

## ИСТРАЖИВАЊА ГАЛАКТИЧКИХ И ВАНГАЛАКТИЧКИХ ГРАВИТАЦИОНИХ ПОЈАВА НА АСТРОНОМСКОЈ ОПСЕРВАТОРИЈИ (2019-2023)

ПРЕДРАГ ЈОВАНОВИЋ<sup>1,\*</sup>, ВЕСНА БОРКА ЈОВАНОВИЋ<sup>1</sup> и  
ДУШКО БОРКА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Астрономска опсерваторија, Волгина 7, п.фах 74, 11060 Београд, Србија

<sup>2</sup>Лабораторија за теоријску физику и физику кондензоване материје (020),  
Институт за нуклеарне науке "Винча"-Институт од националног значаја за  
Републику Србију, Универзитет у Београду, п.фах 522, 11001 Београд,  
Србија

\*E-mail: [pjovanovic@aob.rs](mailto:pjovanovic@aob.rs)

**Резиме:** Циљ овог рада је да опишемо научна истраживања и резултате добијене на Астрономској опсерваторији у Београду у вези галактичких и вангалактичких гравитационих појава. Такође је представљен истраживачки тим са Астрономске опсерваторије, као и њихови сарадници из Института за нуклеарне науке "Винча". Током датог периода, од 2019. до 2023. године, истраживања су прво била финансирана од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја (2019-2022), а затим од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (2023).

**Кључне речи:** Општа теорија релативности, теорије модификоване гравитације, црне рупе, посматране и симулиране орбите звезда, ротационе криве спиралних галаксија, фундаментална раван елиптичних галаксија, космолошки модели

### 1. УВОД

Истраживања у вези галактичких и вангалактичких гравитационих појава на Астрономској опсерваторији, у периоду од 2019. до 2023. године, одвијала су се захваљујући претходно успешно реализованом националном пројекту основних истраживања ОИ 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама" (2011-2019), под руководством др Предрага Јовановића. Овај пројекат је био финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, а обухватао је

истраживања гравитационих појава на галактичким, вангалактичким и космолошким скалама, као што су: појединачне и двојне супермасивне црне рупе у центрима галаксија, гравитациона сочива, посматрачка космологија и космолошка инфлација, тамна материја и њене алтернативе у облику теорија модификоване гравитације, као и астрономска тестирања предвиђања стандардне (општа теорија релативности (ОТР)) и алтернативних теорија гравитације. Сарадници овог успешно окончаног пројекта настављају и даље да раде на темама у вези гравитационих појава, а финансирање је и даље од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, све до децембра 2022. године, када финансирање преузима Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије. На Астрономској опсерваторији је тада већ почела са радом "Група за гравитацију и космологију".

Резултати ових истраживања представљени су на више домаћих и међународних конференција (постер секције, кратка предавања, предавања по позиву, семинари), и такође су објављени радови у домаћим и међународним часописима (значајан број и квалитет радова). Библиографија објављених радова дата је на крају овог рада.

## **2. НАУЧНО-ИСТРАЖИВАЧКА ГРУПА ЗА ГРАВИТАЦИЈУ И КОСМОЛОГИЈУ**

Истраживања започета у оквиру националног пројекта ОИ 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама" (2011-2019), под руководством др Предрага Јовановића, и уз финансирање Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, даље су настављена и проширена на Астрономској опсерваторији.

Истраживања гравитације и са њом повезаних астрономских и космолошких појава и објеката, која су се у претходном периоду одвијала на Астрономској опсерваторији, резултовала су веома значајним научним резултатима. Имајући то у виду, основана је научно-истраживачка "Група за гравитацију и космологију", која је наставила и проширила постојећа научна истраживања, а ова група такође покреће и потпуно нова истраживања у поменутој области.

### **3.1. Истраживачки тим**

"Група за гравитацију и космологију" основана је на Астрономској опсерваторији, по предлогу др Предрага Јовановића (бр. 413/1 од 4. јула 2022. године) и на основу решења директора Астрономске опсерваторије (бр. 662/1 од 12. октобра 2022. године). Реализатор истраживања је Астрономска опсерваторија, а истраживаче финансира Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије. Укупан обим истраживања на

пројекту (годишње) је 48 истраживачких месеци. Руководилац је др Предраг Јовановић, научни саветник, запослен на Астрономској опсерваторији у Београду. "Група за гравитацију и космологију" окупља четири истраживача, а остварена је сарадња са истраживачима из Института за нуклеарне науке "Винча" који су основали истраживачку тему "Гравитација и астрофизика честица" са 36 истраживачких месеци годишње (видети слику 1).

Истраживачи "Групе за гравитацију и космологију":

- др **Предраг Јовановић**, научни саветник АОБ, руководиоца групе
- др **Еди Бон**, виши научни сарадник АОБ,
- др **Наташа Бон**, виши научни сарадник АОБ,
- др **Мирослава Вукчевић**, научни сарадник АОБ.

Истраживачи теме "Гравитација и астрофизика честица":

- др **Весна Борка Јовановић**, научни сарадник ИННВ, руководиоца теме
- др **Душко Борка**, научни саветник ИННВ,
- др **Ненад Лазаров**, стручни саветник ИННВ.

### 3.2. Значај остварених резултата

Истраживања приказана у овом раду су веома значајна због актуелности теме јер се ради на ефективнијој теорији гравитације која доприноси побољшању садашње теорије гравитације, а која иначе може да објасни физичке појаве без укључивања тамне материје и тамне енергије. Значај остварених резултата свакако се огледа у објављеним радовима (како у погледу броја објављених радова тако и у погледу њиховог квалитета), значајним цитатима, организовању научних скупова, као и у оствареној међународној сарадњи.

У периоду од 2019. до 2023. године, сарадници "Групе за гравитацију и космологију" објавили су двадесет пет радова у међународним часописима категорије M20, пет радова са међународних скупова M30, пет радова у националним часописима M50, седам радова са националних скупова M60, као и више саопштења са међународних скупова штампана у изводима. Такође су одржали неколико предавања по позиву, као и семинаре.

