбољи фитови БТФР (лево) и ФР (десно) помоћу  $R^n$  гравитације. (S. Carozziello, D. Borka, V. Borka Jovanović, P. Jovanović, *Galaxies* 6, 22 (2018)).



**Слика 9:** Лево: Хаблов дијаграм модула растојања  $\mu$  у зависности од црвеног помака  $z$ , код квазара (P. Marziani, E. Bon, N. Bon et al., *Atoms* 7, 18 (2019)). Десно: зависност  $\mu$  од  $z$  и  $\Omega_M$ . (P. Jovanović (AstroMundus)).

### 3. Одређивање космолошких параметара помоћу квазара

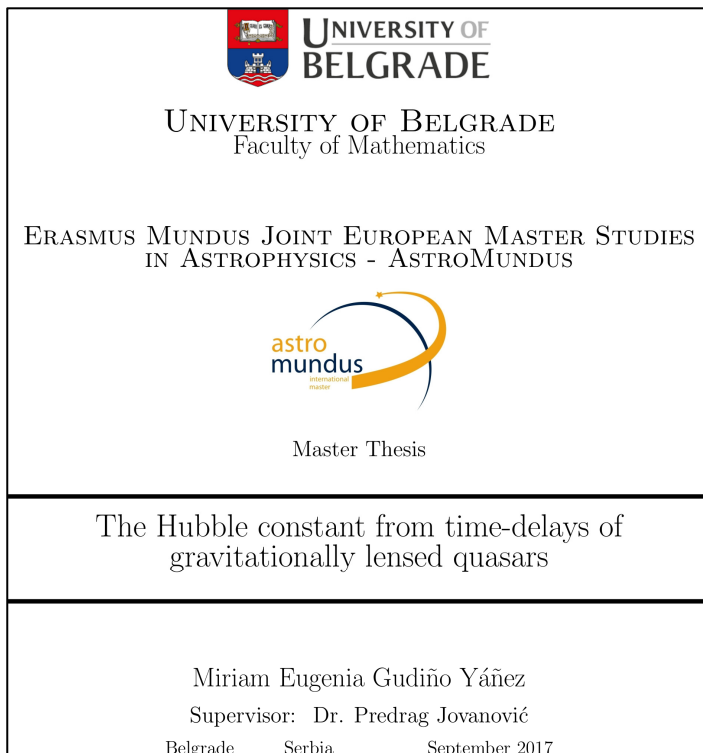
Као што је поменуто у уводном делу, значајан део истраживања у оквиру пројекта је посвећен посматрачкој космологији. У разматраном периоду покренута су потпуно нова испитивања коришћења квазара са високом стопом акреције као космолошких стандардних свећа, као што су то и супернове типа Ia (SNIa), с тим што би овакви квазари могли да се користе на много већим космолошким црвеним помацима него што је то случај код SNIa (видети поређење на слици 9). За сада су добијени само прелиминарни резултати приказани на левом панелу ове слике, а даљи рад је у току.

#### 4. Одређивање Хаблове константе из временског кашњења светлости код квазара под утицајем гравитационих сочива

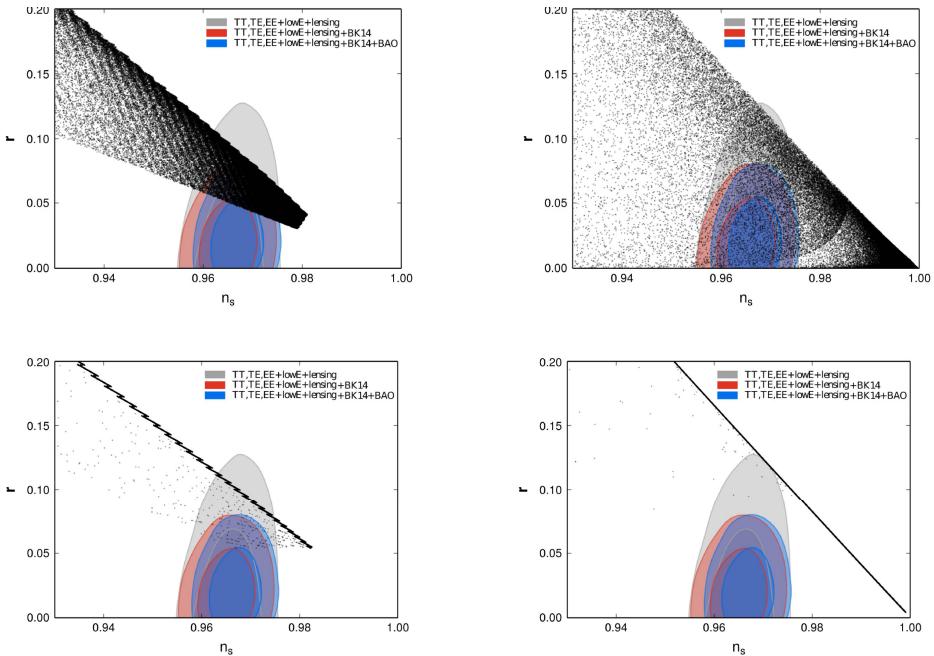
У оквиру посматрачке космологије наставили смо и са истраживањима гравитационих сочива. Имајући у виду да се у свету интензивно ради на усавршавању технике коришћења гравитационих сочива за прецизно одређивање Хаблове константе, ми смо започели рад на овој теми. Један од резултата је и одбрањена мастер теза Миријам Гудињо из Мексика, (насловна страна приказана на слици 10) студента у оквиру Астромундус програма, на тему одређивања Хаблове константе из временског кашњења светлости код квазара под утицајем гравитационих сочива. У оквиру ове тезе, из посматраних временских кашњења светлости на узорку гравитационих сочива и коришћењем неколико теоријских модела за расподелу масе у сочивима, добијене су процене за Хаблову константу које су у складу са најновијим вредностима које је објавила *Planck* колаборација. Уз то, закључено је да су за даље унапређивање процене Хаблове константе потребна нова прецизнија мерења кашњења светлости.

