

Одређивање границе масе гравитона  
на основу орбите звезде S2  
на Астрономској опсерваторији

Весна Борка Јовановић<sup>1</sup>, Душко Борка<sup>1</sup>,  
Предраг Јовановић<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Лабораторија за теоријску физику и физику кондензоване материје  
(020), Институт за нуклеарне науке "Винча", п. фах 522, 11001  
Београд, Србија

<sup>2</sup>Астрономска опсерваторија, Волгина 7, п. фах 74, 11060 Београд,  
Србија

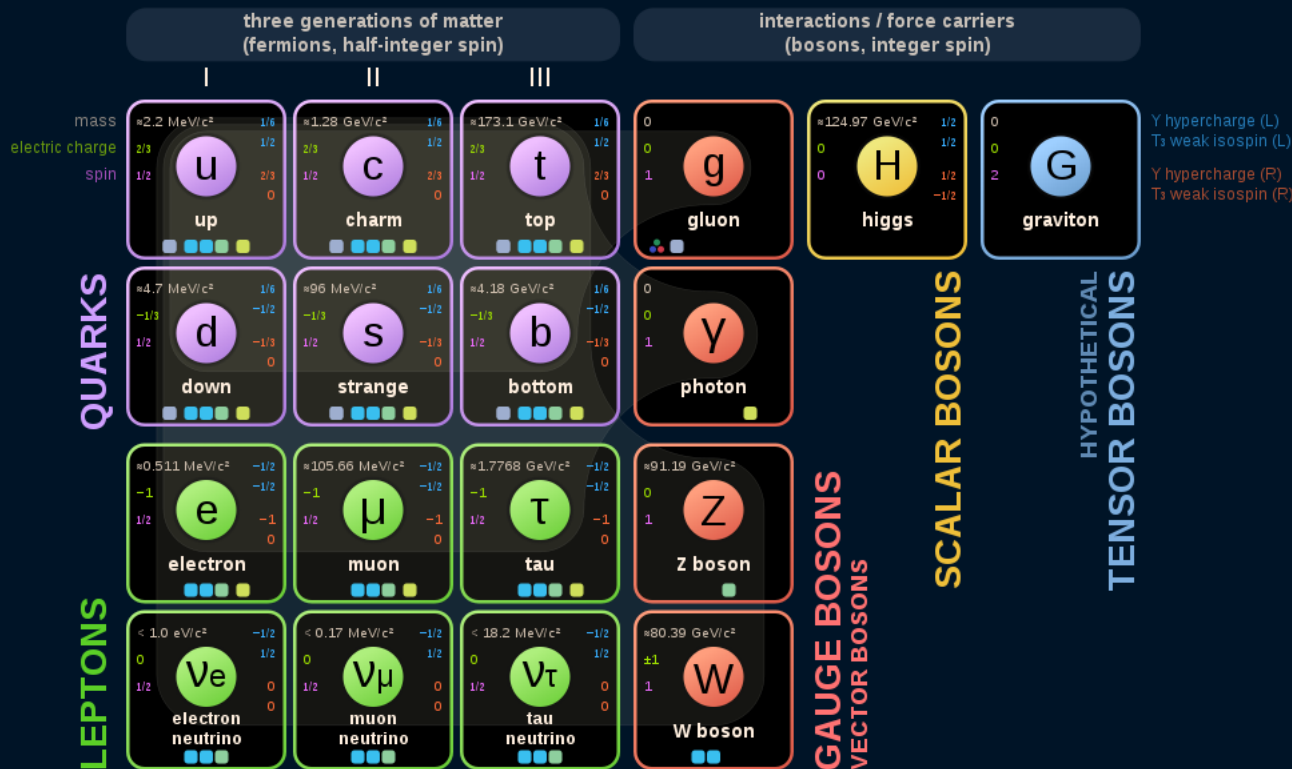
# Пројекат и истраживачки тим

- истраживања започета у оквиру националног пројекта (2011-2019): ОИ 176003 "Гравитација и структура космоса на великим скалама",
  - руководилац: др Предраг Јовановић
  - финансијер: Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије
- врсте истраживања: теоријска разматрања, нумеричке симулације и поређења теоријских резултата са астрономским посматрањима
- истраживачки тим:
  - др Предраг П. Јовановић, научни саветник АОБ,
  - др Душко В. Борка, научни саветник ИННВ,
  - др Весна В. Борка Јовановић, научни сарадник ИННВ,
    - др Александр Федорович Захаров, научни саветник, Институт за теоријску и експерименталну физику, Москва, Русија

# Гравитон

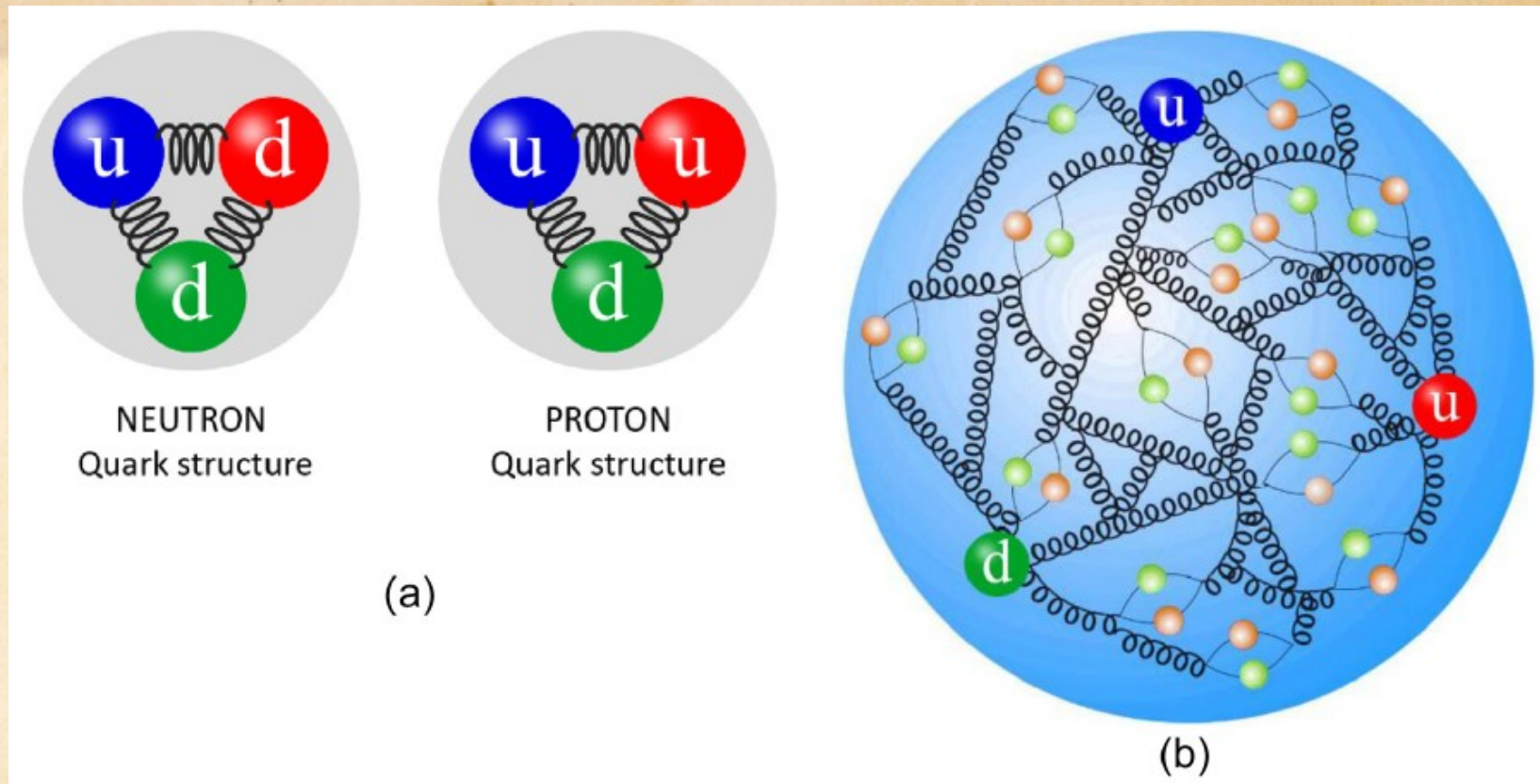
- гравитон је изменски бозон гравитационе интеракције
- карактеристике:  
спин: 2 (тензорски бозон), електрично наелектрисање: 0 (неутралан), маса: веома мала вредност (рачунамо горњу границу)

## Standard Model of Elementary Particles and Gravity



Стандардни модел елементарних честица и гравитације.