Као што се може видети из списка аутора на објављеним радовима, остварена је значајна међународна сарадња. Изградња мреже сарадника свакако омогућава размену искустава и проширивање знања.



**Слика 1:** Истраживачки тим: Предраг Јовановић, Еди Бон, Весна Борка Јовановић, Наташа Бон, Душко Борка, Мирослава Вукчевић, Ненад Лазаров.

### 3. О ИСТРАЖИВАЊИМА

У овом поглављу дајемо кратак приказ најважнијих резултата који су добијени у оквиру истраживања галактичких и вангалактичких гравитационих појава на Астрономској опсерваторији, у периоду 2019-2023.

Главни научни циљ истраживања је добијање нових фундаменталних сазнања о гравитационој интеракцији и њеним последицама на различитим астрофизичким скалама, почевши од Сунчевог система, преко галактичких, вангалактичких па све до космолошких скала. Врсте истраживања су: теоријска разматрања, нумеричке симулације и поређења теоријских резултата са астрономским посматрањима.

Истраживања групе обухватају:

- а) проверу предвиђања стандардне (општа теорија релативности) и теорија модификоване гравитације помоћу астрономских посматрања,
- б) појединачне и двојне црне рупе у центрима галаксија и квазара, као и релативистичке ефекте звезда које се крећу око њих (нпр. орбиталну прецесију и гравитациони црвени помак),
- в) гравитационе таласе (из масивних двојних система и примордијалне), као и одговарајуће електромагнетне ефекте њихових извора,
- г) гравитациона сочива и њихове примене у посматрачкој космологији и за изучавање расподеле видљиве и тамне материје у галаксијама - изворима и гравитационим сочивима,
- д) стандардни модел  $\Lambda$ CDM, као и космолошке моделе засноване на алтернативним теоријама гравитације и њихову могућност да објасне тензију у вези Хаблове константе,
- ђ) објашњење посматране галактичке и вангалактичке динамике (равне ротационе криве и барионска Тали-Фишера релација код спиралних, као и фундаментална равна код елиптичних галаксија) и посматраних аномалија у кретању планета Сунчевог система без хипотезе о тамној материји,
- е) променљивост типа активних галаксија у времену и однос између звезданих спектра галаксије домаћина и активности у језгру галаксије,
- ж) механизме убрзавања ултра-високо енергетских космичких зрака унутар наше галаксије.

### 3.1. Провера предвиђања стандардне и теорија модификоване гравитације помоћу астрономских посматрања

Стандардна теорије гравитације (тј. општа теорија релативности) не може да објасни неке појаве на галактичким, вангалактичким и космолошким скалама без додатне хипотезе о тамној материји. Зато се развијају теорије модификоване гравитације које у потпуности могу да објасне такве појаве. Један од истраживачких циљева наше групе је коришћење модификованих гравитација, посебно проширених теорија гравитације (ПТГ), да би се објаснила астрономска посматрања на различитим астрономским скалама, као и на космолошкој скали. ПТГ полазе од ОТР са циљем да превазиђу њене недостатке. Базиране су на праволинијском уопштењу Ајнштајнове теорије гравитације под претпоставком да гравитационо дејство није само линеарно по Ричијевом скалару кривине  $R$ , већ може бити било која функција од  $R$ , уопштено  $f(R)$ . Штавише, ова функција се може проширити тако да укључи поред  $R$  и скаларно поље  $\varphi$ , тј. да буде облика  $f(R, \varphi)$ , а могу бити укључени и изводи споменутих величина. Ове теорије могу имати посматрачке ефекте на астрономским и космолошким скалама. У периоду 2019-2023. наставили смо тестирање теорија модификоване гравитације (Јукавина и нелокална гравитација) помоћу астрономских посматрања кретања S-звезда око супермасивне црне рупе (СМЦР) у центру наше Галаксије и помоћу астрономских посматрања фундаменталне равни елиптичних галаксија. За поређење наших теоријских модела са астрономским подацима користили смо познате методе, као што је Бајесова вероватноћа, које се обично комбинују са тзв. МСМС анализама. Монте Карло Марковљеви ланци (МСМС - Monte Carlo Markov Chain) представљају методу за процену неког параметра од интереса помоћу генерисања случајних узорака. Уз то, МСМС анализа нуди веома конзистентан и утицајан начин за комбиновање различитих сетова података који се користе у космологији.

#### 3.1.1 Испитивање параметара Јукавине и нелокалне гравитације помоћу орбита S-звезда

У овој области наших истраживања можемо да издвојимо резултате из следећа два рада: К. 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) и P. Jovanović, V. Borka Jovanović, D. Borka, A. F. Zakharov, *Constraints on Yukawa gravity parameters from observations of bright stars*, J. Cosmol. Astropart. P. 2023, No. 03, 056-1-26 (2023).

У раду Phys. Rev. D 99, 044053-1-10 (2019) смо испитивали нелокалне теорије гравитације које су недавно привукле велику пажњу јер могу добро да опишу понашање гравитационе интеракције на космолошким скалама. Пошто је потребно да изабрана теорија гравитације буде у складу са

астрономским посматрањима на различитим скалама урадили смо испитивања ове гравитације на суб-галактичким и галактичким скалама. У апроксимацији слабог поља за нелокалну гравитацију, извршили смо поређење наших теоријских резултата са астрономским посматрањима орбита звезде S2 око галактичког центра (NTT/VLT подаци), и дали смо ограничења на параметре теорије нелокалне гравитације. Показали смо да нелокални ефекти не играју веома значајну улогу у случају орбита S2 звезде око Sgr A\*, али дају боље слагање између теорије и астрономских посматрања него кеплеровске орбите.