#### 5. Одређивање посматрачких параметара стандардне и тахионске космолошке инфлације

Као што је већ поменуто, у току 2018. године пројекту се прикључио студент докторских студија Марко Стојановић, чија је област интересовања космолошка инфлација. Због тога је рад на пројекту проширен и на изучавање ове краткотрајне фазе након Великог праска током које се свемир убрзано и експоненцијално ширио. Ова истраживања обухватају како теоријска разматрања у оквиру стандардног космолошког модела, тако и разматрања могуће улоге тахионских поља у еволуцији раног свемира, при чему се под тахионима подразумевају честице (кванти поља) имагинарне масе. У склопу ових истраживања израчунате су вредности параметара у тзв. режиму спорог котрљања и упоређене са одговарајућим ограничењима које је из разматрања космичког микроталасног позадинског зрачења добила и објавила *Planck* колаборација (видети слику 11). Оваква поређења теоријских предвиђања различитих модела инфлације са расположивим посматрањима нам пружају дубљи увид у ову рану епоху у еволуцији космоса.



**Слика 10:** Пример једне мастер тезе, урађене у оквиру пројекта и Астромундус програма, која је одбрањена на Универзитету у Београду.



**Слика 11:** Поређења нумерички израчунатих вредности космолошких параметара инфлације у стандардној (горе лево) и у Рандал-Сундрум космологији (горе десно) са различитим посматрачким ограничењима добијеним од стране *Planck* колаборације. (М. Milošević, N. Bilić, D. D. Dimitrijević, G. S. Djordjević, M. Stojanović, AIP Conf. Proc. 2075, 090009 (2019)).

## 5. ЕВРОПСКИ ПРОЈЕКТИ И МАСТЕР ТЕЗЕ

Истраживачи на пројекту 176003 су били ментори мастер теза неколико страних студената који су боравили у Србији у циљу израде својих мастер теза:

- MSc. Miika Pursiainen (Финска), 2017:  
*"The shape of the broad iron  $K\alpha$  line and the effect on the accretion disc parameters"* (*AstroMundus*);
- MSc. Miriam Gudino (Мексико), 2017:  
*"The Hubble constant from time delays of gravitationally lensed quasars"* (*AstroMundus*);
- MSc. Stefania Gravina (Италија), 2017:  
*"The Galactic Center as a gravitational laboratory"* (*ERASMUS+ KA1*);
- MSc. Anna D'Addio (Италија), 2017: *"Test of gravitational theories by Sgr A\*" (ERASMUS+ KA1).*

Учесници пројекта такође су били ангажовани на више европских пројеката:

- Астромундус програм заједничких мастер студија (Универзитети у Аустрији, Италији, Немачкој и Србији)
- *ERASMUS* програм мобилности
- Билатерални пројекат између Италије и Србије: билатерални програм бр. 451-03-01231/2015-09/1 *"Тестирање проширених теорија гравитације на различитим астрофизичким скалама"*
- *COST* акције:
  - *MP1304: "Exploring fundamental physics with compact stars" (NewCompStar),*
  - *CA15117: "Cosmology and Astrophysics Network for Theoretical Advances and Training Actions" (CANTATA),*
  - *CA16104: "Gravitational waves, black holes and fundamental physics" (GWverse).*

## 6. ОСТВАРЕНИ ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА

Основни научни циљ пројекта 176003 је истраживање следећих вангалактичких и космолошких гравитационих појава: супермасивних црних рупа у центрима галаксија и квазара, двојних супермасивних црних рупа у галаксијама у судару, гравитационих сочива, тамне материје и њених потенцијалних алтернатива у облику теорија модификоване гравитације. Поред научних циљева, пројекат има такође за циљ да буде основа за образовање младих научника као и за међународну сарадњу у овој области.