# Један од планова за будућа истраживања



(а) Структура неутрона ( $udd$ ) и протона ( $uud$ ), са занемареним квантним флукуацијама; (б) Унутрашња структура протона: поред три конститутивна кварка, шематски су приказани и виртуални кварк-антикварк парови.

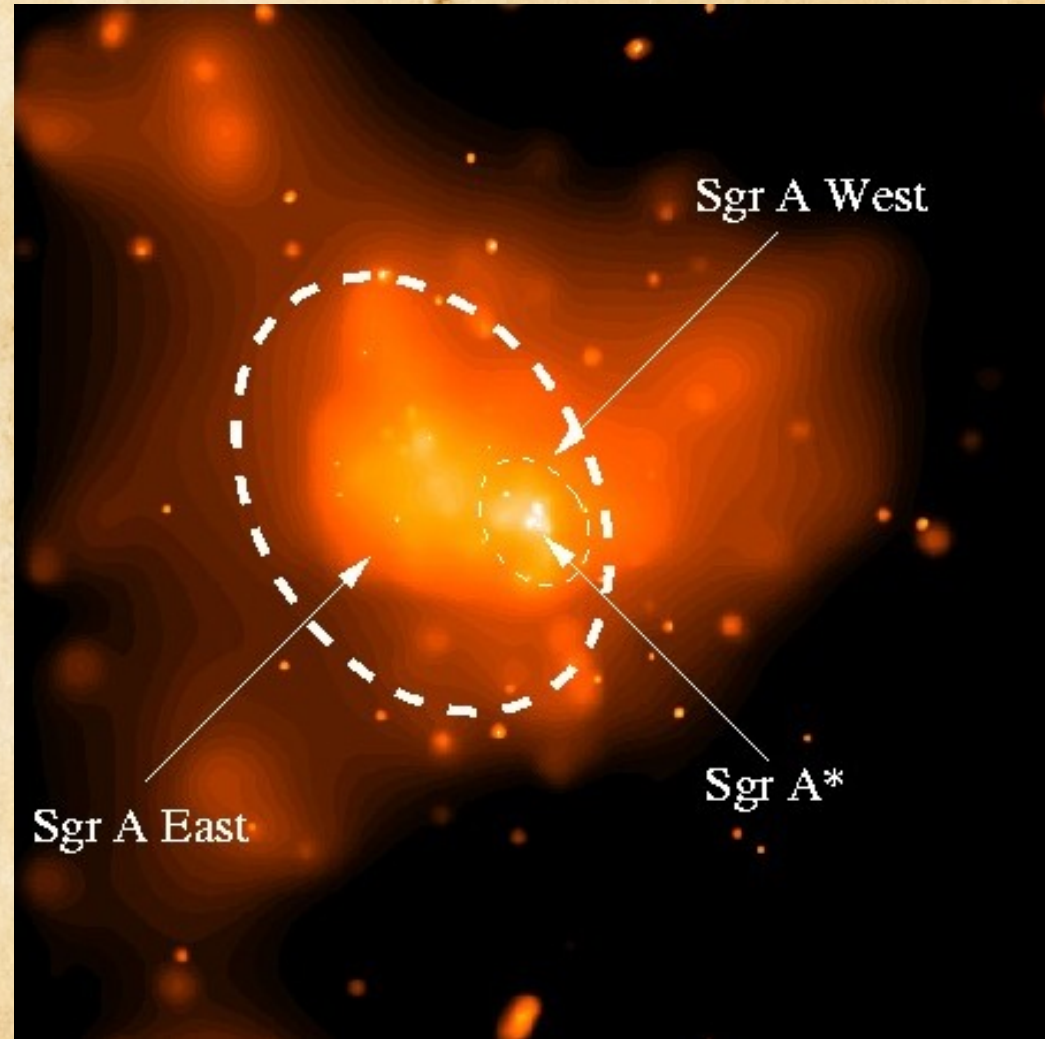
(преузето из: D. Најдуковић, "On the gravitational field of a point-like body immersed in a quantum vacuum", MNRAS 491, 4816-4828 (2020))

# *Sagittarius A* и *Sagittarius A\**

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

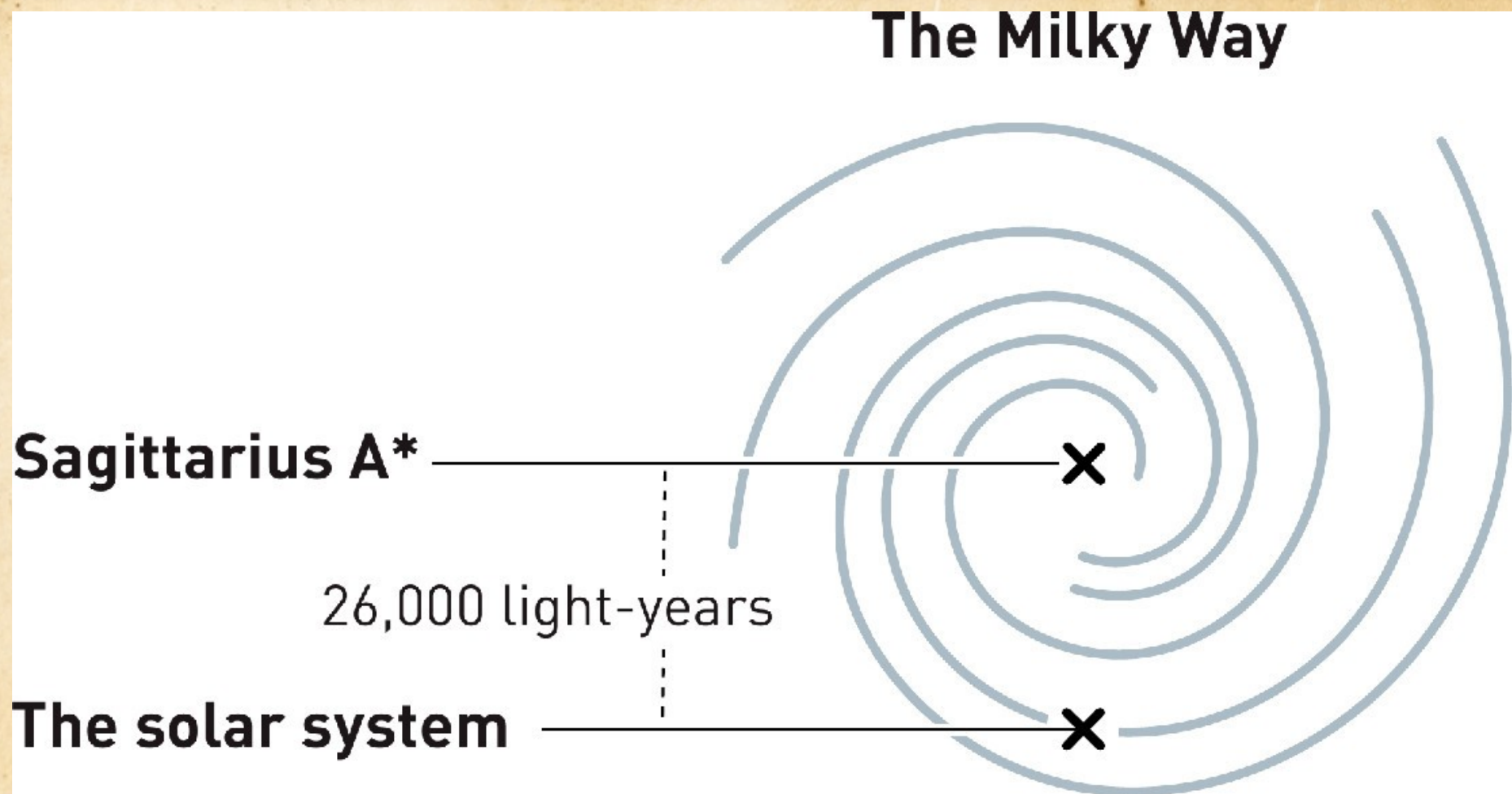
- (1) *Sgr A East* (остатак супернове)
- (2) *Sgr A West* (спирална структура)
- (3) *Sgr A\**  
(веома светао радио извор  
у центру спиралне структуре)