У раду J. Cosmol. Astropart. P. 2023, No. 03, 056-1-26 (2023) смо испитивали Јукавину гравитацију у апроксимацији слабог поља. Она предвиђа поправку Њутновог гравитационог потенцијала у облику додатног експоненцијалног члана, са два карактеристична параметра:  $\delta$  - универзална константа и  $\Lambda$  - домет интеракције. У ту сврху смо извели одговарајуће једначине кретања које користимо за симулацију звезданих орбита. Године 2020. GRAVITY колаборација је открила орбиталну прецесију S2 звезде око СМЦП у галактичком центру и показала је да је прецесија блиска предвиђању ОТР. Користећи ову чињеницу добијену посматрањем, ми смо проценили параметре Јукавине гравитације. Наш главни циљ је био проучавање утицаја јачине Јукавине интеракције, односно универзалне константе  $\delta$ , на прецесије орбита S-звезда. Анализирали смо орбите S-звезда претпостављајући различиту јачину Јукавине интеракције  $\delta$  и закључили да овај параметар има снажан утицај на домет Јукавине интеракције  $\Lambda$ . У ту сврху смо користили једначине кретања у оквиру параметризованог пост-њутновског (ППН) формализма како би израчунали симулиране орбите S-звезда у ОТР и Јукавиној гравитацији. Користили смо МСМС метод за анализу и добили смо најбоље фитоване вредности и неодређености параметара Јукавине гравитације на основу поређења са астрономским подацима за S-звезде. Такође, увели смо нови критеријум који се може користити за класификацију гравитационих система у Јукавиној гравитацији, а који зависи од величине посматраног гравитационог система.

### 3.1.2 Испитивање параметара Јукавине и нелокалне гравитације помоћу фундаменталне равни елиптичних галаксија

У овој области наших истраживања издвајамо следеће резултате: S. Capozziello, V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Constraining theories of gravity by fundamental plane of elliptical galaxies*, Phys. Dark Universe 29, 100573-1-9 (2020) и D. Borka, V. Borka Jovanović, S. Capozziello, P. Jovanović, *Velocity distribution of elliptical galaxies in the framework of Non-local Gravity model*, Adv. Space Res. 71, 1235-1244 (2023).

У овим радовима смо показали да фундаментална раван елиптичних галаксија може да се користи за добијање ограничења параметара метричких теорија гравитације на основу посматраних података. Пошто је

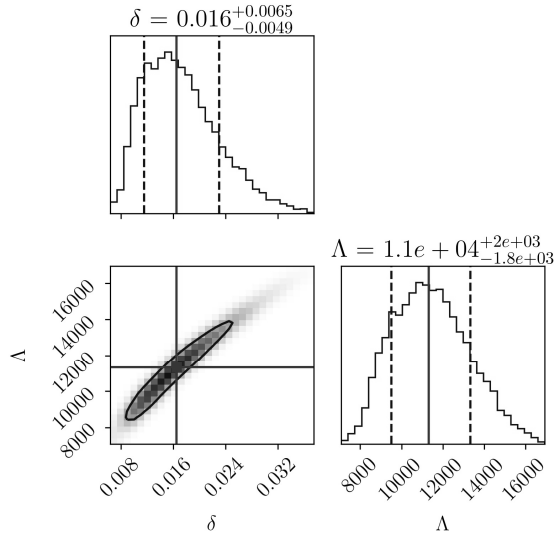
фундаментална раван повезана са глобалним својствима елиптичних галаксија, та својства можемо да доведемо у везу и са параметрима теорија модификоване гравитације. Конкретно, у раду Phys. Dark Universe 29, 100573-1-9 (2020) смо користили фундаменталну раван да дамо ограничења на теорије модификоване гравитације које садрже Јукавине корекције (параметри  $\alpha$  и  $\lambda$ ). Показали смо како се ове корекције изводе, а затим смо анализирали дисперзију брзина елиптичних галаксија тако што смо упоредили теоријске резултате добијене у оквиру теорија модификоване гравитације које имају Јукавине корекције са одговарајућим астрономским посматрањима за елиптичне галаксије.

У раду Adv. Space Res. 71, 1235-1244 (2023) смо поредили теоријска предвиђања расподеле брзина елиптичних галаксија у контексту нелокалне гравитације са одговарајућим вредностима добијеним из великог узорка посматраних елиптичних галаксија. У анализи података користили смо МСМС метод да би добили најбоље фитоване вредности и неодређености параметара нелокалне гравитације на основу поређења нашег теоријског модела за дисперзију брзина елиптичних галаксија и одговарајућих астрономских података. Као коначни резултат показали смо да нелокални ефекти гравитације могу да репродукују динамику звезда у елиптичним галаксијама и да се слажу са посматраним астрономским подацима.

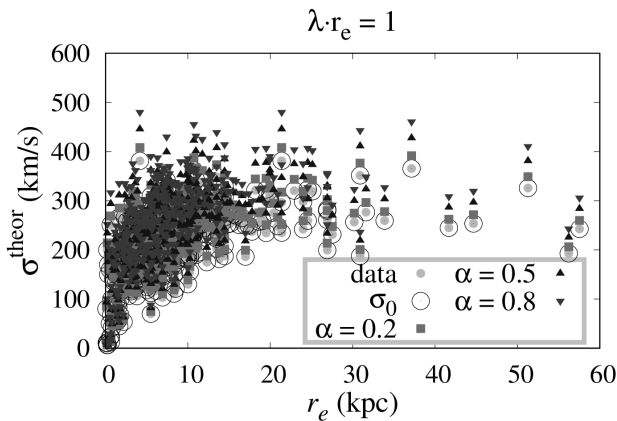
На основу ових резултата показали смо да наш предложени метод може да постави ограничења на параметре различитих модела гравитација и да одреди који се модели модификованих гравитација боље слажу са астрономским посматрањима. Закључили смо да се фундаментална раван може користити као стандардни алат за испитивање различитих теорија гравитација у лимесу слабог поља, а без потребе за увођењем тамне материје.

Пример МСМС анализе за вредности параметара Јукавине гравитације у случају S-звезда дат је на слици 2, док је на слици 3 дат један пример теоријски добијене дисперзије брзине елиптичних галаксија у функцији њиховог ефективног радијуса.