Од планираних активности у 2017. остварени су следећи резултати:

(1) Настављена су истраживања са циљем да се објасни посматрана галактичка и вангалактичка динамика коришћењем гравитационих потенцијала изведених из проширених теорија гравитације, без узимања у обзир утицаја тамне материје. Проширене теорије гравитације могу имати посматрачке ефекте на астрономским и космолошким скалама, тако да смо наставили тестирање више теорија модификоване гравитације ( $R^n$ , Yukawa, Sanders-ова, хибридна, скалар-тензор гравитација) помоћу астрономских посматрања кретања S-звезда око супермасивне црне рупе у центру наше галаксије, као и помоћу посматрања појава на вангалактичким скалама, као што су фундаментална равна елиптичних галаксија и барионска Тали-ФишEROVA релација спиралних галаксија. Резултати из ове области представљени су на неколико домаћих и међународних конференција и семинара (предавања по позиву, кратка предавања, постер секције): Annual NewCompStar Conference 2017, Warsaw, Poland; Развој астрономије код Срба IX, Београд, Србија; XI Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Šabac, Serbia; Cosmology and the Quantum Vacuum, Segovia, Spain;

Workshop on Testing Fundamental Physics Principles, Corfu, Greece; Serbian-Italian Astronomical Workshop, Belgrade, Serbia; XVIII Serbian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia. Објављен је и један рад у врхунском часопису међународног значаја (M21): S. Capozziello, P. Jovanović, V. Borica Jovanović, D. Borica, *Addressing the missing matter problem in galaxies through a new fundamental gravitational radius*, J. Cosmol. Astropart. P. 6, 044-1-17 (2017), као и рад у водећем часопису националног значаја (M51): A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borica, V. Borica Jovanović, *Graviton mass evaluation with trajectories of bright stars at the Galactic Center*, J. Phys.: Conf. Ser. 798, 012081-1-5 (2017) и рад у научном часопису (M53) A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borica, V. Borica Jovanović, *Graviton mass bounds from an analysis of bright star trajectories at the Galactic Center*, EPJ Web Conf. 138, 01010-1-10 (2017).

(2) Настављена су изучавања структуре и расподеле материје на великим скалама, као и њеног зрачења у различитим спектралним областима, а у том циљу су испитивани радио емисија и поларизација галактичких остатака супернових. Из ове области објављен је рад у истакнутом часопису међународног значаја (M22): V. Borica Jovanović, P. Jovanović, D. Borica, *SNR radio spectral index distribution and its correlation with polarization. A case study: the Lupus Loop*, Rev. Mex. AA 53, 37-44 (2017).

(3) Настављена су истраживања ефеката јаког гравитационог поља у близини супермасивних црних рупа у језгрима активних галаксија и квазара, њихове активности и зрачења из њихових релативистичких акреционих дискова, а добијени резултати су објављени у научном часопису (M53): Paola Marziani, A. del Olmo, M. Loli Martinez-Aldama, D. Dultzin, A. Negrete, E. Bon, N. Bon, M. D'Onofrio, *Quasar black hole mass estimates from high-ionization lines: breaking a taboo?*, Atoms 5, 33-1-14 (2017). Такође је изучавано и инфрацрвено зрачење емитовано из торуца прашине у језгрима активних галаксија и квазара, а резултати су објављени у два рада у врхунским часописима међународног значаја (M21): M. Stalevski, D. Asmus, K. R. W. Tristram, *Dissecting the active galactic nucleus in Circinus - I. Peculiar mid-IR morphology explained by a dusty hollow cone*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 472, 3854-3870 (2017); C. Peest, P. Camps, M. Stalevski, M. Baes, R. Siebenmorgen, *Polarization in Monte Carlo radiative transfer and dust scattering polarization signatures of spiral galaxies*, Astron. Astrophys. 601, A92-1-15 (2017).

(4) И поред веома ограничених финансијских средстава, сарадници на пројекту су учествовали на неколико научно-стручних скупова у земљи и иностранству, у оквиру којих су презентовали резултате истраживања остварене у оквиру пројекта.

(5) Сарадници на пројекту су остварили и интензивну међународну сарадњу и активно су учествовали на неколико европских пројеката, што је за последицу имало вишеструку корист у погледу трансфера знања и усавршавања и обуке младих истраживача: ERASMUS+ KA1 програм мобилности истраживача и студената (између Одељења за физику, Универзитет у Напуљу "Фредерик II" и Института за нуклеарне науке



