

Модификована гравитација

на супрот тамној материји



Предраг Јовановић

Астрономска опсерваторија Београд

Садржај

1) Тамна материја (ТМ) као једно од предвиђања опште теорије релативности (ОТР):

- како и зашто је уведена
- хипотеза о халоу ТМ
- детекција помоћу слабих гравитационих сочива
- аномалије у расподели и количини ТМ на галактичким скалама
- алтернативе ТМ у облику модификоване динамике и гравитације

2) $f(R)$ теорије модификоване гравитације (МГ):

- R^n и гравитација са Yukawa чланом
- поређење са предвиђањима ОТР

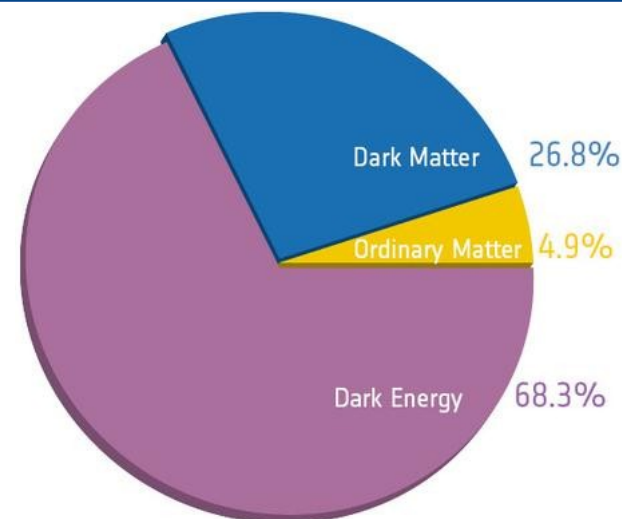
3) Резултати у оквиру пројекта 176003:

- астрономска тестирања теорија МГ у апроксимацији слабог поља
- објављени резултати:
 - 1) тестирање теорија МГ помоћу астрометријских посматрања орбите S2 звезде око супермасивне црне рупе (СМЦР) у центру Млечног пута
- нови резултати:
 - 2) ограничења за масу гравитона из фитованих орбита S2 звезде у Yukawa МГ
 - 3) објашњење емпиријских релација за галаксије помоћу МГ
 - фундаментална раван елиптичних галаксија
 - барионска Тали-ФишEROVA релација спиралних галаксија

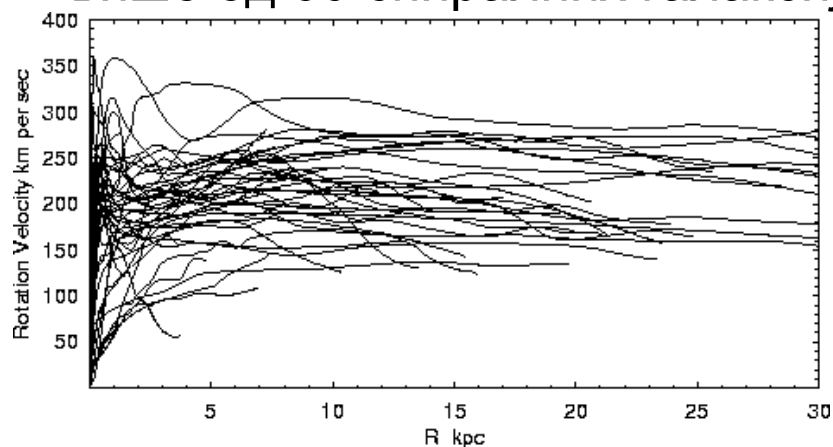
4) Закључци

1. Хладна тамна материја (ТМ)