*Sgr A\** је веома компактан и масиван извор, чија се положај поклапа са динамичким центром Млечног пута, а око њега кружи јато звезда типа S.



Chandra X-ray image  
(NASA/ Penn State/ G. Garmire et al.)

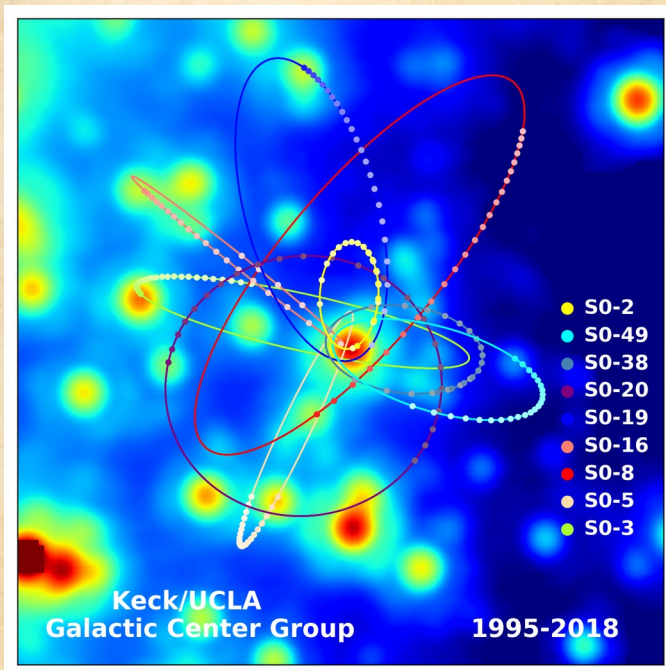
# Положај Сунчевог система у односу на Sgr A\*



Наша галаксија, Млечни пут, посматрана одозго.

# Ограничења масе гравитона из анализе путања сјајних звезда у Галактичком центру

На основу опште теорије релативности (ОТР) гравитон нема масу јер се креће брзином светлости, али постоје и неке теорије "масивне" гравитације по којима се гравитон креће мало спорије од брзине светлости и због чега има неку малу масу.



S-звездано јато  
око Sgr A\*

- посматрања сјајних звезда у IC опсегу - алат за процену гравитационог потенцијала у GC
- ови подаци могу да се користе за ограничавање вредности параметара алтернативних теорија гравитације (нпр. Јукавина теорија)
- ми смо користили астрономска посматрања и извршили поређење симулираних орбита звезде S2 у Јукавином гравитационом потенцијалу (једна од теорија масивне гравитације)

# Посматрање орбите S2 звезде

Оптички телескопи NTT/VLT и Кек.



New Technology  
Telescope  
(3.6 m),  
La Silla Obs., Chile



Very Large Telescope  
(4 x 8.2 m),  
Paranal Observatory,  
Chile



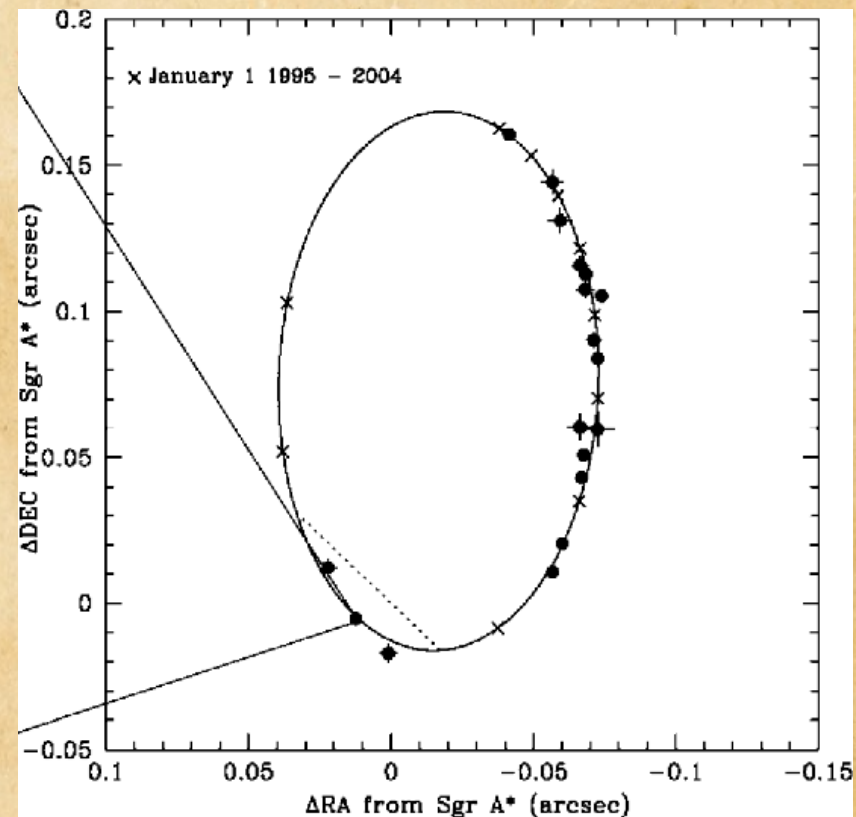
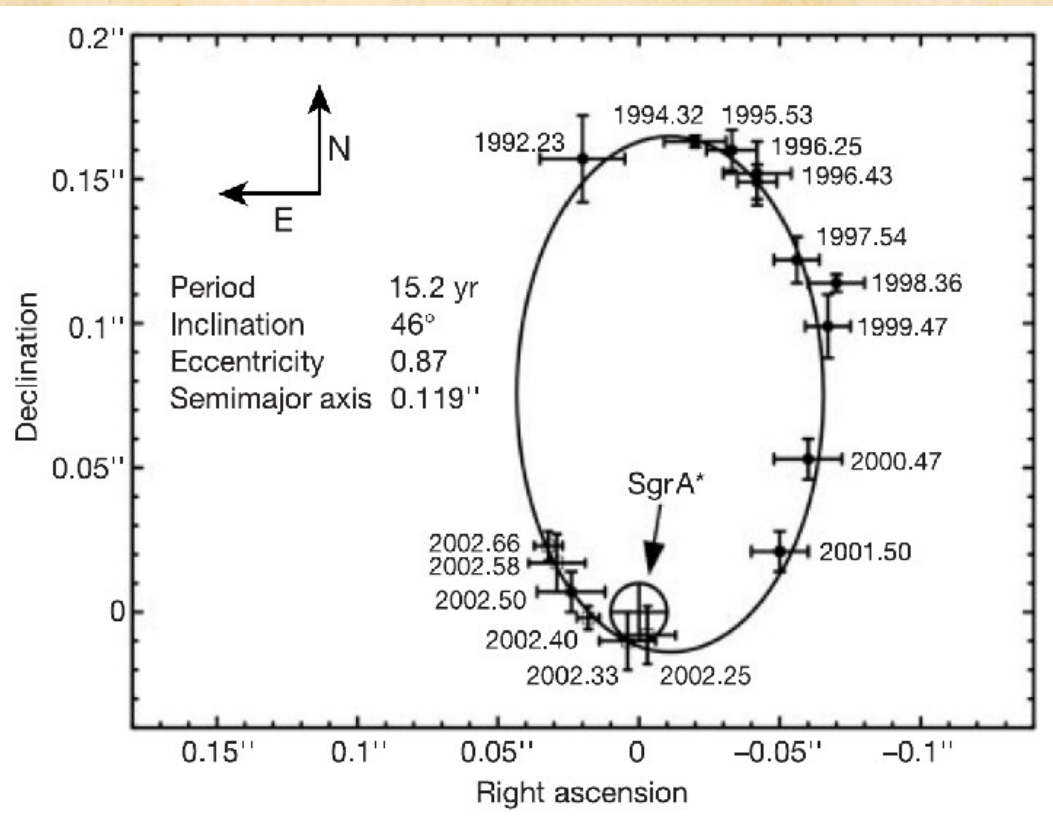
Keck telescope  
(2 x 10 m),  
Keck Observatory,  
Hawaii, USA