"Винча", Универзитет у Београду), билатерални пројекат (између Италије и Србије), COST акције, AstroMundus програм заједничких мастер студија (Универзитети у Аустрији, Италији, Немачкој и Србији). У оквиру ERASMUS+ KA1 програма, две студенткиње из Италије су, под руководством сарадника на пројекту, одбраниле мастер тезе у којима су приказале резултате тестирања модификоване скалар-тензорске гравитације помоћу посматране орбите S2 звезде око центра наше галаксије. У оквиру програма AstroMundus, студенткиња из Мексика, је такође под руководством сарадника на пројекту, одбранила мастер тезу чији је главни циљ био да се из посматраних временских кашњења сигнала код квазара са вишеструким ликовима помоћу теорије гравитационих сочива одреди вредност Хаблове константе и да се добијени резултати упореде са одговарајућим вредностима које је Planck колаборација добила из посматрања космичког микроталасног позадинског зрачења. Такође, студент из Финске је у оквиру истог програма и под руководством сарадника на пројекту одбранио мастер тезу у којој је проучавао утицај јаког гравитационог поља око супермасивних црних рупа у језгрима активних галаксија на параметре и X-зрачење њихових релативистичких акреционих дискова.

(6) Као што се из горе наведеног може видети, у потпуности је остварен план за 2017. годину да добијени резултати истраживања буду презентовани на међународним и домаћим научно-стручним скуповима и објављени у зборницима са ових скупова, као и у међународним часописима.

#### Од планираних активности у 2018. остварени су следећи резултати:

(1) Користећи посматрачке ефекте на астрономским и космолошким скалама које предвиђају теорије модификоване гравитације, настављена су њихова тестирања са циљем да се објасни посматрана галактичка и вангалактичка динамика без узимања у обзир хипотезе о тамној материји. Тестирано је неколико таквих теорија ( $R^n$ , скалар-тензор, нелокална гравитација) помоћу астрономских посматрања кретања S-звезда око супермасивне црне рупе у центру наше галаксије, као и помоћу познатих емпиријских зависности на вангалактичким скалама, као што су фундаментална раван елиптичних галаксија и барионска Тали-ФишEROVA релација спиралних галаксија. У нашим досадашњим истраживањима већ смо показали да једна класа модификованих теорија гравитације (тзв.  $f(R)$  теорије), поред познатог Шварцшилдовога радијуса, предвиђају постојање и једног новог фундаменталног гравитационог радијуса који одређује динамику на галактичким скалама и може да објасни посматрану Тали-ФишEROVУ релацију у случају галаксија богатих гасом без потребе за хипотезом о тамној материји. Имајући то у виду, током 2018. године добијени су и објављени резултати који показују да тај нови теоријски фундаментални гравитациони радијус може да има суштински утицај и на фотометрију и звездану кинематику у елиптичним галаксијама, а на тај начин и да објасни међусобну зависност њихових фотометријских и кинематичких параметара у облику фундаменталне равни.

Поред тога, а за разлику од опште теорије релативности која предвиђа да се гравитони као преносиоци гравитационе интеракције крећу брзином светлости и да немају масу, неке од изучаваних теорија гравитације (нпр. Yukawa) представљају тзв. теорије масивне гравитације које предвиђају масивне гравитоне који се крећу спорије од брзине светлости. Користећи расположива астрономска посматрања, ми смо извршили тестирања и неких од таквих теорија масивне гравитације, што је као последицу имало добијање ограничења за масу и брзину гравитона, чије потенцијално одступање од предвиђања опште теорије релативности још увек није могуће потврдити или оповргнути помоћу постојећих светских експерименталних постројења. На основу претходно наведених резултата објављен је рад у врхунском часопису међународног значаја (M21): A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits III: improvement expectations for graviton mass bounds*, J. Cosmol. Astropart. P. 04, 050-1-21 (2018), затим рад у водећем часопису националног значаја (M51): S. Capozziello, D. Borka, V. Borka Jovanović, P. Jovanović, *Galactic structures from gravitational radii*, Galaxies 6, 22-1-8 (2018), два рада у часописима националног значаја (M52): A. D'Addio, S. Capozziello, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, *Testing extended theory of gravity by SgrA\**, Publ. Astron. Obs. Belgrade 98, 109-114 (2018); S. Gravina, S. Capozziello, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Stellar kinematics around Galactic Center*, Publ. Astron. Obs. Belgrade 98, 129-135 (2018), рад у научном часопису (M53): A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Different ways to estimate graviton mass*, Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 47, 1860096-1-7 (2018), као и рад у тематском зборнику националног значаја (M45): В. Борка Јовановић, Д. Борка, Л. Ч. Поповић, Н. Бон, М. Сталевски, Е. Бон, П. Јовановић, *Истраживања галактичких и вангалактичких гравитационих појава на Астрономској опсерваторији (2014-2017)*, Зборник радова конференције "Развој астрономије код Срба IX", Београд, Србија, 18. - 22. април 2017., Публ. Астр. друш. "Руђер Бошковић" 17, 145-164 (2018). Поред овог наведеног, у целини су штампана предавања по позиву са скупова међународног значаја (M31): V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, *Tests of gravity at galactic and extragalactic scales: theory vs observations*, Publ. Astron. Obs. Belgrade 98, 11-20 (2018); V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, *R<sup>n</sup> gravity as a viable alternative to dark matter: application to stellar dynamics*, Astronomical and Astrophysical Transactions 30, 351-358 (2018). Резултати из ове области представљени су такође и као предавања по позиву и кратка предавања на међународним конференцијама као што су SEENET-MTP Workshop BW2018 "Field Theory and the Early Universe", која је одржана у Нишу од 10-14. јуна 2018 и 29<sup>th</sup> Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, која је одржана од 28. августа до 1. септембра 2018. у Београду.