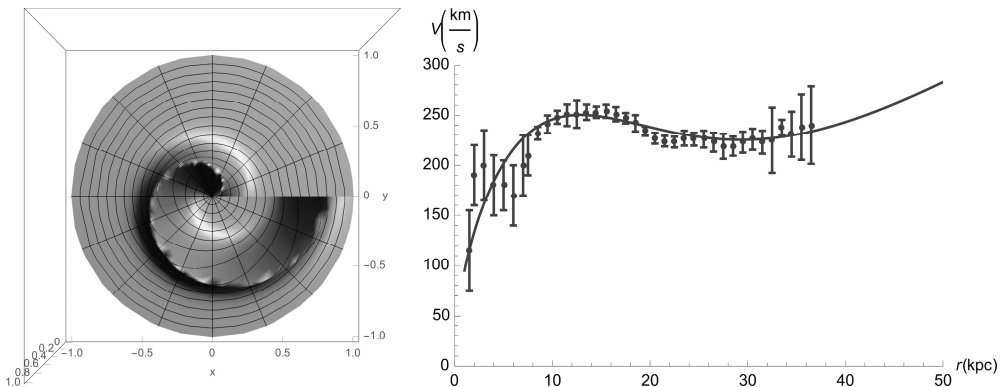
**Слика 2:** Постериорна расподела вероватноће и ниво поверења од 68% (затворена контура) за параметре Јукавине гравитације у случају S-звезда, добијени MCMC анализом.



**Слика 3:** Дисперзија брзине  $\sigma$  као функција ефективног полупречника  $r_e$ , за анализирани узорак елиптичних галаксија. Добијене вредности из посматрања су означене зеленим пуним круговима а Њутнова дисперзија брзине на ефективном полупречнику  $\sigma_0$  је означена са празним круговима. Израчунате су теоријске вредности дисперзије брзина  $\sigma^{\text{theor}}$  за неке вредности параметара  $\alpha$  и  $\lambda$  Јукавиног типа гравитације.

### 3.2. Истраживања нелинеарних ефеката у звезданом диску спиралних галаксија

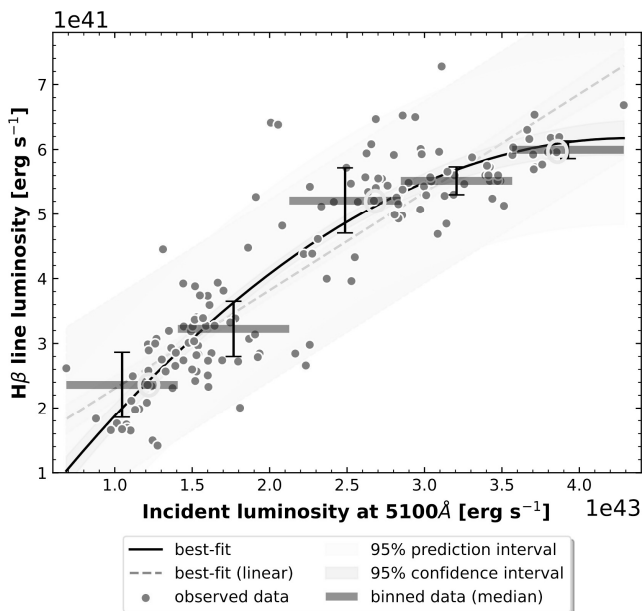
У оквиру групе се такође бавимо и могућим применама теорије нелинеарних таласа за моделовање настанка и еволуције спиралних крака у звезданим дисковима спиралних галаксија, као и за објашњење њихових равних ротационих кривих (видети слику 4). Ова истраживања се врше под претпоставком да централни овал галаксије и њен звездани диск не садрже било коју другу материју осим барионске, а уместо стандардног приступа који се заснива на моделу експоненцијалног диска за површинску густину, она се добија као решење нелинеарне Шредингерове једначине (леви панел слике 4). Фитовањем тако добијених моделованих ротационих кривих у одговарајућа посматрања (десни панел слике 4) могуће је одредити масе спиралних галаксија, што представља нови метод за одређивање њихових маса.



**Слика 4:** *Лево:* поглед од горе на талас добијен као решење нелинеарне Шредингерове једначине. *Десно:* посматрана (пуни кружићи) и моделована (пуна линија) ротациона крива галаксије М31 (Vukcevic M., 2022, *Universe*, 8, 522).

### 3.3. Истраживања променљивости активних галаксија

Сарадници у оквиру групе се такође баве и истраживањима активних галаксија и различитих појава везаних за њих. У оквиру ове области, испитује се променљивост типа активних галаксија у времену и врши се анализа односа између звезданих спектра галаксије домаћина и активности у језгру галаксије. Такође, проучава се и сатурација одзива променљивости емисионих линија и континуума емитованих из активних галактичких језгара (видети пример приказан на слици 5), а врши се и моделовање физичких услова у широколинијском региону на основу симулираних физичких параметара који одговарају посматрањима.



**Слика 5:** Међусобна зависност луминозности зрачења у континууму на  $5100 \text{ \AA}$  и у спекралној линији  $H\beta$ , емитованог из језгра активне галаксије NGC 5548 (Panda, S., Bon, E., Marziani, P., Bon, N.: 2022, *AN*, 343, e210091).

#### 4. ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Главне остварене резултате истраживања гравитационих појава на АОБ, у периоду 2019 - 2023, можемо да разврстамо на следећи начин:

- учешће на конференцијама,
- организација конференција,
- наставна активност,
- учешће на међународним пројектима,
- међународна сарадња,
- значајни цитати,
- објављени радови.

##### 4.1. Учесће на конференцијама и организација конференција

Сарадници групе су учествовали на неколико домаћих и међународних стручних скупова, где су дали значајан допринос како на основу предавања тако и у организацији конференција. Овде наводимо конференције од 2019. до 2023. године, при чему учешће у Научним и Организационим комитетима означавамо са: \*.