NTT/VLT – посматрала група Р. Гензела (ESO)

Кек – посматрала група А. Гез



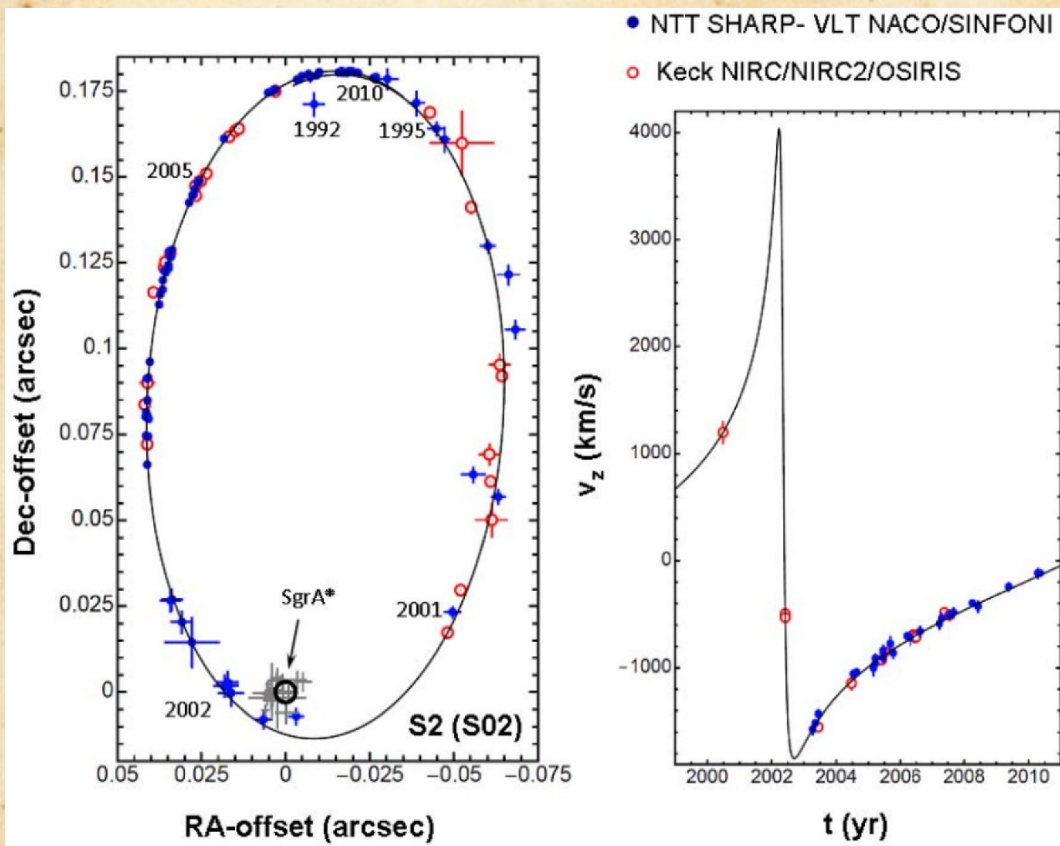
# Орбите звезде S2 из посматрања помоћу *VLT*-а и Кек телескопа



Schödel, R., Ott, T., Genzel, R.,  
et al., Nature, 419, 694 (2002)

A. M. Ghez et al. ApJL, 586,  
L127 (2003)

# Орбите звезде S2 из комбинације посматрања VLT и Кек

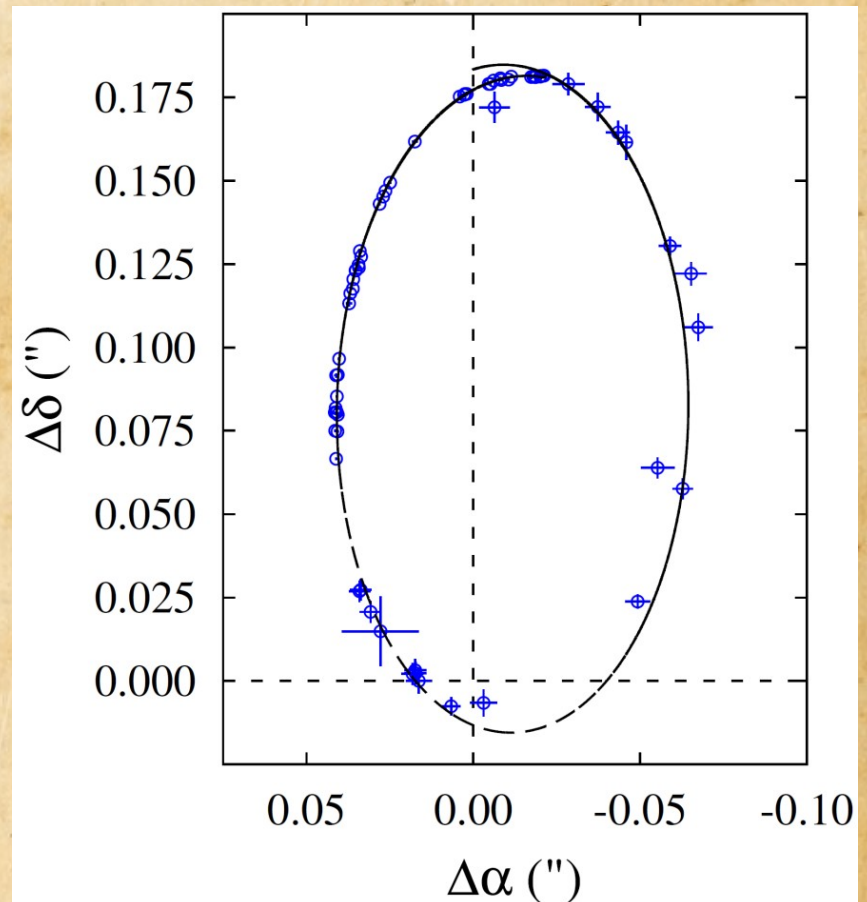
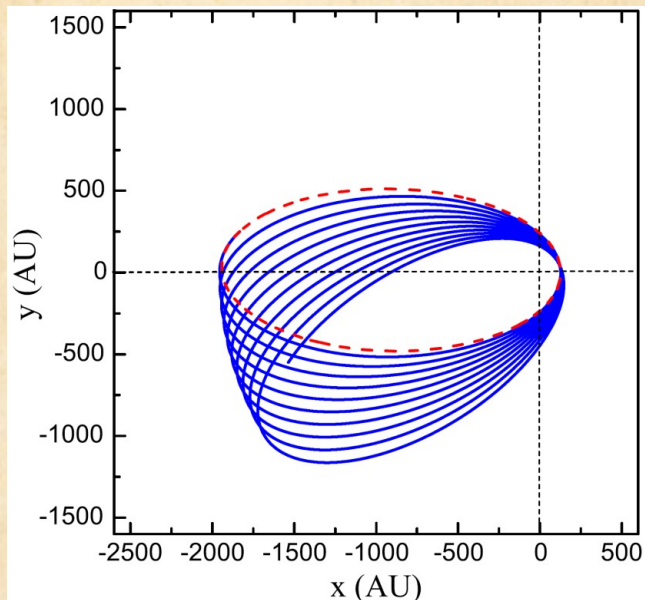