(2) Настављена су и истраживања посматрачких ефеката појединачних и двојних супермасивних црних рупа у центрима активних галактичких језгара, а добијени резултати су објављени у следећим радовима, у научном часопису

Frontiers in Astronomy and Space Sciences (M53): E. Bon, P. Jovanović, P. Marziani, N. Bon, A. Otašević, *Exploring possible relations between optical variability time scales and broad emission line shapes in AGN*, Front. Astron. Space Sci. 5, 19-1-8 (2018); N. Bon, E. Bon, P. Marziani, *AGN Broad Line Region variability in the context of Eigenvector 1: case of NGC 5548*, Front. Astron. Space Sci. 5, 3 (2018); P. Marziani, D. Dultzin, J. W. Sulentic, et al., *A main sequence for quasars*, Front. Astron. Space Sci. 5, 6 (2018). У оквиру ових истраживања је такође анализиран и утицај спектралне резолуције детектора X-зрачења на текућим свемирским опсерваторијама, као што су XMM-Newton и Chandra, на њихову могућност да посматрају релативистички проширене спектралне линије. Добијени резултати су објављени у међународном часопису (M23): M. Milošević, M. Pursiainen, P. Jovanović, L. Č. Popović, *The shape of Fe K $\alpha$  line emitted from relativistic accretion disc around AGN black holes*, International Journal of Modern Physics A 33, 1845016 (2018). Такође, покренута је и нова област истраживања о могућностима коришћења квазара као стандардних свећа у космологији, а први добијени резултати су објављени у врхунском часопису међународног значаја (M21): C. A. Negrete, D. Dultzin, P. Marziani, D. Esparza, J. W. Sulentic, A. delOlmo, M. L. Martínez-Aldama, A. García López, M. D'Onofrio, N. Bon, E. Bon, *Highly accreting quasars: The SDSS low-redshift catalog*, Astronomy & Astrophysics, 620, A118 (2018).

(3) И поред веома ограничених финансијских средстава, сарадници на пројекту су учествовали на неколико научно-стручних скупова у земљи и иностранству, у оквиру којих су презентовали резултате истраживања остварене у оквиру пројекта.

(4) Сарадници на пројекту су остварили и интензивну међународну сарадњу и активно су учествовали на неколико европских пројеката, што је за последицу имало вишеструку корист у погледу трансфера знања и усавршавања и обуке младих истраживача.

(5) Као што се из горе наведеног може видети, у потпуности је остварен план за 2018. годину да добијени резултати истраживања буду презентовани на међународним и домаћим научно-стручним скуповима и објављени у зборницима са ових скупова, као и у међународним часописима.

До краја 2019. г. планира се, да се поред наставка раније планираних и започетих истраживачких активности, ради и на потпуно новим теоријским и астрофизичким истраживањима гравитације и са њом повезаних вангалактичких и космолошких појава и објеката. У том циљу изучаваће се:

(1) Теорије модификоване гравитације које се заснивају на поправкама и/или проширењима опште теорије релативности и којима је циљ да, између осталог, објасне убрзано ширење свемира, формирање структура великих размера, као и неке посматране појаве на галактичким и вангалактичким скалама, али без коришћења хипотезе о тамној материји чије постојање до сада није потврђено, чак ни помоћу експеримената велике прецизности попут оних који се одвијају у CERN-у. За неке од ових теорија је већ

показано да могу успешно да фитују ротационе криве спиралних галаксија без увођења додатне тамне материје, а циљ наших истраживања ће бити да се тестирања ових теорија прошире и на друге вангалактичке и космолошке скале, користећи поређења њихових теоријских предвиђања са одговарајућим астрономским посматрањима. У том циљу, планирамо да проширимо претходна истраживања у погледу могућности неколико теорија модификоване гравитације да репродукују кинематику и динамику звезда на галактичким и вангалактичким скалама.