Поред конференција одржаних до прве половине 2023. године, наводимо и оне које су планиране за другу половину године, а у којима сарадници учествују као њихови организатори:

2019

- Развој астрономије код Срба X \*  
<http://servo.aob.rs/eeditons/CDS/Razvoj%20astronomije%20kod%20Srba/10/html/papers.html>
- Europlanet Workshop - Hazards in Solar system  
<http://www.gi.sanu.ac.rs/index.php/en/activities/conferences-organisation/998-hazards-sos>
- IV Conference on AGN and GL \*  
[http://servo.aob.rs/eeditons/CDS/Workshops/AGN\\_GL\\_4/](http://servo.aob.rs/eeditons/CDS/Workshops/AGN_GL_4/)
- 12<sup>th</sup> SCSLSA \*  
<http://www.scslsa.matf.bg.ac.rs/>

2020

- 30<sup>th</sup> SPIG \*  
<http://spig2020.ipb.ac.rs/>
- CANTATA Finale (COST Action CA15117)  
<http://tp.lc.ehu.es/cantata/>

2021

- Развој астрономије код Срба XI  
<http://elibrary.matf.bg.ac.rs/handle/123456789/5345>
- Balkan Workshop BW21  
<https://bw2021.seenet-mtp.info/>
- 2<sup>nd</sup> Conference on Nonlinearity \*  
<http://www.nonlinearity2021.matf.bg.ac.rs/>
- III Meeting on Astrophysical Spectroscopy - A&M DATA \*  
<http://asspectro2021.ipb.ac.rs/>

2022

- XXI Geometrical Seminar  
<http://poincare.matf.bg.ac.rs/~geometricalseminar/>
- BPU11 Congress \*  
<https://bpu11.info/>
- 31<sup>th</sup> SPIG \*  
<http://spig2022.ipb.ac.rs/>

2023

- 16<sup>th</sup> Photonics Workshop  
<http://www.photonicsworkshop.ipb.ac.rs/16/>
- Развој астрономије код Срба XII  
<http://servo.aob.rs/eeditons/CDS/Razvoj%20astronomije%20kod%20Srba/>
- XL Републички семинар о настави физике  
<http://www.dfs.rs/seminar2023/>

- 14<sup>th</sup> SCSSLSA \*  
<http://www.scsslsa.matf.bg.ac.rs/>
- 3<sup>rd</sup> Conference on Nonlinearity \*  
<http://www.nonlinearity2023.matf.bg.ac.rs/>
- V Meeting on Astrophysical Spectroscopy - A&M DATA \*  
<http://asspectro2023.ipb.ac.rs/>

У оквиру наведених конференција, у периоду од 2019. године до прве половине 2023. године, саопштена су следећа предавања по позиву:

- P. Jovanović, *Possible observational signatures of supermassive black hole binaries in their Fe K $\alpha$  line profiles*, 12<sup>th</sup> Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Vrdnik, Serbia, June 3-7, 2019.
- E. Bon, *Possible supermassive binary black hole signatures in some AGN*, 12<sup>th</sup> Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Vrdnik, Serbia, June 3-7, 2019.
- E. Bon, *Spectral variability of AGN: different aspects*, IV Conference on Active Galactic Nuclei and Gravitational Lensing, Banja Ždrelo, Serbia, November 12-15, 2019.
- P. Jovanović, *Graviton mass bounds from stellar orbits around the Galactic Center*, Balkan Workshop 2021, Belgrade, Serbia, September 7-10 2021.
- D. Borka, *Bounds on graviton mass from planetary motion in the Solar System*, XXI Geometrical Seminar, Belgrade, Serbia, June 26 - July 2, 2022.

Поред тога, за другу половину 2023. године планирају се следећа предавања по позиву:

- P. Jovanović, *Optical and X-ray counterpart of subparsec supermassive binary black holes*, 14<sup>th</sup> Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Bajina Bašta, Serbia, June 19-23, 2023.
- V. Borka Jovanović, *Study of radio spectral index of radio galaxy DA 240*, V Meeting on Astrophysical Spectroscopy - A&M DATA: Astronomy & Earth Observation, Palić, Serbia, September 12-15, 2023.
- D. Borka, *Constraining theories of gravity by velocity distribution of elliptical galaxies*, V Meeting on Astrophysical Spectroscopy - A&M DATA: Astronomy & Earth Observation, Palić, Serbia, September 12-15, 2023.

#### 4.2. Наставна активност

Што се тиче рада у настави, у периоду између 2019. и 2023. године, др Предраг Јовановић је ангажован од стране Универзитета у Београду као предавач на следећим докторским и мастер студијама:

(i) др Предраг Јовановић је професор на докторским студијама студијског програма "Астрономија и астрофизика" на Универзитету у Београду -

Математичком факултету, за акредитациони циклус 2022-2029. године. Назив предмета је "Одабрана поглавља савремене космологије";

(ii) у оквиру MASS (*Master in Astrophysics and Space Science*) програма заједничких мастер студија између универзитета у Италији, Немачкој, Србији и Француској, др Предраг Јовановић је изабран за предавача на предмету "Гравитација и космологија", у периоду 2022-2023. Ове мастер студије су организоване током две године на следећим универзитетима:

- Универзитет у Риму "Тор Вергата" (координатор)  
<https://web.uniroma2.it/en>
- Универзитет у Београду, Србија (партнер)  
<http://www.matf.bg.ac.rs/eng/>
- Универзитет у Бремену, Немачка (партнер)  
<https://www.uni-bremen.de/en/>
- Универзитет у Ници "Азурна обала", Француска (партнер)  
<https://univ-cotedazur.eu/>

#### 4.3. Учесће на међународним пројектима и међународна сарадња

Сарадници "Групе за гравитацију и космологију" су, уз чланове истраживачке теме из ИННВ, ангажовани као представници Србије (*Management Committee Members*) у руководећем телу следећих COST акција:

- CA15117 (CANTATA: *Cosmology and Astrophysics Network for Theoretical Advances and Training Actions*), 2016-2020,
- CA15107 (MultiComp: *Multi-Functional Nano-Carbon Composite Materials Network*), 2016-2020,
- CA16104 (GWverse: *Gravitational waves, black holes and fundamental physics*), 2017-2021,
- CA21136 (CosmoVerse: *Addressing observational tensions in cosmology with systematics and fundamental physics*), 2022-2026.