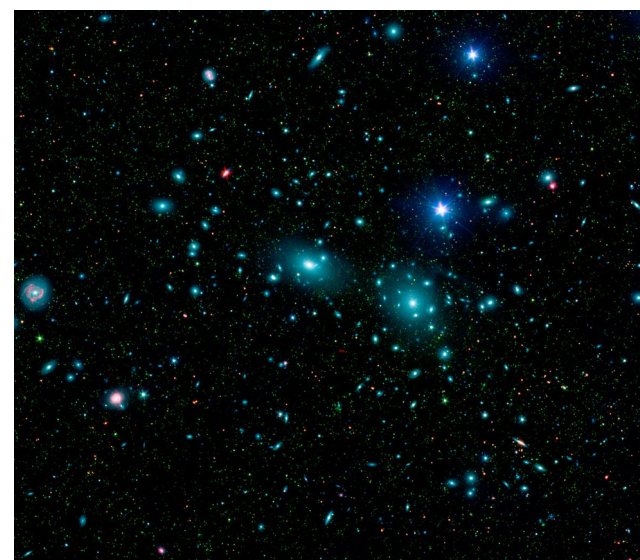
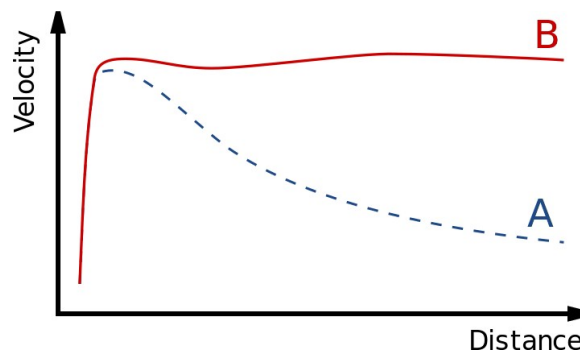
- **Хладна тамна материја:** сачињава $5/6$ укупне масе космоса и састоји се од небарионских слабо интерагујућих масивних честица које се крећу спорије од c и само под утицајем гравитације (WIMP-ови)
- **Фриц Цвики** је 1933 увео термин ТМ (“dunkle Materie”) када је применио виријалну теорему на 8 галаксија из галактичког јата Кома и нашао да оно има више стотина пута већу масу него што се може видети у облику сјајних галаксија (Zwicky, 1933, НРА, 6, 110)
- Јан Орт разматрао постојање ТМ још пре Цвикија
- **Вера Рубин** је 70-их година прошлог века дала прве јасне посматрачке индикације о постојању тамне материје на основу анализе орбиталних брзина код више од 60 спиралних галаксија



