

## ОДРЕЂИВАЊЕ ГРАНИЦЕ МАСЕ ГРАВИТОНА НА ОСНОВУ ОРБИТЕ ЗВЕЗДЕ S2 НА АСТРОНОМСКОЈ ОПСЕРВАТОРИЈИ

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

<sup>1</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*

<sup>2</sup>*Астрономска опсерваторија, Волгина 7, п.фах 74, 11060 Београд, Србија  
\*E-mail: vborka@vinca.rs*

**Резиме:** У овом раду приказана су научна истраживања урађена на Астрономској опсерваторији у Београду, у сарадњи са Институтом за нуклеарне науке "Винча". Представљен је истраживачки тим и приказани су досадашњи остварени резултати у вези масе гравитона. Ова истраживања су финансирана од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

**Кључне речи:** Општа теорија релативности, модификована гравитација, посматране и симулиране орбите звезда, физика честица, маса гравитона

### 1. УВОД

Истраживања у вези масе гравитона започета су захваљујући оствареном националном пројекту ОИ 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама" (2011-2019), под руководством др Предрага Јовановића. Ова истраживања чине једну од тема националног пројекта, који је иначе обухватао истраживања гравитационих појава на галактичким, вангалактичким и космолошким скалама. Наведимо овде које све теме је обухватао горе поменути пројекат: 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 теми у вези масе гравитона, а финансирање је и даље од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Српски део истраживачког тима (на слици 1) чине:

- **др Предраг П. Јовановић**, научни саветник Астрономске опсерваторије у Београду (АОБ),

- **др Душко В. Борка**, научни саветник Института за нуклеарне науке "Винча" (ИННВ) и

- **др Весна В. Борка Јовановић**, научни сарадник ИННВ,  
а сарадник из иностранства је:

- **др Александар Федорович Захаров**, научни саветник Института за теоријску и експерименталну физику, Москва, Русија.



**Слика 1:** Сарадници на истраживачком пројекту, у библиотеци Астрономске опсерваторије у Београду: др Весна Борка Јовановић, др Душко Борка и др Предраг Јовановић.

Резултати истраживања у вези одређивања границе масе гравитона представљени су на више домаћих и међународних конференција (постер секције, кратка предавања, предавања по позиву, семинари), а такође су објављени и радови у домаћим и у врхунским часописима међународног значаја. У периоду од 2013. до 2021. године, сарадници Астрономске опсерваторије објавили су на ову тему пет радова у међународним часописима категорије M20 (врхунски часописи међународног значаја M21 и часописи међународног значаја M23), два рада са скупа међународног значаја M30 и пет радова у научним часописима категорије M50. Библиографија објављених радова из ове области дата је на крају рада.

## 2. ГРАВИТОН

Елементарне честице Стандардног модела чине лептони и кваркови (има их укупно 24: по шест лептона и кваркова и исто толико њихових античестица). Елементарне честице интерагују тако што међусобно размењују кванте поља интеракције тзв. калибрационе или изменске бозоне. Гравитон је изменски бозон гравитационе интеракције која делује на честице са масом. Наведимо овде неке његове карактеристике:

- унутрашњи спин (у јединицама редуковане Планкове константе  $\hbar$ ):  $\sigma = 2$  (тензорски бозон),
- наелектрисање (у јединицама елементарног наелектрисања  $e$ ):  $Q = 0$ , тј. електрично је неутралан,
- маса: ако има масу, онда је она веома мале вредности (рачунамо горњу границу).

По општој теорији релативности, гравитон не би требало да има масу јер се креће брзином светлости. Међутим, постоје и теорије "масивне" гравитације по којима се гравитон креће мало спорије од брзине светлости и због чега има неку малу масу. Једна од таквих теорија масивне гравитације је управо теорија Јукавине проширене гравитације, коју смо користили за проучавање орбита сјајних звезда типа  $S$ , и на основу чега смо истраживали ограничења масе гравитона.