- најубедљивији доказ да је Sgr A\* супермасивна црна рупа са масом од око 4 милиона Сунчевих маса
- Ghez & Genzel: Нобелова награда за физику 2020
- користили смо ова посматрања
- наши радови су цитирани 19 пута од стране овогодишњих нобеловаца

R. Genzel, F. Eisenhauer, S. Gillessen, Reviews of Modern Physics 82, 3121 (2010)

# Симулиране орбите S-звезда у Јукавиној гравитацији

Гравитација са Јукава чланом:  $\Phi(r) = -\frac{GM}{(1+\delta)r} \left[ 1 + \delta e^{-\left(\frac{r}{\Lambda}\right)} \right]$



Симулиране орбите S2 звезде у  
Јукава и Њутновој гравитацији.

**J**ournal of **C**osmology and **A**stroparticle **P**hysics  
An IOP and SISSA journal

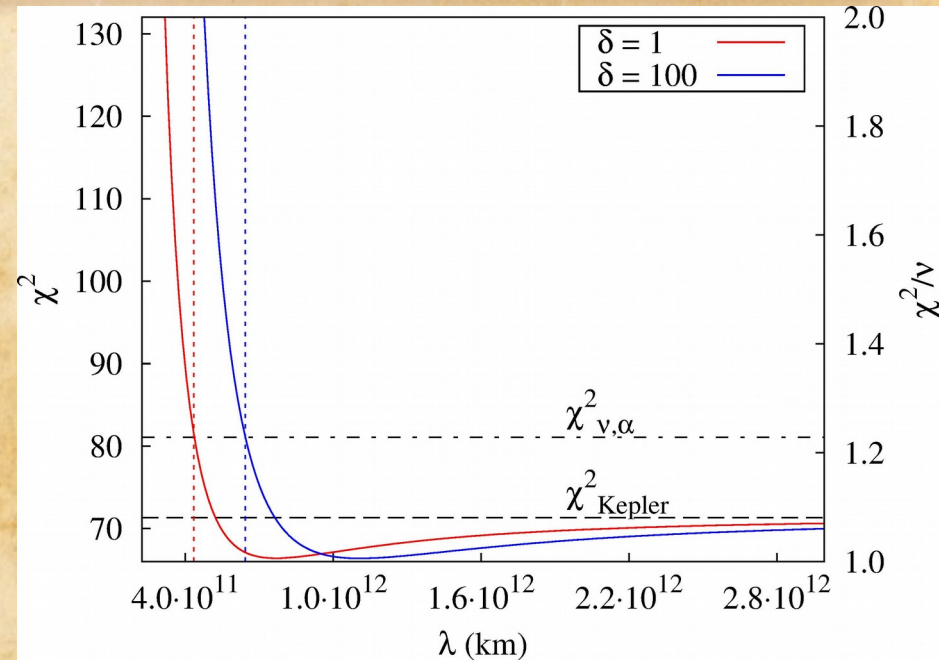
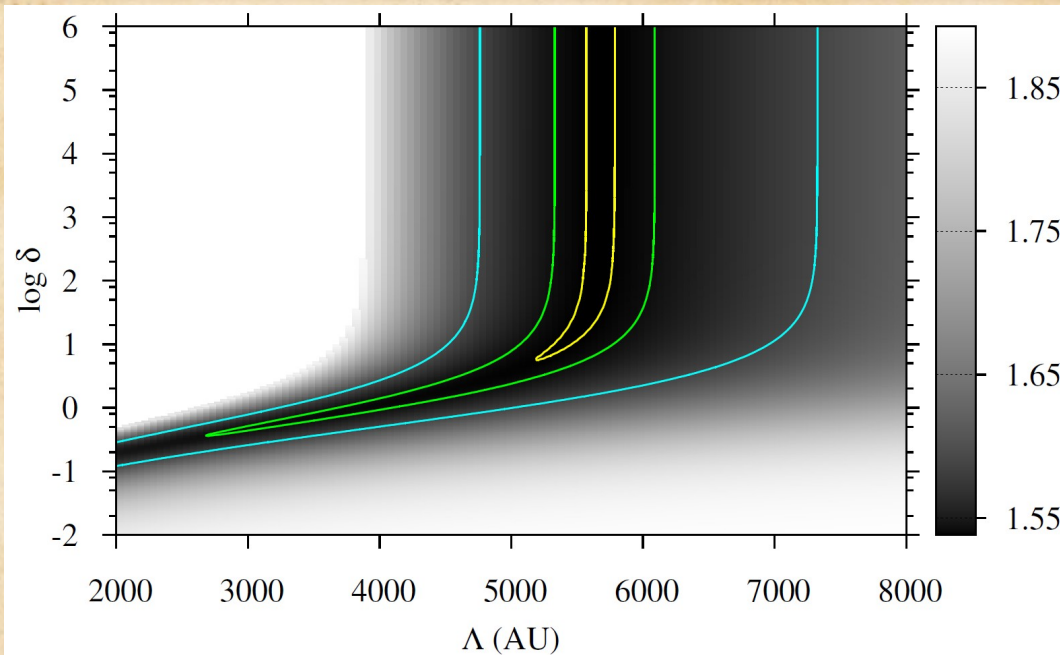
**JCAP 2013**

**Constraining the range of Yukawa  
gravity interaction from S2 star orbits**

D. Borka,<sup>a,1</sup> P. Jovanović,<sup>b</sup> V. Borka Jovanović<sup>a</sup> and  
A.F. Zakharov<sup>c,d,e</sup>

Пример фитовања симулиране  
орбите у Јукава гравитацији у  
посматрања S2 звезде

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



Резултат фитовања симулираних орбита у посматрања: мапа редукованог  $\chi^2$  у  $\Lambda$ - $\delta$  параметарском простору Јукава гравитације.

(AU = 149.600.000 km)

$\chi^2$  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.