(2) Појединачне и двојне супермасивне црне рупе у центрима галаксија и квазара, посматрачки ефекти јаког гравитационог поља у њиховој близини, зрачење из њихових релативистичких акреционих дискова као и из осталих делова њихових галаксија-домаћина. Имајући у виду да се у свету интезивно ради на развоју будућих свемирских опсерваторија за X-зрачење (као што је Advanced Telescope for High Energy Astrophysics - ATHENA) које ће имати око 100 пута бољу спектралну резолуцију од текућих детектора, планиран је рад на добијању симулираних спектра тако високе резолуције у циљу испитивања могућности будућих свемирских мисија да у посматраним спектрима активних галаксија добију јасне и несумњиве посматрачке доказе за ефекте јаког гравитационог поља које предвиђа општа теорија релативности. Поред тога, планира се наставак текућих као и потпуно нова испитивања фактора покривености прашине и гаса у активним галактичким језгрима анализирањем њиховог инфрацрвеног и X-зрачења, као и зависности фактора покривености од фундаменталних параметара активних галактичких језгара. С тим у вези, радиће се на детаљном моделирању посматрања Circinus галаксије добијених помоћу инфрацрвеног интерферометра на VLT телескопу, имајући у виду да је током претходних истраживања за ову галаксију установљено да се прашина око њеног активног језгра налази у виду танког диска и одлива/ветра у поларном правцу.

(3) Гравитациона сочива и њихове примене за испитивање расподеле и особина видљиве и тамне материје на великим скалама, као и у оквиру самих објеката који играју улогу гравитационих сочива.

(4) Имајући у виду да су у оквиру овог пројекта у претходном периоду остварени значајни резултати из наведених области, планирано је да се они популаришу и представе широј научној заједници у оквиру предавања по позиву, као и кратких предавања на неколико домаћих и међународних научних скупова, при чему ће акценат бити на значају добијених фундаменталних сазнања о гравитационој интеракцији и њеним последицама на вангалактичким и космолошким скалама, као и могућем доприносу ових сазнања за будућа истраживања код нас и у свету. С тим у вези, а у циљу проширивања међународне сарадње везане за истраживања различитих примена квазара у космологији, сарадници на пројекту ће учествовати у организацији симпозијума "Quasars in Cosmology" на међународном скупу European Week of Astronomy and Space Science (EWASS) који ће се одржати

у Лиону (Француска) у јуну 2019. године. Осим прегледа до сада добијених резултата за које се очекује да ће бити објављени у зборницима радова са научних скупова, планирано је да ће наставак претходних као и будућа истраживања довести до нових значајних резултата који ће бити публиковани у једном раду у врхунском часопису међународног значаја (M21).

## БИБЛИОГРАФИЈА НАУЧНИХ РАДОВА САРАДНИКА ПРОЈЕКТА 176003 У ПЕРИОДУ 2017-2019

### Радови у врхунским часописима међународног значаја - M21

1. S. Capozziello, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, D. Borka, *Addressing the missing matter problem in galaxies through a new fundamental gravitational radius*, J. Cosmol. Astropart. P. 06, 044-1-17 (2017).
2. M. Stalevski, D. Asmus, K. R. W. Tristram, *Dissecting the active galactic nucleus in Circinus – I. Peculiar mid-IR morphology explained by a dusty hollow cone*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 472, 3854-3870 (2017).
3. C. Peest, P. Camps, M. Stalevski, M. Baes, R. Siebenmorgen, *Polarization in Monte Carlo radiative transfer and dust scattering polarization signatures of spiral galaxies*, Astron. Astrophys. 601, A92-1-15 (2017).
4. C. Ricci, R. J. Assef, D. Stern et al., *NuSTAR observations of WISE J1036+0449, a galaxy at  $z \sim 1$  obscured by hot dust*, Astrophys. J. 835, 105-1-15 (2017).
5. A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits III: improvement expectations for graviton mass bounds*, J. Cosmol. Astropart. P. 04, 050-1-21 (2018).
6. C. A. Negrete, D. Dultzin, P. Marziani, D. Esparza, J. W. Sulentic, A. del Olmo, M. L. Martínez-Aldama, A. García López, M. D'Onofrio, N. Bon, E. Bon, *Highly accreting quasars: The SDSS low-redshift catalog*, Astron. Astrophys., 620, A118, (2018).
7. K. F. Dialektopoulos, D. Borka, S. Capozziello, V. Borka Jovanović, P. Jovanović, *Constraining non-local gravity by S2 star orbits*, Phys. Rev. D 99, 044053-1-10 (2019).
8. M. Stalevski, K. R. W. Tristram, D. Asmus, *Dissecting the active galactic nucleus in Circinus – II. A thin dusty disc and a polar outflow on parsec scales*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 484, 3334-3355 (2019).

9. K. Ichikawa, C. Ricci, Y. Ueda et al., *BAT AGN Spectroscopic Survey. XI. The covering factor of dust and gas in Swift/BAT Active Galactic Nuclei*, *Astrophys. J.* 870, 31-1-16 (2019).
10. Y.-R. Li, J.-M. Wang, Z.-X. Zhang et al., *A possible ~20yr periodicity in long-term optical photometric and spectral variations of the nearby radio-quiet Active Galactic Nucleus Ark 120*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* 241, 33-1-14 (2019).