## 3. СИМУЛИРАНЕ ОРБИТЕ S-ЗВЕЗДА У ЈУКАВИНОМ ГРАВИТАЦИОНОМ ПОТЕНЦИЈАЛУ

Звездано јато које орбитира око објекта у центру наше Галаксије, у оквиру једног лучног секунда, чине звезде типа  $S$ . За њих је карактеристично да су младе, масивне звезде, са великим брзинама кретања и блиским проласком поред централног објекта. Међу овим звездама типа  $S$ , звезда S2 (такође позната и као S0-2) је једна од најсјајнијих и има стабилну орбиту са

једним од најкраћих орбиталних периода (око 16 година). Због тога је најпогоднија за проучавање орбите, а на основу тога за испитивање гравитационог потенцијала у којем се креће па самим тим и за ограничење вредности параметара алтернативних теорија гравитације. Од осталих карактеристика, занимљиво је истаћи да је ово звезда главног низа спектралне класе  $B$ , и да има око 15 сунчевих маса и 7 пута већи пречник од Сунца.

### 3.1. *Sagittarius A* и *Sagittarius A\**

*Sagittarius A* (или *Sgr A*) је комплексан радио извор који се састоји од три компоненте, које се преклапају:

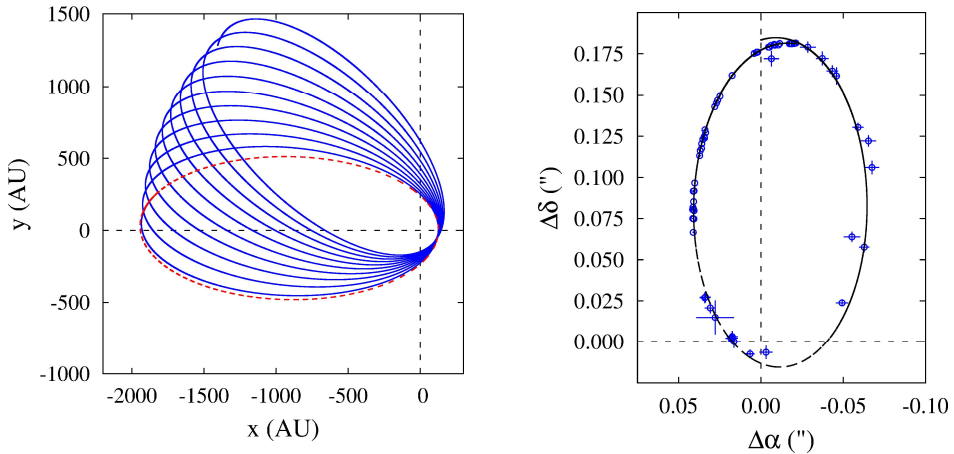
- (1) *Sgr A East*, остатак супернове,
- (2) *Sgr A West*, спирална структура, и
- (3) *Sagittarius A\** (или *Sgr A\**), веома светао радио извор у центру спиралне структуре.

*Sgr A\** је веома компактан и масиван извор, чији се положај поклапа са динамичким центром Млечног пута, а око њега кружи јато  $S$ -звезда. Управо орбите ових звезда дају најубедљивији доказ да је *Sgr A\** супермасивна црна рупа са масом од око 4 милиона Сунчевих маса. Године 2020. за откриће овог супермасивног компактнoг објекта *Sgr A\** у центру наше Галаксије, а на основу дугогодишњих посматрања орбита звезда око тог објекта, др Рајнхард Гензел и др Андреа Гез су добили Нобелову награду за физику. У нашим радовима, користили смо њихова астрономска посматрања орбите звезде  $S2$  за испитивања и тестирања неких фундаменталних својстава гравитационе интеракције, па су због значајности таквих истраживања и њихових резултата и наши радови цитирани 19 пута од стране овогодишњих нобеловаца.