# Комптонова таласна дужина и маса гравитона

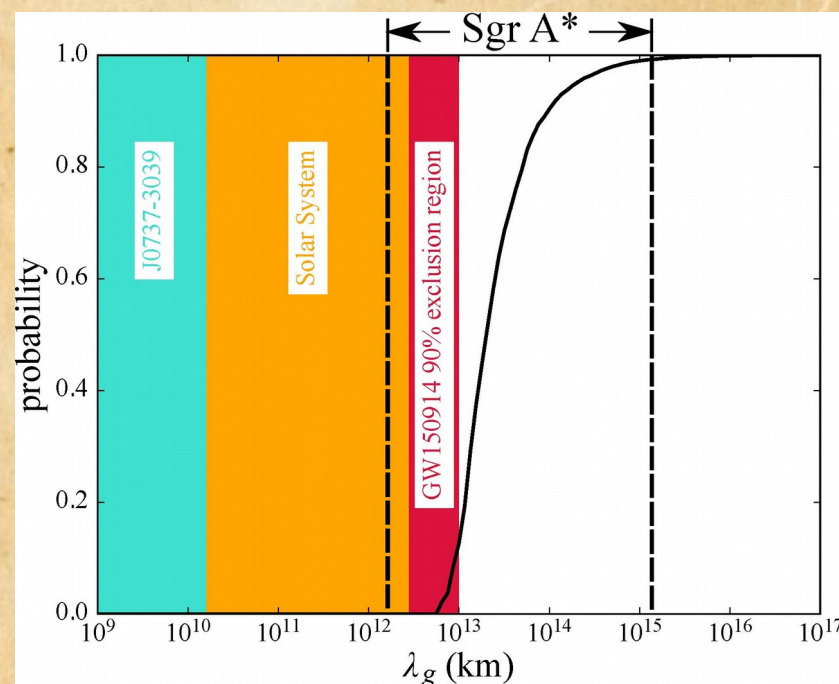
- Ако се гравитација шири масивним пољем онда брзина гравитационих таласа (гравитона) зависи од њихове фреквенције као:

$$(v_g/c)^2 = 1 - (c/f\lambda_g)^2,$$

- где је  $\lambda_g$  Комптонова таласна дужина гравитона, а његова маса је (Will, 1998, PRD, 57, 2061):  $m_g = hc/\lambda_g$
- наши резултати у складу са LIGO:

$$\lambda_g > 4.3 \times 10^{11} \text{ km}$$

$$m_g < 2.9 \times 10^{-21} \text{ eV}$$



**J**ournal of **C**osmology and **A**stroparticle **P**hysics  
An IOP and SISSA journal

**JCAP 2016**

**Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits II: bounds on graviton mass**

A.F. Zakharov,<sup>a,b,c,d,e</sup> P. Jovanović,<sup>f</sup> D. Borka<sup>g</sup>  
and V. Borka Jovanović<sup>g</sup>

Поређење наших и LIGO резултата за Комптонову таласну дужину гравитона.

# Одређивање масе гравитона из орбиталне прецесије

Прецесија у Јукавиној гравитацији:  $\Delta\varphi_Y^{\text{rad}} \approx \frac{\pi\delta\sqrt{1-e^2}}{1+\delta} \left( \frac{a^2}{\Lambda^2} - \frac{a^3}{\Lambda^3} + \frac{4+e^2}{8} \frac{a^4}{\Lambda^4} - \dots \right)$

Ако претпоставимо да ће предвиђања ОТР за прецесију звезде S2 ( $0^\circ.18$  по орбиталном периоду) у будућности бити потврђена, може се одредити одговарајућа маса гравитона из услова:  $\Delta\varphi_Y = \Delta\varphi_{GR}$

Ми смо показали да је то испуњено када је:

$$\Lambda \approx \frac{c}{2} \sqrt{\frac{(a\sqrt{1-e^2})^3}{3GM}} \approx \sqrt{\frac{(a\sqrt{1-e^2})^3}{6R_S}}$$

што одговара следећој процени за масу гравитона:

$$5.48 \times 10^{-22} \text{ eV}$$

**J**ournal of **C**osmology and **A**stroparticle **P**hysics  
An IOP and SISSA journal

**JCAP 2018**

**Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits III: improvement expectations for graviton mass bounds**

A.F. Zakharov,<sup>a,b,c,d,e,1</sup> P. Jovanović,<sup>f</sup> D. Borka<sup>g</sup> and V. Borka Jovanović<sup>g</sup>

# Закључци

- 1) за разлику од ОТР, МГ са Јукавиним чланом предвиђа масивне гравитоне
- 2) поређење симулираних орбита S2 звезде у гравитационом потенцијалу са Јукавиним чланом представља нов и независан метод за одређивање горње границе масе гравитона
- 3) наша процена је добијена на независан начин од осталих метода, и у оквиру је граница добијених помоћу LIGO-а
- 4) наша процена ће са великом вероватноћом моћи да буде побољшана коришћењем нових прецизнијих инструмената као што су ГРАВИТИ, Е-ЕЛТ и ТМТ
- 5) наши радови (у вези масе гравитона) су цитирани од добитника Нобелове награде за физику 2020. др Андреа Гез (Physical Review Letters 118, id.211101 (2017))
- 6) наши резултати 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*

# Цитираност

PRL 118, 211101 (2017)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
26 MAY 2017



## Testing General Relativity with Stellar Orbits around the Supermassive Black Hole in Our Galactic Center

A. Hees,<sup>1\*</sup> T. Do,<sup>1</sup> A. M. Ghez,<sup>1†</sup> G. D. Martinez,<sup>1</sup> S. Naoz,<sup>1</sup> E. E. Becklin,<sup>1</sup> A. Boehle,<sup>1</sup> S. Chappell,<sup>1</sup> D. Chu,<sup>1</sup> A. Dehghanfar,<sup>1</sup> K. Kosmo,<sup>1</sup> J. R. Lu,<sup>2</sup> K. Matthews,<sup>3</sup> M. R. Morris,<sup>1</sup> S. Sakai,<sup>1</sup> R. Schödel,<sup>4</sup> and G. Witzel<sup>1</sup>

A specific theoretical model covered by the fifth force framework is a massive graviton. In that context, we found a 90% confidence limit  $\lambda > 5000$  A.U. for  $\alpha = 1$ , which can be interpreted as a lower limit on the graviton's Compton wavelength  $\lambda_g > 7.5 \times 10^{11}$  km or, equivalently, as an upper bound on the graviton's mass  $m_g < 1.6 \times 10^{-21}$  eV/ $c^2$  (see also Ref. [36]). This constraint is one order of magnitude less stringent than the recent bound obtained by LIGO [78], which, nevertheless, does not apply for all models predicting a fifth force.





[Home](#) [pdgLive](#) [Summary Tables](#) [Reviews, Tables, Plots](#) [Particle Listings](#)

[pdgLive Home](#) > [graviton](#) > **graviton MASS**

### 2019 Review of Particle Physics.

M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* **98**, 030001 (2018) and 2019 update.

## graviton MASS

INSPIRE search

Van Dam and Veltman ([VANDAM 1970](#)), Iwasaki ([IWASAKI 1970](#)), and Zakharov ([ZAKHAROV 1970](#)) almost simultaneously showed that "... there is a discrete difference between the theory with zero-mass and a theory with finite mass, no matter how small as compared to all external momenta." The resolution of this "vDVZ discontinuity" has to do with whether the linear approximation is valid. De Rham *et al.* ([DE-RHAM 2011](#)) have shown that nonlinear effects not captured in their linear treatment can give rise to a screening mechanism, allowing for massive gravity theories. See also [GOLDHABER 2010](#) and [DE-RHAM 2017](#) and references therein. Experimental limits have been set based on a Yukawa potential or signal dispersion.  $h_0$  is the Hubble constant in units of  $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

The following conversions are useful:  $1 \text{ eV} = 1.783 \times 10^{-33} \text{ g} = 1.957 \times 10^{-6} m_e$ ;  $\lambda_C = (1.973 \times 10^{-7} \text{ m}) \times (1 \text{ eV}/m_g)$ .