Структура космоса по Λ CDM



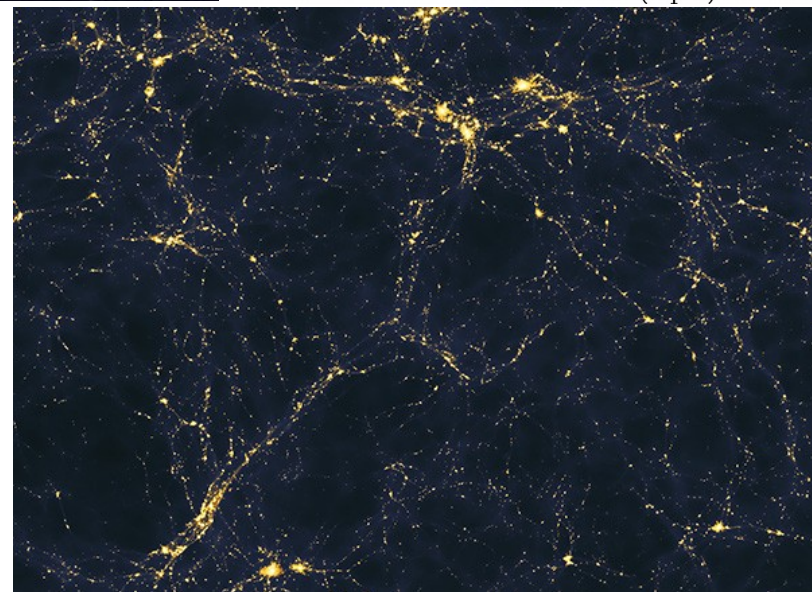
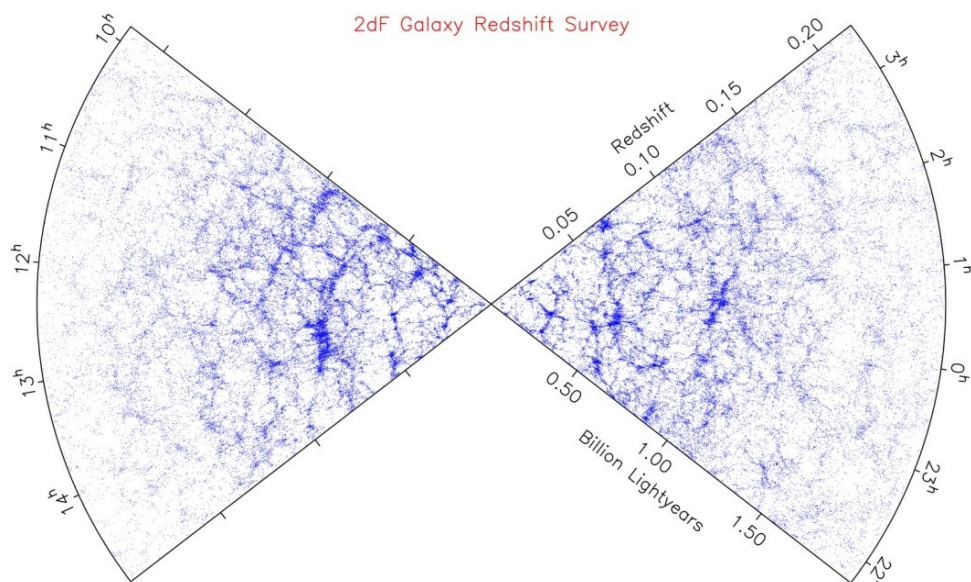
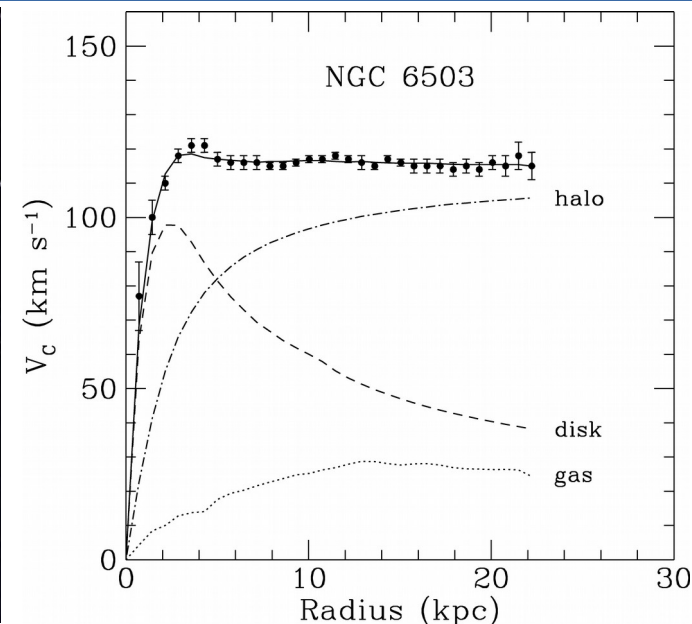
Sofue & Rubin, 2001, ARA&A, 39, 137



Галактичко јато Кома (Coma Berenices, Abell 1656)

Хипотеза о хаолу ТМ

- Равне ротационе криве код спиралних галаксија: посматране кружне брзине не опадају са растојањем, као што то предвиђа теорија, већ остају приближно константне због доприноса ТМ која је распоређена у галактичком халоу



- ТМ, по Λ CDM, има кључну улогу при формирању и расту великих структура јер на њу не делују силе које би се супротставиле гравитационој Џинсовој нестабилности која је узрок настанка компактних структура

ТМ као једно у низу предвиђања ОТР

- **ОТР:** $S = \int \left[\frac{1}{2\kappa} R + \mathcal{L}_M \right] \sqrt{-g} d^4x \Rightarrow R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \Rightarrow g_{\mu\nu} \Rightarrow$
 \Rightarrow гравитациони потенцијал у апроксимацији слабог поља: $g_{00} \simeq -(1 + 2\Phi)$