### 3.2. Модификована гравитација са Јукавиним чланом

Услед немогућности стандардне теорије гравитације (ОТР) да објасни неке појаве на вангалактичким и космолошким скалама (као што су нпр. равне ротационе криве код спиралних галаксија и фундаментална равна код елиптичних галаксија) без додатне хипотезе о тамној материји, развијају се теорије модификоване гравитације које у потпуности могу да објасне наведене појаве. Једна од тих теорија модификоване гравитације (тзв. *Yukawa* гравитација) предвиђа поправку Њутновог гравитационог потенцијала у облику додатног експоненцијалног члана, са два карактеристична параметра:  $\delta$  - универзална константа и  $\lambda$  - домет интеракције (напомена: домет интеракције може да се означи и великим словом  $\Lambda$ ). Поред објашњења наведених појава, увођење оваквих поправки омогућава нам да стекнемо и дубљи увид у природу гравитационе интеракције.

Пример симулиране орбите, као и пример фитовања симулиране орбите у посматрања, видети на слици 2. На слици 2 (лево) приказане су симулиране Кеплерове орбите (црвена испрекидана линија) и орбите у Јукавиној гравитацији (плава пуна линија), за вредност параметра  $\delta = -1/3$ . Напоменимо овде да за интервал  $-1 < \delta < 0$  орбитална прецесија у Јукавиној гравитацији има негативан смер, док за  $\delta > 0$  и  $\delta < -1$  орбитална прецесија има позитиван смер као и у случају ОТР.



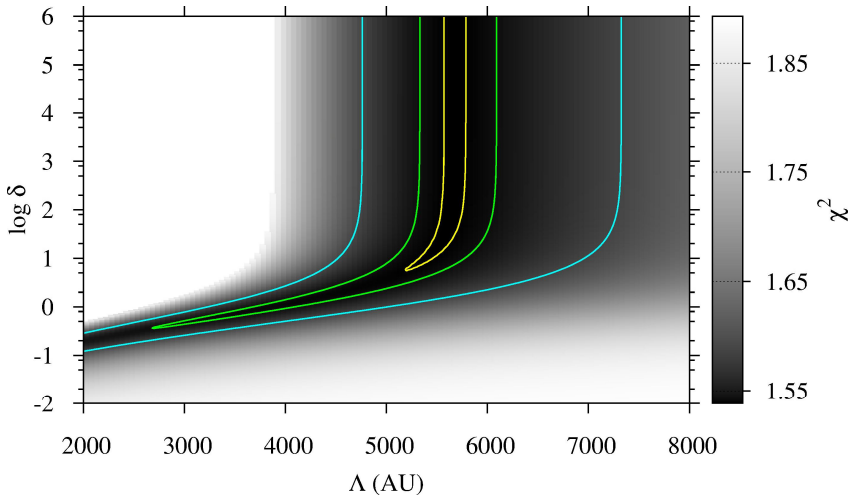
**Слика 2:** Лево: симулиране орбите S2 звезде око СМЦП у центру наше Галаксије, у гравитацији са Јукавиним чланом, у току 10 орбиталних периода. Десно: пример фитовања симулиране орбите у посматрања S2 звезде. (D. Borka, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, A. F. Zakharov, JCAP 11, 050 (2013)).

#### 4. ОГРАНИЧЕЊА МАСЕ ГРАВИТОНА ИЗ АНАЛИЗЕ ПУТАЊА СЈАЈНИХ ЗВЕЗДА У ГАЛАКТИЧКОМ ЦЕНТРУ

Користили смо поређење посматраних орбита сјајних звезда у Галактичком центру и наших теоријских прорачуна тих орбита, и на тај начин смо добили ограничење за параметре Јукавине модификоване гравитације. Затим, један од тих параметара модификоване гравитације повезујемо са Комптоновом таласном дужином гравитона. Истакнимо овде да наш метод за одређивање масе гравитона представља потпуно нов и независан метод од осталих до сада објављених.

#### 4.1. Процена домета Јукавине интеракције на основу добијених вредности $\chi$ -квадрата фитова

На слици 3 приказана је мапа редукованог  $\chi^2$  у  $\lambda$ - $\delta$  параметарском простору Јукавине гравитације. Добијена је на основу поређења резултата фитовања симулираних орбита и посматрања. Осенчене области на слици 3 представљају места где је вредност фита једнако добра или боља него у случају Кеплерових орбита. Можемо уочити 3 контуре (од споља ка унутра) које представљају област где је разлика текуће и минималне вредности  $\chi^2$  мања него 0.05, 0.005 и 0.0005. Са слике 3 се јасно види да је највероватнија вредност за параметар  $\lambda$  око 5000 - 6000 AU.