Остварена је интензивна међународна сарадња са страним колегама, што је за последицу имало вишеструку корист у погледу трансфера знања и усавршавања.

#### 4.4. Значајни цитати

(i) Цитати од стране добитника Нобелове награде (19 цитата):

Сарадници П. Јовановић, Д. Борка и В. Борка Јовановић су остварили веома значајне резултате који су примећени на светском нивоу, па су их цитирали добитници Нобелове награде за физику за 2020. годину: др Рајнхард Гензел (9 цитата) и др Андреа Гез (10 цитата).

Конкретно, 9 научних радова (са укупно 19 цитата), је цитирано у 4 следећа рада нобеловаца, који су објављени у периоду од 2017. до 2020. године:

1. D. S. Chu, T. Do, A. Hees, A. Ghez et al., *Investigating the Binariness of S0-2: Implications for Its Origins and Robustness as a Probe of the Laws of Gravity around a Supermassive Black Hole*, *Astrophys. J.* 854, 12-1-10 (2018). DOI: 10.3847/1538-4357/aaa3eb.
2. GRAVITY Collaboration, A. Amorim et al., *Scalar field effects on the orbit of S2 star*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 489, 4606-4621 (2019). DOI: 10.1093/mnras/stz2300.
3. A. Hees, T. Do, A. M. Ghez et al., *Testing General Relativity with Stellar Orbits around the Supermassive Black Hole in Our Galactic Center*, *Phys. Rev. Lett.* 118, 211101-1-9 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.211101.
4. A. Hees, T. Do, B. M. Roberts, A. M. Ghez et al., *Search for a Variation of the Fine Structure Constant around the Supermassive Black Hole in Our Galactic Center*, *Phys. Rev. Lett.* 124, 081101-1-8 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.081101.

(ii) Цитат међународне колаборације за Физику честица и космологију

Резултати, објављени у раду: A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits II: bounds on graviton mass*, *J. Cosmol. Astropart. P.* 2016, No. 05, 045-1-10 (2016), уврштени су у званичну табелу са подацима изменских и Хигсових бозона (од 2019. године) коју објављује међународна колаборација за Физику честица и космологију Particle Data Group (<https://pdg.lbl.gov/>).

Ови резултати су део књиге: R. L. Workman et al. (Particle Data Group), *Review of Particle Physics*, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022, 083C01 (2022), DOI: 10.1093/ptep/ptac097. Књига је доступна и у штампаној и у PDF верзији, а цитат је на страни 1142.

([https://pdg.lbl.gov/2022/html/computer\\_read.html](https://pdg.lbl.gov/2022/html/computer_read.html))

#### 4.5. О објављеним радовима (у периоду 2019 - 2023)

Сарадници АОБ постижу запажене научне резултате који се огледају у квалитету публикованих радова и који су упоредиви са светским стандардима.

Овде дајемо преглед објављених радова М20 категорије, разврстаних по годинама:

- 2019 3 рада (2xM21 + 0xM22 + 0xM23 + 1xM24)
- 2020 6 радова (4xM21 + 0xM22 + 2xM23)
- 2021 7 радова (1xM21 + 2xM22 + 4xM23)
- 2022 4 рада (0xM21 + 2xM22 + 2xM23)
- 2023 5 радова (3xM21 + 2xM22 + 0xM23)

Укупан број М20 радова:  $10xM21 + 6xM22 + 8xM23 + 1xM24 = 25$ .

## БИБЛИОГРАФИЈА НАУЧНИХ РАДОВА САРАДНИКА "ГРУПЕ ЗА ГРАВИТАЦИЈУ И КОСМОЛОГИЈУ"

### Радови у врхунским међународним часописима - M21

1. 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).
2. V. Ganci, P. Marziani, M. D'Onofrio, A. del Olmo, E. Bon, N. Bon, C. A. Negrete, *Radio loudness along the quasar main sequence*, Astron. Astrophys. 630, A110-1-23 (2019).
3. S. Capozziello, V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Constraining theories of gravity by fundamental plane of elliptical galaxies*, Phys. Dark Universe 29, 100573-1-9 (2020).
4. N. Bon, P. Marziani, E. Bon, C. A. Negrete, D. Dultzin, A. del Olmo, M. D'Onofrio, M. L. Martinez-Aldama, *Selection of highly-accreting quasars*, Astron. Astrophys. 635, A151-1-26 (2020).
5. M. Sniegowska, B. Czerny, E. Bon, N. Bon, *Possible mechanism for multiple changing-look phenomena in active galactic nuclei*, Astron. Astrophys. 641, A167-1-10 (2020).
6. J.-M. Wang, E. Bon, *Changing-look active galactic nuclei: close binaries of supermassive black holes in action*, Astron. Astrophys. 643, L9-1-6 (2020).
7. M. Vukčević, *The Spiral Galaxies Flat Rotational Velocity Curve Explained by the Constant Group Velocity of a Nonlinear Density Wave*, Astrophys. J. 161, 118-1-5 (2021).
8. V. Borka Jovanović, D. Borka, A. Arsenić, P. Jovanović, *Spectral index distribution over radio lobes of 4C 14.11 using astrophysical data in FITS format*, Adv. Space Res. 71, 1227-1234 (2023).
9. D. Borka, V. Borka Jovanović, S. Capozziello, P. Jovanović, *Velocity distribution of elliptical galaxies in the framework of Non-local Gravity model*, Adv. Space Res. 71, 1235-1244 (2023).
10. P. Jovanović, V. Borka Jovanović, D. Borka, A. F. Zakharov, *Constraints on Yukawa gravity parameters from observations of bright stars*, J. Cosmol. Astropart. P. 2023, No. 03, 056-1-26 (2023).