Радови у истакнутим часописима међународног значаја - M22

1. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, *SNR radio spectral index distribution and its correlation with polarization. A case study: the Lupus Loop*, *Rev. Mex. AA* 53, 37-44 (2017).
2. M. Milošević, M. Pursiainen, P. Jovanović, L. Č. Popović, *The shape of Fe K $\alpha$  line emitted from relativistic accretion disc around AGN black holes*, *Int. J. Mod. Phys. A* 33, 1845016 (2018).
3. D. D. Dimitrijević, N. Bilić, G. S. Djordjević, M. Milošević, M. Stojanović, *Tachyon scalar field in a braneworld cosmology*, *Int. J. Mod. Phys. A* 33, 1845017 (2018).

Предавања по позиву са међународних скупова штампана у целини - M31

1. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, *Tests of gravity at galactic and extragalactic scales: theory vs observations*, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* 98, 11-20 (2018).
2. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, *R<sup>n</sup> gravity as a viable alternative to dark matter: application to stellar dynamics*, *Astronomical and Astrophysical Transactions* 30, 351-358 (2018).
3. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, *Fundamental plane of elliptical galaxies in f(R) gravity: the role of luminosity*, *Atoms* 7, 4-1-9 (2019).
4. E. Bon, P. Marziani, P. Jovanović, N. Bon, *On the time scales of optical variability of AGN and the shape of their optical emission line profiles*, *Atoms* 7, 26-1-13 (2019).
5. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, S. Gravina, A. D'Addio, *Constraining Scalar-Tensor gravity models by S2 star orbits around the Galactic Center*, *Facta Universitatis: Series Phys. Chem. Tech.* 17, у штампи (2019).

**Предавања по позиву са међународних скупова штампана у изводима - M32**

1. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, *Tests of gravity at galactic and extragalactic scales: theory vs observations*, Book of abstracts of the XVIII Serbian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia, October 17-21, p. 15 (2017).
2. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, S. Gravina, A. D'Addio, *Constraining Scalar-Tensor gravity models by S2 star orbits around the Galactic Center*, The Book of Short Contributions and Extended Abstracts of the Balkan School and Workshop 2018, Niš, Serbia, June 3-14, p. 22-23 (2018).
3. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, *Fundamental plane of elliptical galaxies in  $f(R)$  gravity: the role of luminosity*, Contributed papers and abstracts of the 29<sup>th</sup> Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Belgrade, Serbia, August 28 - September 1, p. 268 (2018).
4. E. Bon, P. Marziani, P. Jovanović, N. Bon, A. Otašević, *On the time scales of optical variability of AGN and the shape of their optical emission line profiles*, Contributed papers and abstracts of the 29<sup>th</sup> Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Belgrade, Serbia, August 28 - September 1, p. 273 (2018).

**Радови на скуповима међународног значаја штампани у целини - M33**

1. A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Different ways for graviton mass evaluations*, Proceedings of the 52<sup>nd</sup> Rencontres de Moriond (Gravitation Session), La Thuile, Italy, March 25 - April 1, p. 247-250 (2017).

**Радови на скуповима међународног значаја штампани у изводима - M34**

1. D. Borka, V. Borka Jovanović, P. Jovanović, S. Capozziello, A. F. Zakharov,  *$f(R)$  gravity: application to stellar dynamics and to fundamental plane of elliptical galaxies*, Book of Abstracts of the Annual NewCompStar Conference 2017, Warsaw, Poland, March 27 - 31, p. 4-5 (2017).
2. V. Borka Jovanović, P. Jovanović, D. Borka and S. Capozziello, *Solving the missing matter problem at galactic scales through a new fundamental gravitational radius*, Book of abstracts of the XI Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Šabac, Serbia, August 21-25, p. 63 (2017).

3. A. D'Addio, S. Capozziello, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, *Testing extended theory of gravity by SgrA\**, Book of abstracts of the XVIII Serbian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia, October 17-21, p. 34 (2017).
4. S. Gravina, S. Capozziello, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Stellar kinematics around Galactic Center*, Book of abstracts of the XVIII Serbian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia, October 17-21, p. 40 (2017).
5. A. F. Zakharov, D. Borka, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, *Expectations for graviton mass constraint improvements with future observations of apocenter shifts for bright stars at the Galactic Center*, Book of abstracts of the 42<sup>nd</sup> Committee on Space Research, Pasadena, USA, July 14-22, p. H0.2-14-18 (2018).
6. P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Constraining Yukawa gravity from planetary motion in the Solar System*, Book of abstracts of the Europlanet Workshop: Integrations of satellite and ground-based observations and multi-disciplinarity in research and prediction of different types of hazards in Solar system, Petnica Science Center, Valjevo, Serbia, May 10-13, p. 45-46 (2019).
7. P. Jovanović, V. Borka Jovanović, D. Borka, L. Č. Popović, *Possible observational signatures of supermassive black hole binaries in their Fe K $\alpha$  line profiles*, Book of abstracts of the XII Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Vrdnik, Serbia, June 3-7, p. 24 (2019).