**Слика 3:** Резултат фитовања симулираних орбита и посматрања: мапа редукованог  $\chi^2$  у  $\lambda$ - $\delta$  параметарском простору Јукавине гравитације. (D. Borka, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, A. F. Zakharov, JCAP 11, 050 (2013)).

#### 4.2. Комптонова таласна дужина и маса гравитона

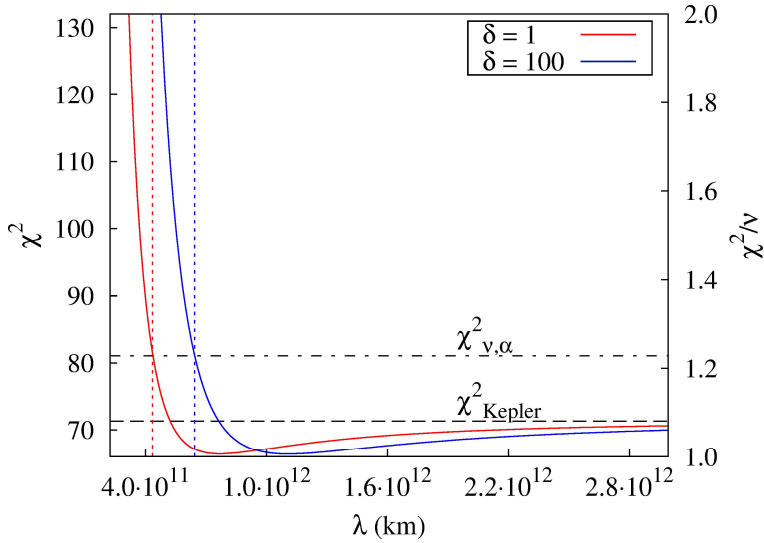
Ако се гравитација шири масивним пољем онда брзина гравитационих таласа (гравитона)  $v_g$  зависи од њихове фреквенције  $f$  преко релације:  $(v_g/c)^2 = 1 - (c/(f\lambda_g))^2$ , где је  $\lambda_g$  Комптонова таласна дужина гравитона, а његова маса је  $m_g = hc/\lambda_g$ . Користили смо астрономска посматрања и извршили поређење симулираних орбита звезде S2 у гравитационом потенцијалу Јукавине

модификоване гравитације, која представља једну од теорија масивне гравитације. На основу добијених резултата дали смо нова ограничења за параметре Јукавине гравитације. Један од тих параметара модификоване гравитације  $\lambda$  повезујемо са Комптоновом таласном дужином гравитона  $\lambda_g$ , тј. изједначавамо их, а затим на основу те вредности процењујемо горњу границу за масу гравитона.

На слици 4 приказан је  $\chi^2$  тест (тј. једна врста статистичке провере) хипотезе да је са 90%-тним нивоом значајности домет Јукавине интеракције у случају орбите звезде S2 већи од 5000 AU. Рачунате вредности  $\chi^2$  су добијене помоћу фитовања симулираних орбита у Јукавином гравитационом потенцијалу у  $n = 70$  положаја S2 звезде посматраних помоћу *NTT/VLT* телескопа. Параметар Јукавине гравитације  $\lambda$  је вариран у интервалу између 1500 и 20000 AU, при чему су претпостављене две вредности параметра  $\delta = 1$  (припада области у којој су  $\delta$  и  $\lambda$  корелисани) и  $\delta = 100$  (припада области у којој  $\delta$  и  $\lambda$  нису корелисани).