- **Орбитална прецесија:**

$$\Delta\varphi = \frac{6\pi G}{c^2} \frac{M}{a(1 - e^2)}$$

Mercury	Venus	Earth	Mars
42.98	8.62	3.84	1.35

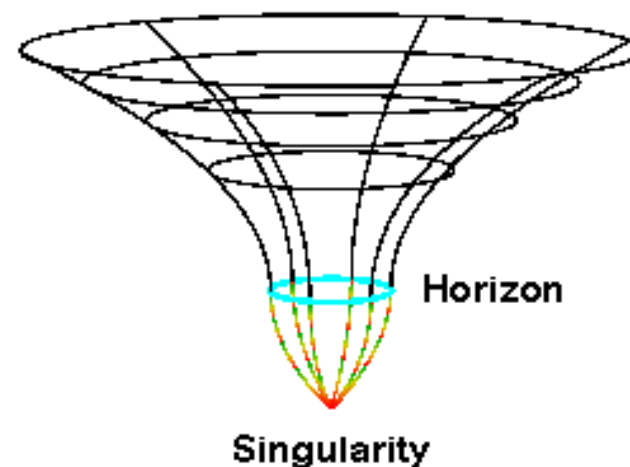
Table 4. Additional perihelion precessions from observations of planets and 19 spacecraft.

Planets	$\dot{\pi}$ (mas yr ⁻¹)	$ \sigma_{\dot{\pi}}/\dot{\pi} $
Mercury	-0.020 ± 0.030	1.5
Venus	0.026 ± 0.016	0.62
Earth	0.0019 ± 0.0019	1.0
Mars	-0.00020 ± 0.00037	1.9
Jupiter	0.587 ± 0.283	0.48
Saturn	-0.0032 ± 0.0047	1.5

Pitjeva & Pitjev, 2013, MNRAS, 432, 3431

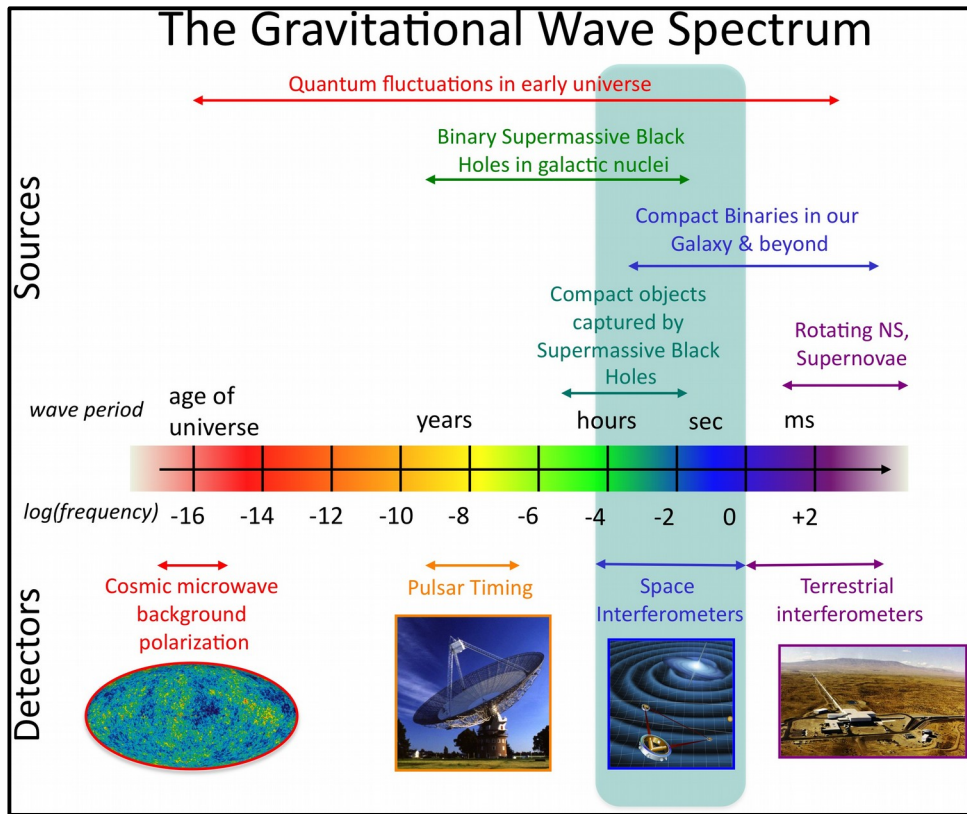
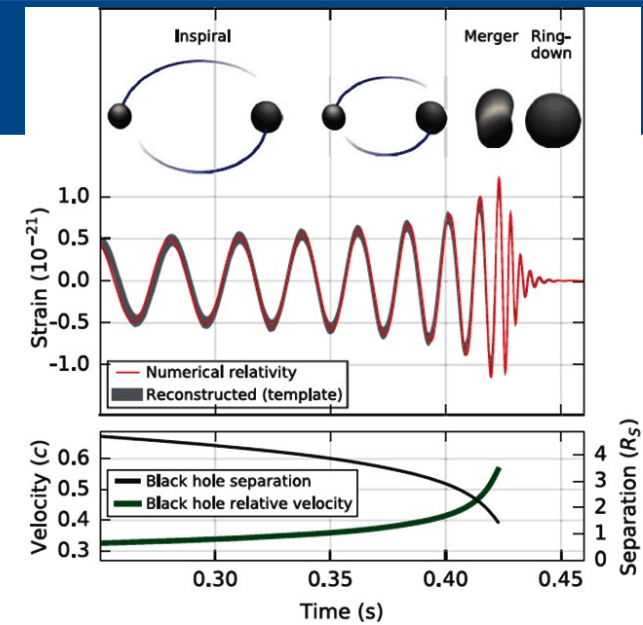
- **Црне рупе:**