### Радови у истакнутим међународним часописима - M22

1. D. Borka, V. Borka Jovanović, S. Capozziello, A. F. Zakharov, P. Jovanović, *Estimating the Parameters of Extended Gravity Theories with the Schwarzschild Precession of S2 Star*, Universe 7, 407-1-18 (2021).
2. P. Marziani, M. Berton, S. Panda, E. Bon, *Optical Singly-Ionized Iron Emission in Radio-Quiet and Relativistically Jetted Active Galactic Nuclei*, Universe 7, 484-1-23 (2021).



3. D. Borka, V. Borka Jovanović, V. N. Nikolić, N. Đ. Lazarov, P. Jovanović, *Estimating the Parameters of the Hybrid Palatini Gravity Model with the Schwarzschild Precession of S2, S38 and S55 Stars: Case of Bulk Mass Distribution*, Universe 8, 70-1-20 (2022).
4. M. Vukčević, *The Effect of a Spiral Density Wave on the Galaxy's Rotation Curve, as Applied to the Andromeda Galaxy (M31)*, Universe 8, 522-1-16 (2022).
5. D. Borka, V. Borka Jovanović, P. Jovanović, *Bounds on graviton mass and constraining Yukawa like gravitational potential from planetary motion in the Solar System*, Filomat 37, у штампи (2023).
6. N. Đ. Lazarov, V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Geodesic equations in the weak field limit of general  $f(R)$  gravity theory*, Filomat 37, у штампи (2023).

### Радови у међународним часописима - M23

1. A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Observational tests of general relativity and alternative theories of gravity with Galactic Center observations using current and future large observational facilities*, Contrib. Astron. Obs. Skalnat Pleso 50, 203-218 (2020).
2. 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*, Contrib. Astron. Obs. Skalnat Pleso 50, 219-234 (2020).
3. D. Borka, V. Borka Jovanović, *Guiding of protons through radially deformed triple-wall carbon nanotubes*, Eur. Phys. J. D 75, 50-1-9 (2021).
4. P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, A. F. Zakharov, *Influence of bulk mass distribution on orbital precession of S2 star in Yukawa gravity*, Eur. Phys. J. D 75, 145-1-7 (2021).
5. V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, S. Capozziello, *Possible effects of hybrid gravity on stellar kinematics in elliptical galaxies*, Eur. Phys. J. D 75, 149-1-6 (2021).
6. M. Vukčević, *Soliton structures in different astrophysical systems*, Eur. Phys. J. D 75, 78 (2021).
7. M. Vukčević, V. Zeković, M. Radeta, *Spiral structure of the galactic disk and its influence on the rotational velocity curve*, Astron. Nachr. 343, e210108 (2022).
8. S. Panda, E. Bon, P. Marziani, N. Bon, *Taming the derivative: Diagnostics of the continuum and H $\beta$  emission in a prototypical Population B active galaxy*, Astron. Nachr. 343, e210091 (2022).

**Рад у националном часопису међународног значаја - М24**

1. P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Constraining Yukawa gravity from planetary motion in the Solar System*, J. Geogr. Inst. "Jovan Cvijić" 69, 265-269 (2019).

**Предавања по позиву са међународних скупова штампана у целини - М31**

1. 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).
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*, Facta Universitatis: Series Phys. Chem. Tech. 17, 11-20 (2019).
3. 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).

**Предавања по позиву са међународних скупова штампана у изводима - М32**

1. E. Bon, P. Jovanović, *Spectral variability of AGN: different aspects*, Abstracts of invited lectures of the IV Conference on Active Galactic Nuclei and Gravitational Lensing, Banja Ždrelo, Serbia, November 12-15, p. 13 (2019).
2. P. Jovanović, V. Borka Jovanović, D. Borka, A. F. Zakharov, *Graviton mass bounds from stellar orbits around the Galactic Center*, The Book of Extended Abstracts of the Balkan Workshop 2021, Belgrade, Serbia, September 7-10, p. 27-28 (2021).
3. D. Borka, V. Borka Jovanović, P. Jovanović, *Bounds on graviton mass from planetary motion in the Solar System*, Book of Abstracts of the XXI Geometrical Seminar, Belgrade, Serbia, June 26 - July 2, p. 11 (2022).

**Саопштења са међународних скупова штампана у целини - М33**

1. P. Jovanović, V. Borka Jovanović, D. Borka, A. F. Zakharov, *Graviton mass and Yukawa-like nonlinear correction to the gravitational potential: constraints from stellar orbits around the Galactic Center*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Conference on Nonlinearity, Belgrade, Serbia, October 18-22, 2021, p. 232-245 (2022).

2. V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Flux densities and spectral indices of Relaxed Double radio galaxy 3C 84*, PoS BPU11, 043-1-7 (2023).

### Саопштења са међународних скупова штампана у изводима - М34

1. 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).
2. 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).
3. V. Borka Jovanović, D. Borka, S. Capozziello, P. Jovanović, *Recovering the fundamental plane of elliptical galaxies in the framework of nonlocal gravity model*, Book of Abstracts and contributed papers of the III Meeting on Astrophysical Spectroscopy - A&M DATA, Palić, Serbia, December 6-9, p. 9 (2021).
4. V. Borka Jovanović, D. Borka, A. Arsenić, P. Jovanović, *Spectral index distribution of FR I and FR II radio lobes: Case study of 4C 11.71 and 4C 14.11*, Book of Abstracts and contributed papers of the III Meeting on Astrophysical Spectroscopy - A&M DATA, Palić, Serbia, December 6-9, p. 10 (2021).
5. N. Đ. Lazarov, V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Geodesic equations in the weak field limit of general  $f(R)$  gravity theory*, Book of Abstracts of the XXI Geometrical Seminar, Belgrade, Serbia, June 26 - July 2, p. 32 (2022).
6. V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Flux densities and spectral indices of Relaxed Double radio galaxy 3C 84*, Book of Abstracts of the 11<sup>th</sup> Conference of the Balkan Physical Union, Belgrade, Serbia, August 28 - September 1, S02-AA-202, p. 47 (2022).
7. D. Cucić, Lj. Janković, N. Đ. Lazarov, V. Radovanović, D. Zečević, D. Cvijetić, A. Cucić, B. Žarkov, V. Stanoeski, *Work with motivated and gifted students in physics in RCT "Mihajlo Pupin" from Pančevo - a review of the last 15 years*, Book of Abstracts of the 11<sup>th</sup> Conference of the Balkan Physical Union, Belgrade, Serbia, August 28 - September 1, S14-PEHPP-202, p. 252 (2022).