Фитовали смо укупно 4 параметра: две компоненте почетне позиције и две компоненте почетне брзине, тако да је укупан број степени слободе  $\nu = 66$ . Са слике 4 се може видети да се  $\chi^2$  за веће вредности  $\lambda$  асимптотски приближава одговарајућој вредности за Кеплеров фит која износи 71,34 (хоризонтална испрекидана линија). Осим тога,  $\chi^2$  има апсолутни минимум за  $\lambda = 5100 \pm 50 \text{ AU} \approx 7,6 \times 10^{11} \text{ km}$  у случају  $\delta = 1$ , и за  $\lambda = 7400 \pm 50 \text{ AU} \approx 1,1 \times 10^{12} \text{ km}$  у случају  $\delta = 100$ . У наредном кораку претпостављамо ниво значајности  $\alpha = 0,1$  и добијамо критичну вредност  $\chi^2_{\nu,\alpha} = 81,08$  за  $\nu = 66$  (хоризонтална цртица-тачка линија). Као што можемо уочити са слике 4, за обе криве  $\chi$ -квадрата постоји област одбацивања параметра  $\lambda$  са горњом границом  $\lambda_x$  за коју је  $\chi^2 > \chi^2_{\nu,\alpha}$ , тако да случајеви  $\lambda < \lambda_x$  могу бити одбачени са веома великом вероватноћом од  $1 - \alpha = 90\%$ . У случају  $\delta = 1$  ова горња граница има вредност  $\lambda_x = 2900 \pm 50 \text{ AU} \approx 4,3 \times 10^{11} \text{ km}$ , док у случају  $\delta = 100$  њена вредност је  $\lambda_x = 4300 \pm 50 \text{ AU} \approx 6,4 \times 10^{11} \text{ km}$ . Ове границе представљају горњу границу за Комптонову таласну дужину гравитона  $\lambda_g$ .

На горе описани начин смо са 90%-тним нивоом значајности добили да маса гравитона мора бити мања од  $2,9 \times 10^{-21} \text{ eV}/c^2$ .



**Слика 4:**  $\chi^2$  тест: статистичка провера хипотезе да је домет Јукавине интеракције који одговара Комптоновој таласној дужини гравитона  $\lambda_g = h/(c \times m_g)$  у случају орбите звезде S2 (са 90%-тним нивоом значајности) већи од 5000 AU. (A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, JCAP 05, 045 (2016)).

### 4.3. Утицај проширене масе око *Sgr A\** на домет Јукавине интеракције и масу гравитона

У околини *Sgr A\**, поред звезда у *S*-звезданом јату, вероватно постоји и додатна маса у облику међузвезданог гаса или тамне материје. Звездано јато, заједно са овом додатном масом, има утицај на орбиту S2 звезде, па уводимо гравитациони потенцијал који потиче од свих ових компоненти. Због тога смо испитивали и случај када маса у околини *Sgr A\** има неку проширену расподелу густине  $\rho_0$ , за који смо такође дали процену горње границе масе гравитона. Претпоставили смо да профил расподеле густине масе задовољава двоструки степени закон (P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, A.F. Zakharov, The European Physical Journal D 75, 145-1-7 (2021)). Израчунали смо угао прецесије за различите вредности  $\rho_0$  и користили смо услов да орбитална прецесија даје исту вредност као у случају ОТР (у случају звезде S2 орбитална прецесија је  $0^\circ.18$ ). На основу тако добијених вредности смо одређивали параметар Јукавине гравитације, односно Комптонову таласну дужину гравитона  $\lambda_g$ , из које смо затим проценили



горњу границу за масу гравитона  $m_g$  (видети табелу 1, табелу 2 и слику 5). У табели 1 приказане су вредности параметра  $\lambda$  за три вредности параметра  $\delta$  и пет вредности расподеле масене густине проширене материје  $\rho_0$ , док су у табели 2 дате процене за горњу границу масе гравитона које одговарају вредностима  $\lambda$ ,  $\delta$  и  $\rho_0$  који су приказани у табели 1. На слици 5 је приказана вредност прецесије по орбиталном периоду за звезду S2 у  $\delta - \lambda$  параметарском простору у случају Јукавиног модификованог гравитационог потенцијала са укљученом расподелом проширене масе. Белом, испрекиданом линијом, означена је вредност орбиталне прецесије у случају ОТР ( $0^\circ.18$ ). Приказан је случај када је масена густина проширене масе  $\rho_0 = 4 \times 10^8 M_{\text{sun}} \text{pc}^{-3}$ .