VALUE (eV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
$< 6 \times 10^{-32}$	<a href="#">1 CHOUDHURY 2004</a>	YUKA	Weak gravitational lensing
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••			
$< 1.4 \times 10^{-29}$	<a href="#">2 DESAI 2018</a>	YUKA	Gal cluster Abell 1689
$< 5 \times 10^{-30}$	<a href="#">3 GUPTA 2018</a>	YUKA	SPT-SZ
$< 3 \times 10^{-30}$	<a href="#">3 GUPTA 2018</a>	YUKA	Planck all-sky SZ
$< 1.3 \times 10^{-29}$	<a href="#">3 GUPTA 2018</a>	YUKA	redMaPPer SDSS-DR8
$< 6 \times 10^{-30}$	<a href="#">4 RANA 2018</a>	YUKA	Weak lensing in massive clusters
$< 8 \times 10^{-30}$	<a href="#">5 RANA 2018</a>	YUKA	SZ effect in massive clusters
$< 7 \times 10^{-23}$	<a href="#">6 ABBOTT 2017</a>	DISP	Combined dispersion limit from three BH mergers
$< 1.2 \times 10^{-22}$	<a href="#">6 ABBOTT 2016</a>	DISP	Combined dispersion limit from two BH mergers
$< 2.9 \times 10^{-21}$	<a href="#">7 ZAKHAROV 2016</a>	YUKA	S2 star orbit

**graviton**

$$J = 2$$

**graviton MASS**

Van Dam and Veltman (VANDAM 70), Iwasaki (IWASAKI 70), and Zakharov (ZAKHAROV 70) almost simultaneously showed that "... there is a discrete difference between the theory with zero-mass and a theory with finite mass, no matter how small as compared to all external momenta." The resolution of this "vDVZ discontinuity" has to do with whether the linear approximation is valid. De Rham *et al.* (DE-RHAM 11) have shown that nonlinear effects not captured in their linear treatment can give rise to a screening mechanism, allowing for massive gravity theories. See also GOLDHABER 10 and DE-RHAM 17 and references therein. Experimental limits have been set based on a Yukawa potential or signal dispersion.  $h_0$  is the Hubble constant in units of  $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

The following conversions are useful:  $1 \text{ eV} = 1.783 \times 10^{-33} \text{ g} = 1.957 \times 10^{-6} m_e$ ;  $\lambda_C = (1.973 \times 10^{-7} \text{ m}) \times (1 \text{ eV}/m_e)$ .

VALUE (eV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<b>&lt;6 × 10<sup>-32</sup></b>	<b>1</b> CHOUDHURY 04	YUKA	Weak gravitational lensing
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •			
<1.4 × 10 <sup>-29</sup>	<sup>2</sup> DESAI 18	YUKA	Gal cluster Abell 1689
<5 × 10 <sup>-30</sup>	<sup>3</sup> GUPTA 18	YUKA	SPT-SZ
<3 × 10 <sup>-30</sup>	<sup>3</sup> GUPTA 18	YUKA	Planck all-sky SZ
<1.3 × 10 <sup>-29</sup>	<sup>3</sup> GUPTA 18	YUKA	redMaPPer SDSS-DR8
<6 × 10 <sup>-30</sup>	<sup>4</sup> RANA 18	YUKA	Weak lensing in massive clusters
<8 × 10 <sup>-30</sup>	<sup>5</sup> RANA 18	YUKA	SZ effect in massive clusters
<7 × 10 <sup>-23</sup>	<sup>6</sup> ABBOTT 17	DISP	Combined dispersion limit from three BH mergers
<1.2 × 10 <sup>-22</sup>	<sup>6</sup> ABBOTT 16	DISP	Combined dispersion limit from two BH mergers
<b>&lt;2.9 × 10<sup>-21</sup></b>	<b><sup>7</sup> ZAKHAROV 16</b>	<b>YUKA</b>	<b>S2 star orbit</b>
<5 × 10 <sup>-23</sup>	<sup>8</sup> BRITO 13		Spinning black holes bounds
<4 × 10 <sup>-25</sup>	<sup>9</sup> BASKARAN 08		Graviton phase velocity fluctuations
<6 × 10 <sup>-32</sup>	<sup>10</sup> GRUZINOV 05	YUKA	Solar System observations
<9.0 × 10 <sup>-34</sup>	<sup>11</sup> GERSHTEIN 04		From $\Omega_{tot}$ value assuming RTG
>6 × 10 <sup>-34</sup>	<sup>12</sup> DVALI 03		Horizon scales
<8 × 10 <sup>-20</sup>	<sup>13,14</sup> FINN 02	DISP	Binary pulsar orbital period decrease
	<sup>14,15</sup> DAMOUR 91		Binary pulsar PSR 1913+16
<7 × 10 <sup>-23</sup>	TALMADGE 88	YUKA	Solar system planetary astrometric data
<2 × 10 <sup>-29</sup> $h_0^{-1}$	GOLDHABER 74		Rich clusters
<7 × 10 <sup>-28</sup>	HARE 73		Galaxy
<8 × 10 <sup>4</sup>	HARE 73		$2\gamma$ decay

based on the fractional change between Newtonian and Yukawa accelerations for the 50 most massive galaxy clusters in the Local Cluster Substructure Survey. Limits for other CL's and other density cuts are also given.

<sup>5</sup> RANA 18 limit, 68% CL, obtained using mass measurements via the SZ effect out to the radius at which the cluster density falls to 500 times the critical density of the Universe for 182 optically confirmed galaxy clusters in an Atacama Cosmology Telescope survey. Limits for other CL's and other density cuts are also given.

<sup>6</sup> ABBOTT 16 and ABBOTT 17 assumed a dispersion relation for gravitational waves modified relative to GR.

<sup>7</sup> ZAKHAROV 16 constrains range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbit about black hole at Galactic center. The limit is  $< 2.9 \times 10^{-21}$  eV for  $\delta = 100$ .

<sup>8</sup> BRITO 13 explore massive graviton (spin-2) fluctuations around rotating black holes.