- СМЦР у језгрима већине галаксија, укључујући и Млечни

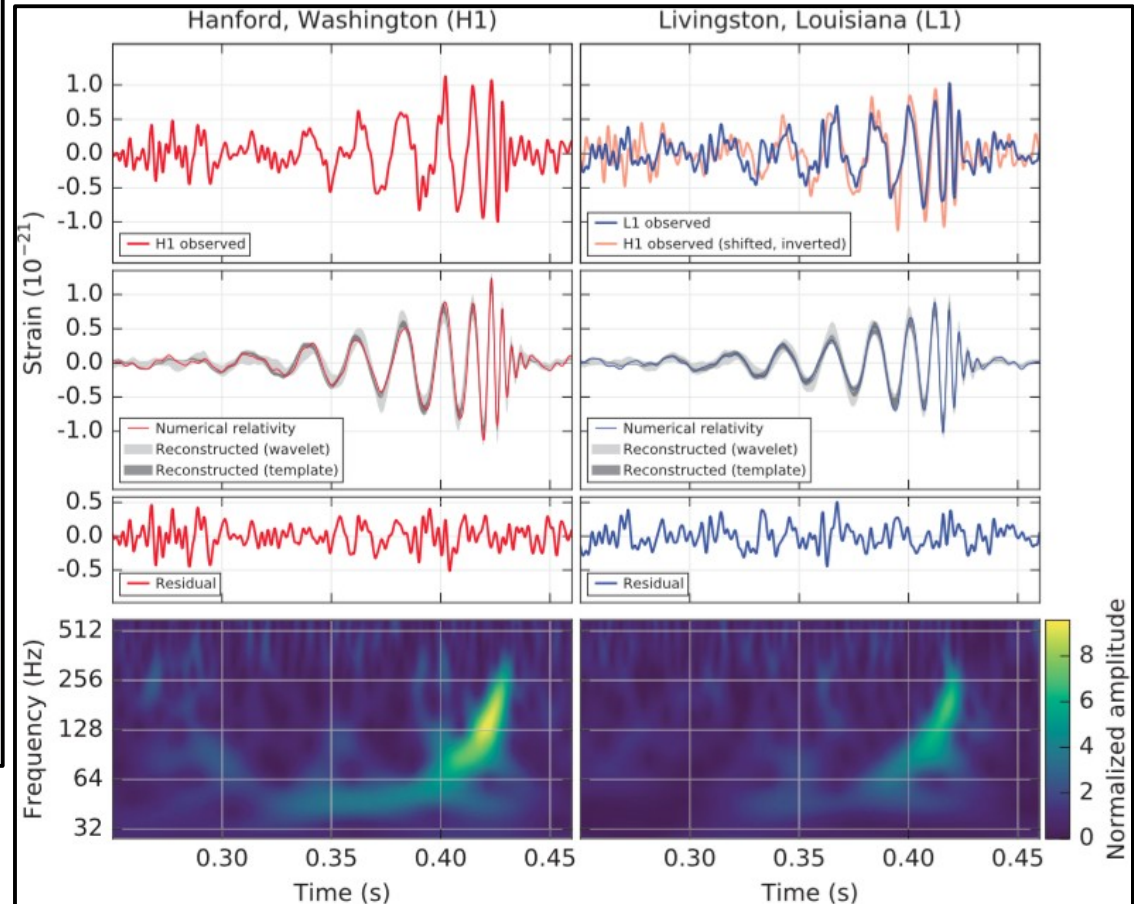


Гравитациони таласи

- Осцилације кривине простор-времена које се шире као таласи
- Настају услед убрзања масивних објеката
- Изазивају ритмичне промене растојања x са амплитудом h : $h = \delta x / x$
- Гравитони се крећу брзином c и немају масу мировања