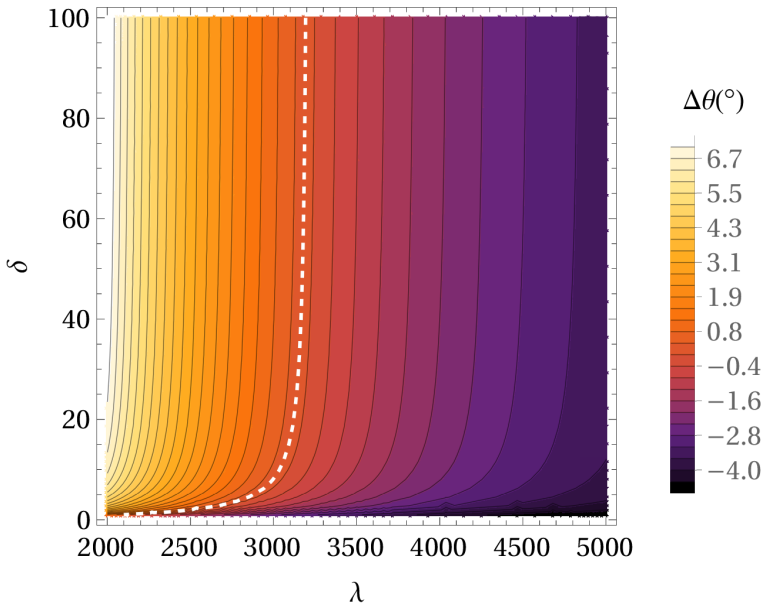
Показали смо да ако масена густина  $\rho_0$  има већу вредност, параметар Јукавине гравитације  $\lambda$  је мање вредности, а самим тим горња граница за масу гравитона има нешто већу вредност, али остаје у очекиваном интервалу вредности. Такође, показали смо да је прецесија орбите звезде S2 у Јукавином потенцијалу у истом смеру као у ОТР, а прецесија орбите звезде S2 услед утицаја проширене масе би била у супротном смеру у односу на ОТР. Због тога, када се укључи и проширена маса, тотални угао прецесије се смањује. Сматрамо да су оваква истраживања веома ефикасан начин да се израчунају гравитациони потенцијал у галактичком центру и параметри модела Јукавине гравитације, као и да се да ограничење на горњу границу масе гравитона.

**Табела 1:** Вредности параметра  $\lambda$  (у AU) за различите комбинације три вредности параметра  $\delta$  и пет вредности расподеле масене густине проширене материје  $\rho_0$ . (P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, A. F. Zakharov, Eur. Phys. J. D 75, 145 (2021))

	$\rho_0 (10^8 M_{\text{sun}} \text{pc}^{-3})$				
	0	2	4	6	8
$\delta = 1$	15125	3130	2080	1597	1302
$\delta = 10$	20395	4425	3015	2370	1978
$\delta = 100$	21285	4640	3175	2500	2090

**Табела 2:** Процене за масу гравитона ( $m_g$  у  $10^{-21}$  eV) које одговарају вредностима параметара Јукавине гравитације и расподелама масене густине који су приказани у табели 1.

	$\rho_0 (10^8 \text{ Msun pc}^{-3})$				
	0	2	4	6	8
$\delta = 1$	0,5	2,6	4,0	5,2	6,4
$\delta = 10$	0,4	1,9	2,7	3,5	4,2
$\delta = 100$	0,4	1,8	2,6	3,3	4,0



**Слика 5:** Прецесија по орбиталном периоду за звезду S2 у  $\delta - \lambda$  параметарском простору у случају Јукавиног модификованог гравитационог потенцијала са расподелом проширене масе. Масена густина проширене масе је  $\rho_0 = 2 \times 10^8 \text{ Msun pc}^{-3}$ . Параметар  $\lambda$  је изражен у AU. Белом, испрекиданом линијом је означена вредност орбиталне прецесије у ОТР чија је вредност  $0^\circ.18$ . (P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, A. F. Zakharov, Eur. Phys. J. D 75, 145 (2021)).