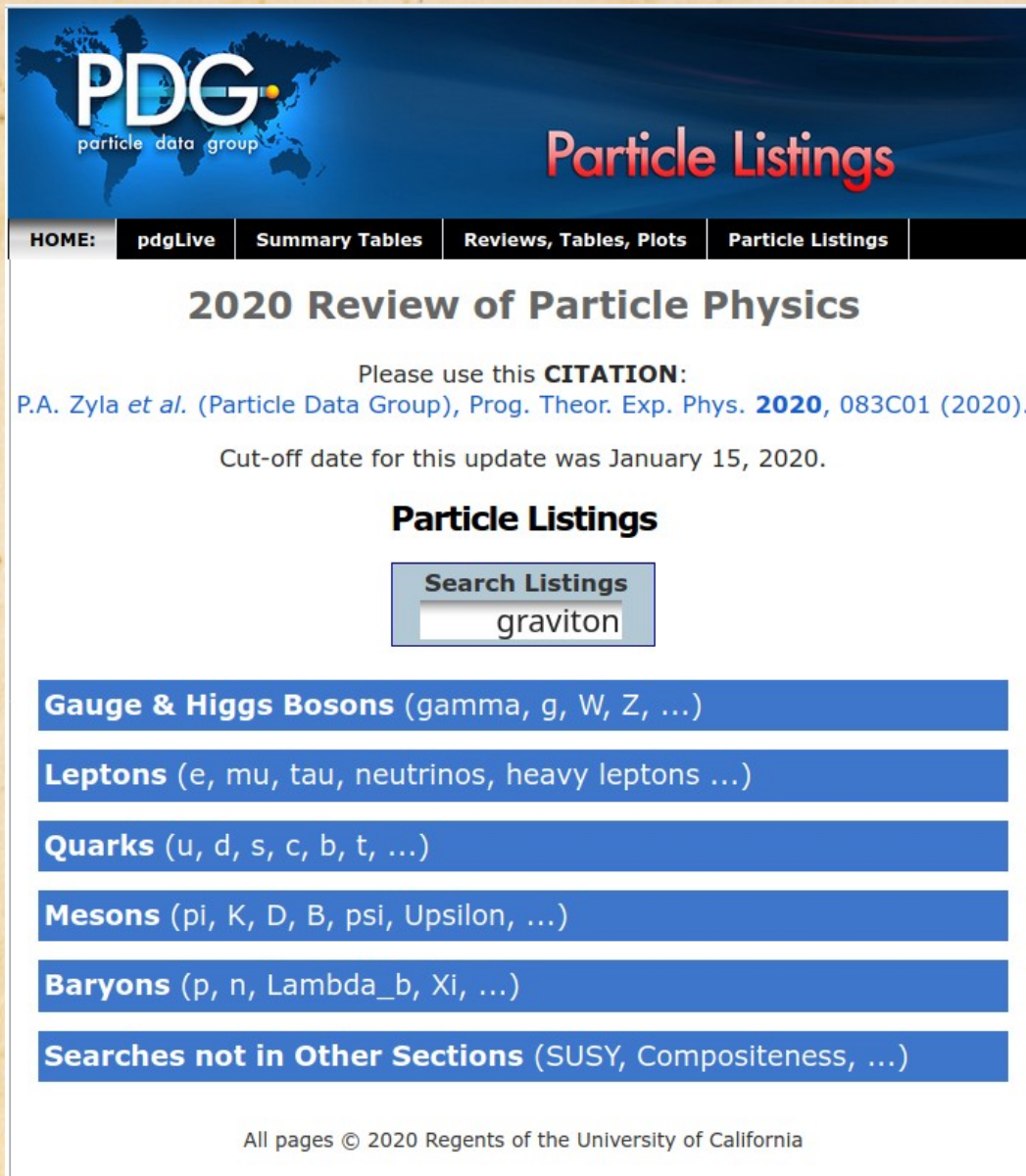
<sup>9</sup> BASKARAN 08 consider fluctuations in pulsar timing due to photon interactions ("surfing") with background gravitational waves.

<sup>7</sup> ZAKHAROV 2016 constrains range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbit about black hole at Galactic center. The limit is  $< 2.9 \times 10^{-21}$  eV for  $\delta = 100$ .

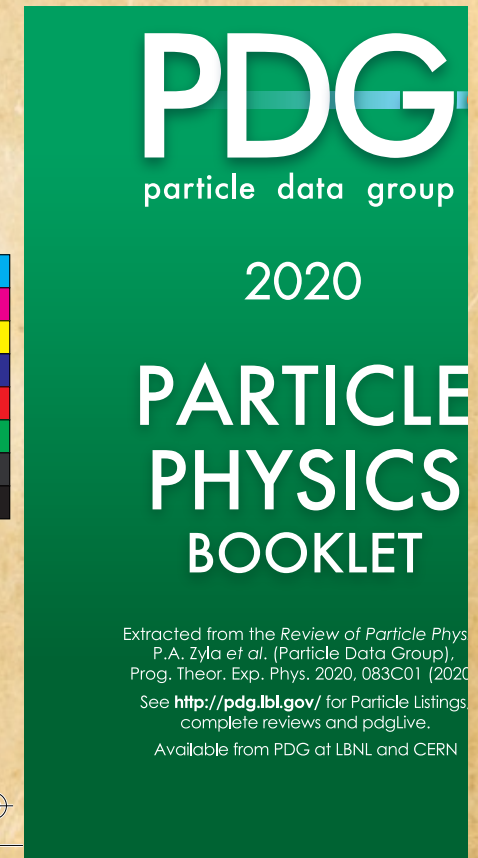
ZAKHAROV 2016 JCAP 1605 045 Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits II: Bounds on graviton mass



# Како пронаћи податке на интернет сајту групе *Particle Data Group*



The screenshot shows the PDG Particle Listings website. At the top left is the PDG logo with a world map. The main header is "Particle Listings". A navigation bar includes "HOME:", "pdgLive", "Summary Tables", "Reviews, Tables, Plots", and "Particle Listings". The main content area is titled "2020 Review of Particle Physics". It includes a citation: "Please use this CITATION: P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)." and a note: "Cut-off date for this update was January 15, 2020." Below this is a "Particle Listings" section with a search box containing "graviton". A list of categories is shown in blue boxes: "Gauge & Higgs Bosons (gamma, g, W, Z, ...)", "Leptons (e, mu, tau, neutrinos, heavy leptons ...)", "Quarks (u, d, s, c, b, t, ...)", "Mesons (pi, K, D, B, psi, Upsilon, ...)", "Baryons (p, n, Lambda\_b, Xi, ...)", and "Searches not in Other Sections (SUSY, Compositeness, ...)". At the bottom, it says "All pages © 2020 Regents of the University of California".



The image shows the cover of the "2020 Particle Physics Booklet". It features the PDG logo at the top, followed by "particle data group" and "2020". The main title is "PARTICLE PHYSICS BOOKLET". Below the title, it says "Extracted from the Review of Particle Physics P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)". It also includes the URL "See <http://pdg.lbl.gov/> for Particle Listings complete reviews and pdgLive." and "Available from PDG at LBNL and CERN". A vertical color bar on the left side of the cover contains the letters C, M, Y, CM, MY, CY, and K. There are also registration marks and a grayscale calibration bar at the bottom.

[https://pdg.lbl.gov/2020/listings/contents\\_listings.html](https://pdg.lbl.gov/2020/listings/contents_listings.html)

# Остварени резултати I

Остварени резултати истраживања у вези одређивања границе масе гравитона:

Радови у врхунским часописима међународног значаја - M21

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

# Остварени резултати II

Радови у часописима међународног значаја - M23

- 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)
- 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**, у штампи (2021)

И поред веома ограничених финансијских средстава, сарадници Астрономске опсерваторије су учествовали на неколико научно-стручних скупова у земљи и иностранству, у оквиру којих су презентовали резултате истраживања остварене у оквиру овог истраживачког пројекта.

# Остварени резултати III

Рад на скупу међународног значаја штампан у целини - М33

- A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borika, V. Borika 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)

Рад на скупу међународног значаја штампан у изводу - М34

- A. F. Zakharov, D. Borika, P. Jovanović, V. Borika 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)

Рад у водећем часопису националног значаја - М51

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



# Остварени резултати IV

Радови у научним часописима - М53

- A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *Trajectories of bright stars at the Galactic Center as a tool to evaluate a graviton mass*, **EPJ Web Conf.** 125, 01011-1-8 (2016)
- 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)
- 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)
- A. F. Zakharov, P. Jovanović, D. Borka, V. Borka Jovanović, *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)**, 2018

**Хвала на пажњи!**