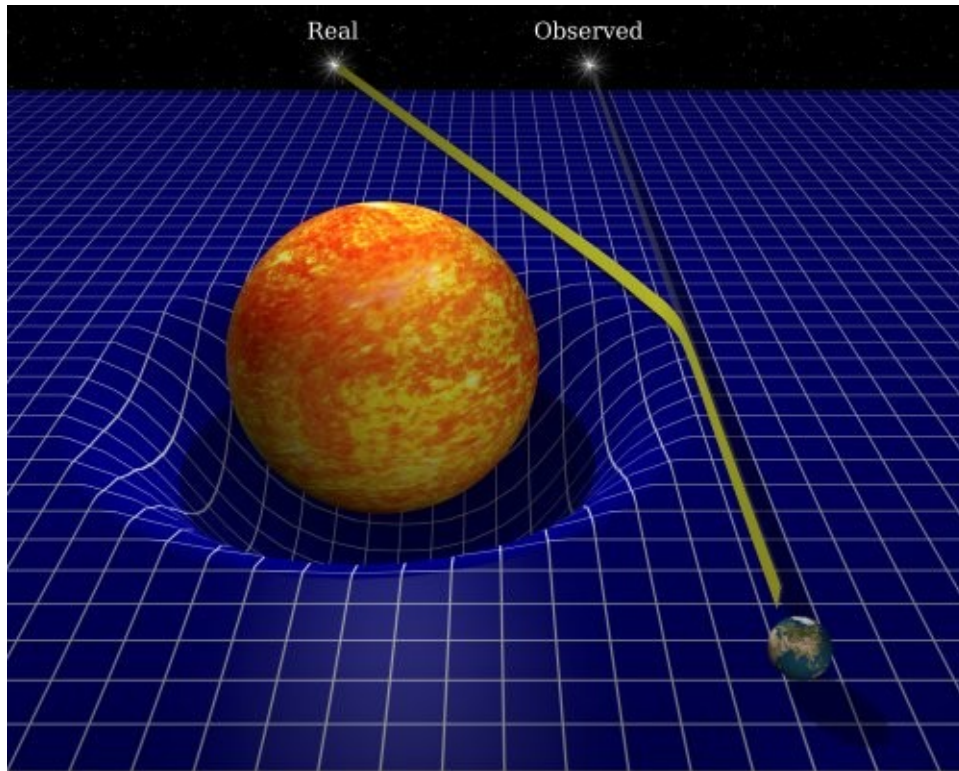
LIGO & Virgo Collaborations,
2016, PRL, 116, 061102



Гравитациона сочива

Угао савијања зрака светлости у гравитационом пољу

1. Јохан Георг фон Золднер (1804) - путања честице брзине c : $\alpha = \frac{2GM}{c^2 \xi}$
2. Алберт Ајнштајн (1915) - ОТП: $\alpha = \frac{4GM}{c^2 \xi}$