## 5. ЗАКЉУЧЦИ

За разлику од Опште теорије релативности, модификована гравитација са Јукавиним чланом предвиђа масивне гравитоне. Имајући то у виду, израчунали смо која би била горња граница масе гравитона из анализе путања сјајних звезда (звезде типа  $S$ ) у центру наше Галаксије. Истакнимо овде најважније закључке:

- поређење симулираних орбита  $S2$  звезде у гравитационом потенцијалу са Јукавиним чланом представља нов и независан метод за одређивање горње границе масе гравитона;
- наша процена је добијена на независан начин од осталих метода, и у оквиру је граница добијених помоћу *LIGO*-а;
- наша процена ће са великом вероватноћом моћи да буде побољшана коришћењем нових прецизнијих инструмената као што су *GRAVITY*, *E-ELT* и *TMT*;
- показали смо да масена густина расподеле проширене материје утиче на вредност угла прецесије  $S2$  звезде, као и на параметре проширене гравитације. Процене за горњу границу масе гравитона када се укључи проширена материја имају нешто већу вредност, али остају у очекиваном интервалу вредности.

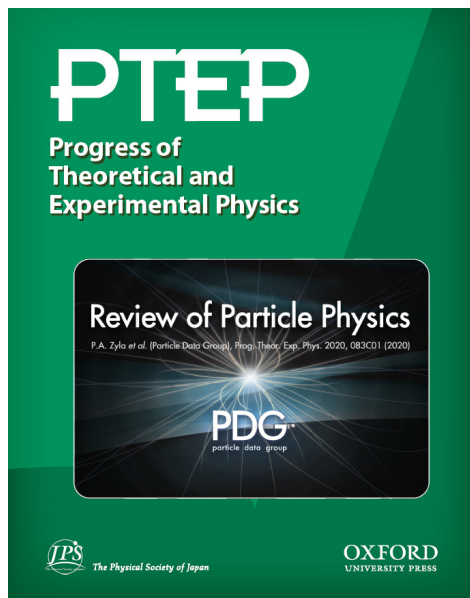
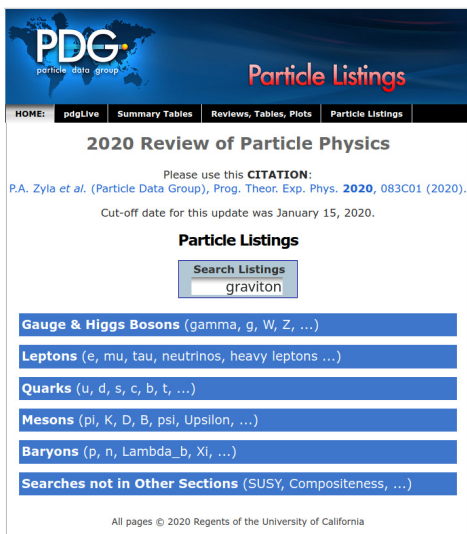
## 6. ЦИТИРАНОСТ

Наши радови, у вези масе гравитона, цитирани су од добитника Нобелове награде за физику за 2020. годину, др Андрее Гез, у раду: A. Hees, T. Do, A. M. Ghez et al., *Testing General Relativity with stellar orbits around the supermassive black hole in our Galactic Center*, Physical Review Letters 118, 211101-1-9 (2017). Конкретно, у овом раду нобеловца цитирано је 6 наших радова, а од тога у вези ограничења масе гравитона цитирана су следећа два наша рада: (1) D. Borka, P. Jovanović, V. Borka Jovanović, A. F. Zakharov, *Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits*, J. Cosmol. Astropart. Phys. 11, 050-1-16 (2013); (2) 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. Phys. 05, 045-1-10 (2016).