### Радови у врхунским часописима националног значаја - М51

1. D. Borka, V. Borka Jovanović, *Channeling of protons through radial deformed double wall carbon nanotubes*, *Atoms* 7, 88-1-14 (2019).
2. 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).

### Радови у националним часописима - М53

1. D. Borka, V. Borka Jovanović, *Channeling potential through radial deformed triple wall carbon nanotubes*, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* 99, 89-92 (2020).
2. V. Borka Jovanović, D. Borka, P. Jovanović, *Kinematical properties of elliptical galaxies in Yukawa-like gravity*, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* 99, 287-290 (2020).
3. A. Arsenić, D. Borka, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, *Winged DRAGN source from Leahy's atlas: 3C 315*, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* 102, 265-268 (2022).

### Саопштења са скупова националног значаја - М63

1. П. Јовановић, Л. Ч. Поповић, Н. Бон, Е. Бон, М. Сталевски, В. Борка Јовановић, Д. Борка, М. Стојановић, *Истраживања галактичких и вангалактичких гравитационих појава на Астрономској опсерваторији (2017-2019)*, Зборник радова конференције "Развој астрономије код Срба Х", Београд, Србија, 22 - 26. април 2019., Публ. Астр. друш. "Руђер Бошковић" 19, 65-90 (2019).
2. В. Борка Јовановић, Д. Борка, П. Јовановић, *Одређивање границе масе гравитона на основу орбите звезде S2 на Астрономској опсерваторији*, Зборник радова конференције "Развој астрономије код Срба ХI", Београд, Србија, 18 - 22. април 2021., Публ. Астр. друш. "Руђер Бошковић" 22, 9-22 (2022).
3. В. Н. Николић, Н. Ђ. Лазаров, *Астероиди - небески путници*, Зборник радова конференције "Развој астрономије код Срба ХI", Београд, Србија, 18 - 22. април 2021., Публ. Астр. друш. "Руђер Бошковић" 22, 327-341 (2022).
4. Н. Ђ. Лазаров, В. Н. Николић, *Допринос Александра Фридмана теорији великог праска*, Зборник радова конференције "Развој астрономије код Срба ХI", Београд, Србија, 18 - 22. април 2021., Публ. Астр. друш. "Руђер Бошковић" 22, 369-380 (2022).
5. Н. Ђ. Лазаров, В. Н. Николић, *Допринос Жорџа Леметра теорији великог праска*, Зборник радова конференције "Развој астрономије код

- Срба XI", Београд, Србија, 18 - 22. април 2021., Публ. Астр. друш. "Руђер Бошковић" 22, 381-394 (2022).
6. Д. Чевизовић, Н. Ђ. Лазаров, *Солитони или цунами таласи*, Зборник радова конференције "XV Републички семинар о настави физике", Сокобања, Србија, 18 □ 20. мај 2023., Публ. Друш. физичара Србије - Настава физике бр. 12, 103 (2023).
  7. Д. Цуцић, Н. Ђ. Лазаров, *100 година од објављивања књиге "From Immigrant to Inventor" Михајла Пупина*, Зборник радова конференције "XV Републички семинар о настави физике", Сокобања, Србија, 18 □ 20. мај 2023., Публ. Друш. физичара Србије - Настава физике бр. 12, 221 (2023).

## Одржани семинари

### 2020

- - предавачи: др Весна Борка Јовановић и др Душко Борка,  
- наслов: *Нобелова награда за физику за 2020. годину и истраживања код нас на ту тему*,  
- семинар: "Семинар за геометрију и примене", 22. октобар 2020. године, Математички факултет, Универзитет у Београду.
- - предавач: др Предраг Јовановић,  
- наслов: *Гравитациона сочива: теоријске основе и примене*,  
- семинар: "Седми колоквијум Српске академије нелинеарних наука (САНН)", приступно предавање за чланство у САНН, 16. децембар 2020. године, Београд.

### 2021

- - предавач: др Предраг Јовановић,  
- наслов: *Посматрачка космологија и космолошки тестови*,  
- семинар: "Семинар за геометрију и примене", 8. април 2021. године, Математички факултет, Универзитет у Београду.
- - предавач: др Предраг Јовановић,  
- наслов: *Гравитација, релативност и космологија: текућа и планирана истраживања на Астрономској опсерваторији у Београду*,  
- семинар: "Научно-стручни скуп АОБ", 10. новембар 2021. године, библиотека Астрономске опсерваторије у Београду.

## Захвалница

Овај рад је финансиран од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије кроз пројекте бр. 451-03-47/2023-01/200002 и 451-03-47/2023-01/200017.

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

The aim of this paper is to describe the scientific researches and results obtained at the Astronomical Observatory Belgrade, regarding galactic and extragalactic gravitational phenomena. Besides, the research team from Astronomical Observatory is presented, as well as their coworkers from Vinča Institute of Nuclear Sciences. The researches were at first supported by Ministry of Education, Science and Technological Development (2019-2022), and then by Ministry of Science, Technological Development and Innovations of the Republic of Serbia (2023).

**Key words:** General relativity, modified gravity theories, black holes, observed and simulated stellar orbits, rotation curves of spiral galaxies, fundamental plane of elliptical galaxies, cosmological models