#### **Радови у тематским зборницима националног значаја - M45**

1. В. Борка Јовановић, Д. Борка, Л. Ч. Поповић, Н. Бон, М. Сталевски, Е. Бон, П. Јовановић, *Истраживања галактичких и вангалактичких гравитационих појава на Астрономској опсерваторији (2014-2017)*, Зборник радова конференције "Развој астрономије код Срба IX", Београд, Србија, 18. - 22. април 2017., Публ. Астр. друш. "Руђер Бошковић" 17, 145-164 (2018).

#### **Радови у водећим часописима националног значаја - M51**

1. A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Graviton mass evaluation with trajectories of bright stars at the Galactic Center*, J. Phys.: Conf. Ser. 798, 012081-1-5 (2017).
2. S. Capozziello, D. Borka, V. Borka Jovanović, P. Jovanović, *Galactic structures from gravitational radii*, Galaxies 6, 22-1-8 (2018).
3. E. Bon, P. Jovanović, P. Marziani, N. Bon, A. Otašević, *Exploring possible relations between optical variability time scales and broad emission line shapes in AGN*, Front. Astron. Space Sci. 5, 19-1-8 (2018).



4. N. Bon, E. Bon, P. Marziani, *AGN Broad Line Region variability in the context of Eigenvector 1: case of NGC 5548*, Front. Astron. Space Sci. 5, 3 (2018).
5. P. Marziani, D. Dultzin, J. W. Sulentic, et al., *A main sequence for quasars*, Front. Astron. Space Sci. 5, 6 (2018).
6. P. Marziani, E. Bon, N. Bon, A. del Olmo, M. L. Martinez-Aldama, M. D'Onofrio, D. Dultzin, C. A. Negrete, G. M. Stirpe, *Quasars: from the physics of line formation to cosmology*, Atoms 7, 18-1-13 (2019).

### **Радови у часописима националног значаја - M52**

- M. Dimitrijević, L. Popović, Z. Simić, P. Jovanović, D. Jevremović, *Activities of the Group for astrophysical spectroscopy 2011-2014*, Publ. Astron. Obs. Belgrade 96, 167 - 174 (2017).
2. D. Borka, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, S. Capozziello, *Constraints on  $f(r, \varphi)$  (Sanders-like) gravity potential from orbit of S2 star*, Publ. Astron. Obs. Belgrade 96, 205-210 (2017).
  3. V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Distribution of radio spectral index over the Lupus loop*, Publ. Astron. Obs. Belgrade 96, 211-215 (2017).
  4. A. D'Addio, S. Capozziello, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, *Testing extended theory of gravity by SgrA\**, Publ. Astron. Obs. Belgrade 98, 109-114 (2018).
  5. S. Gravina, S. Capozziello, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Stellar kinematics around Galactic Center*, Publ. Astron. Obs. Belgrade 98, 129-135 (2018).

### **Радови у научним часописима - M53**

1. A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Graviton mass bounds from an analysis of bright star trajectories at the Galactic Center*, EPJ Web Conf. 138 , 01010-1-10 (2017).
2. A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Different ways to estimate graviton mass*, Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 47, 1860096-1-7 (2018).
3. S. R. Ignjatović, V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Hyperfine interactions of constituent quarks and the mass spectrum of tetraquark states*, AIP Conference Proceedings 2075, 080004-1-6 (2019).

4. M. Milošević, N. Bilić, D. D. Dimitrijević, G. S. Djordjević, M. Stojanović, *Numerical calculation of hubble hierarchy parameters and observational parameters of inflation*, AIP Conf. Proc. 2075, 090009 (2019).

5. A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borika, V. Borika Jovanović, *Improvement perspectives for graviton mass bounds from an analysis of bright star orbits near the Galactic Center*, Proceedings IAU Symposium 347, у штампи (2019).

**Предавања по позиву са скупова националног значаја штампана у изводима - М62**

1. D. Ilić, L. Popović, E. Bon, N. Bon, P. Jovanović, A. Kovačević, J. Kovačević Dojčinović, M. Lakićević, S. Marčeta Mandić, Đ. Savić, S. Simić, M. Stalevski, *Spectroscopy and spectropolarimetry of AGNs: from observations to modelling*, Book of abstracts of the XVIII Serbian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia, October 17 - 21, p. 16 (2017).

**Захвалница**

Овај рад је урађен у оквиру пројекта 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама", финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

**INVESTIGATION OF GALACTIC AND EXTRAGALACTIC GRAVITATIONAL PHENOMENA AT THE ASTRONOMICAL OBSERVATORY (2017-2019)**

In this paper we present the primary scientific objectives of the project 176003 "Gravitation and the large scale structure of the Universe", as well as the research team of the project, and we describe realized scientific aims. The project is proposed in the frame of fundamental research programme for 2011-2019 period and is supported by Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

**Key words:** Space structure, gravity, supermassive black holes, gravitational lenses, dark matter, cosmology