Такође, наши резултати су уврштени 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/>):

- **2019. године:** наш рад A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, J. Cosmol. Astropart. P. 05, 045-1-10 (2016) је цитиран у допуни за 2019. годину у следећој референци: M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) and 2019 update;

- **2020. године:** наши резултати су део књиге P. A. Zyla et al. (Particle Data Group), *Review of Particle Physics*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020), DOI: 10.1093/ptep/ptaa104 (видети слику 6). Конкретно, ограничења за масу гравитона дата су на 1014. страни. Књига је доступна и у штампаној и у PDF верзији: [https://pdg.lbl.gov/2020/html/computer\\_read.html](https://pdg.lbl.gov/2020/html/computer_read.html).



**Слика 6:** Лево: интернет верзија базе података међународне колаборације за Физику честица и космологију *PDG*. Десно: Насловна страница књиге *Review of Particle Physics* коју је објавила ова колаборација 2020. године.

## БИБЛИОГРАФИЈА НАУЧНИХ РАДОВА САРАДНИКА АСТРОНОМСКЕ ОПСЕРВАТОРИЈЕ

### Радови у врхунским часописима међународног значаја - M21

1. Borka, D., Jovanović, P., Borka Jovanović, V., Zakharov, A. F.: 2013, Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits, *J. Cosmol. Astropart.* **11**, 050 (1-16).
2. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2016, Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits II: bounds on graviton mass, *J. Cosmol. Astropart.* **05**, 045 (1-10).

3. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2018, Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits III: improvement expectations for graviton mass bounds, *J. Cosmol. Astropart.* **04**, 050 (1-21).

### **Радови у часописима међународног значаја - M23**

1. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2020, Observational tests of general relativity and alternative theories of gravity with Galactic Center observations using current and future large observational facilities, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **50**, 203-218.

2. Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V., Zakharov, A. F.: 2021, Influence of bulk mass distribution on orbital precession of S2 star in Yukawa gravity, *Eur. Phys. J. D* **75**, 145 (1-7).

### **Рад на скупу међународног значаја штампан у целини - M33**

1. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2017, 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, 247-250.

### **Рад на скупу међународног значаја штампан у изводу - M34**

1. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2018, 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.

### **Рад у водећем часопису националног значаја - M51**

1. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2017, Graviton mass evaluation with trajectories of bright stars at the Galactic Center, *J. Phys.: Conf. Ser.* **798**, 012081 (1-5).

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

1. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2016, Trajectories of bright stars at the Galactic Center as a tool to evaluate a graviton mass, *EPJ Web Conf.* **125**, 01011(1-8).

2. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2017, Graviton mass bounds from an analysis of bright star trajectories at the Galactic Center, *EPJ Web Conf.* **138**, 01010 (1-10).

3. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2018, Different ways to estimate graviton mass, *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* **47**, 1860096 (1-7).
4. Zakharov, A. F., Jovanović, P., Borka, D., Borka Jovanović, V.: 2018, Improvement perspectives for graviton mass bounds from an analysis of bright star orbits near the Galactic Center, *Proceedings IAU Symposium* **347**: *Early Science with ELTs (EASE)*.

## Семинари

1. "Семинар за геометрију и примене", 22. октобар 2020. године, Математички факултет, Универзитет у Београду  
Предавачи: Весна Борка Јовановић и Душко Борка  
Наслов предавања: *Нобелова награда за физику за 2020. годину и истраживања код нас на ту тему*
2. "Семинар за геометрију и примене", 8. април 2021. године, Математички факултет, Универзитет у Београду  
Предавач: Предраг Јовановић  
Наслов предавања: *Посматрачка космологија и космолошки тестови*

## Захвалница

Овај рад је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. П.Ј. се захваљује за финансирање овом министарству кроз уговор број 451-03-9/2021-14/200002.

## DETERMINATION OF THE BOUNDARY OF GRAVITON MASS FROM S2 STAR ORBIT AT THE ASTRONOMICAL OBSERVATORY

In this paper we present the scientific researches that have been done at the Astronomical Observatory Belgrade, in cooperation with Vinča Institute of Nuclear Sciences. The research team is represented, and also the achieved results on the graviton mass are given. These researches are supported by Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

**Key words:** General relativity, modified gravity, observed and simulated star orbits, particle physics, graviton mass