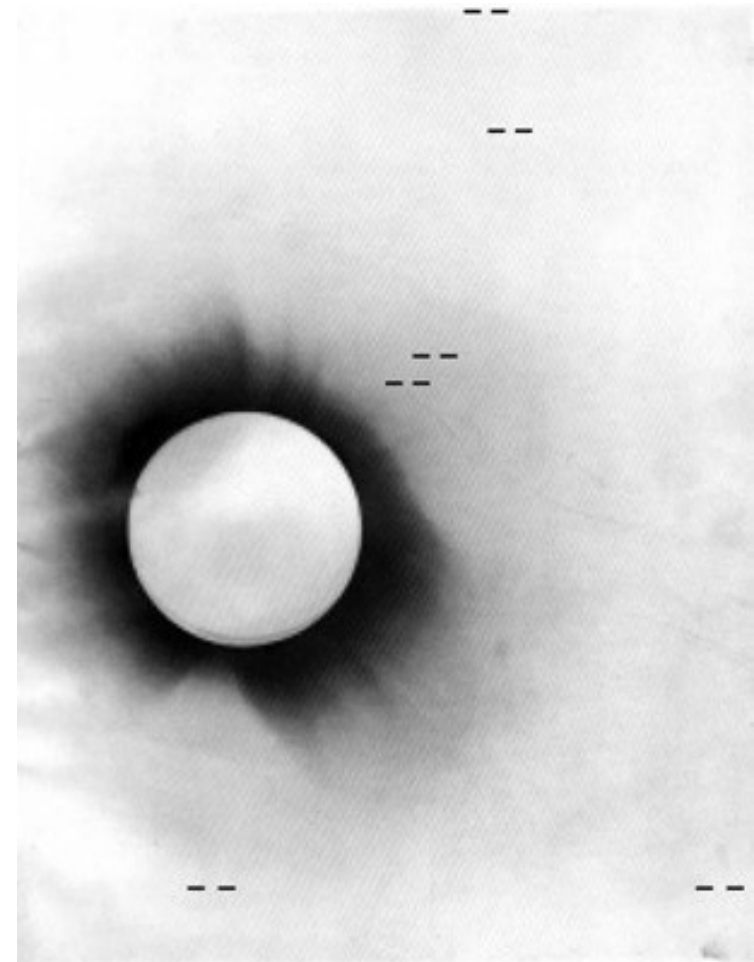


- Потпуно помрачење Сунца 1919:

1) нема савијања светлости: $\alpha = 0''$

2) Њутнова механика: $\alpha = 0''.87$

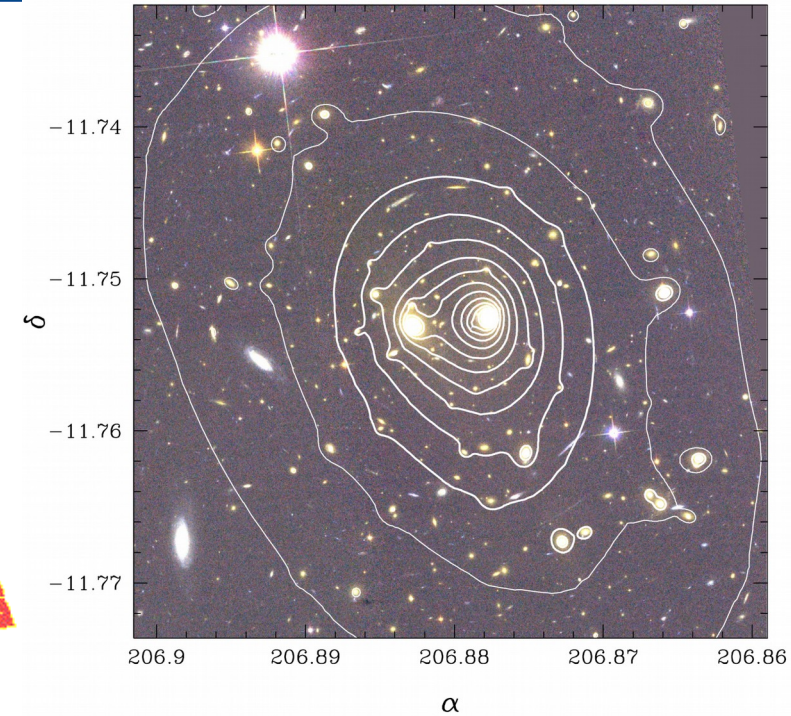
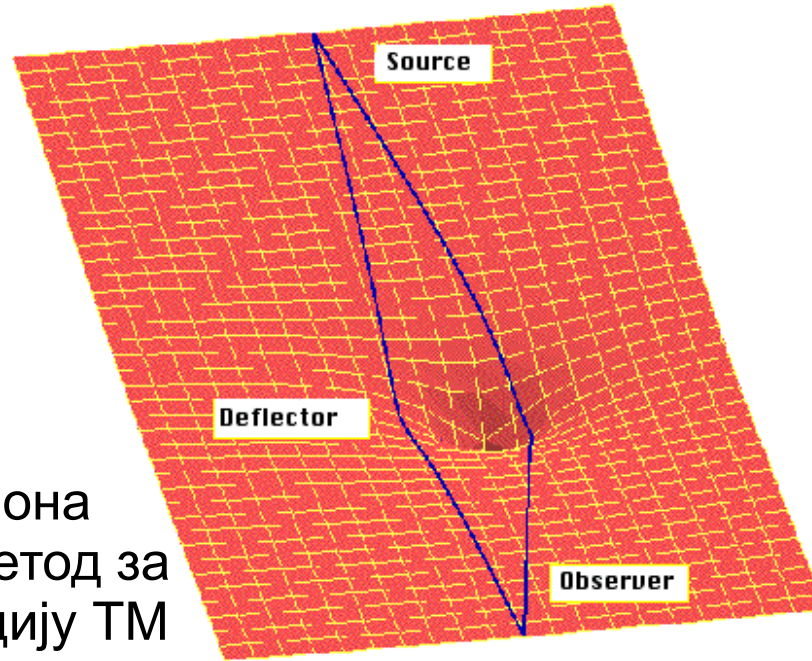
3) ОТП: $\alpha = 1''.75$



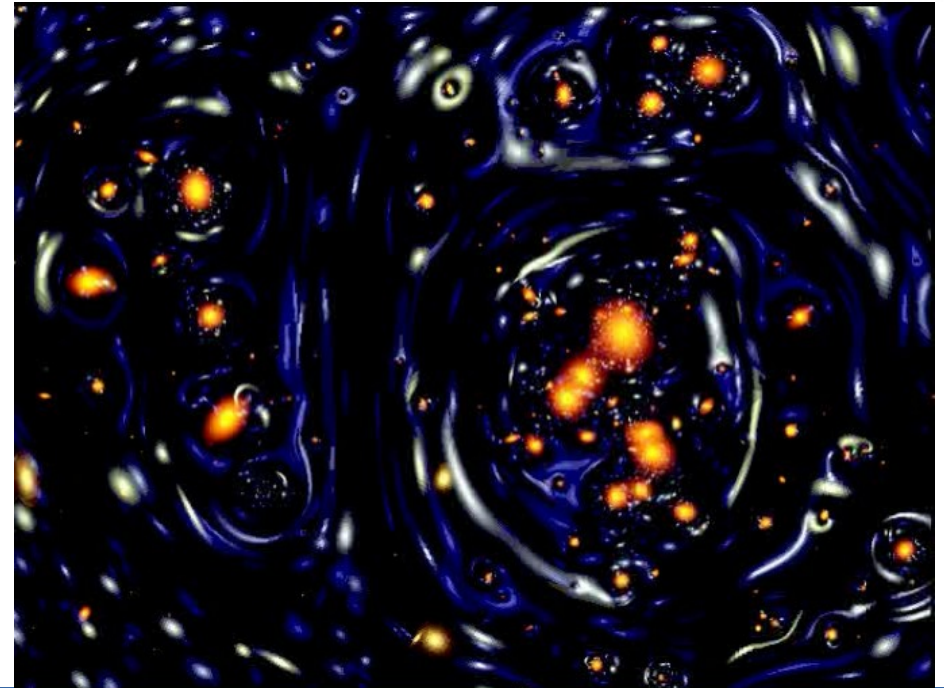
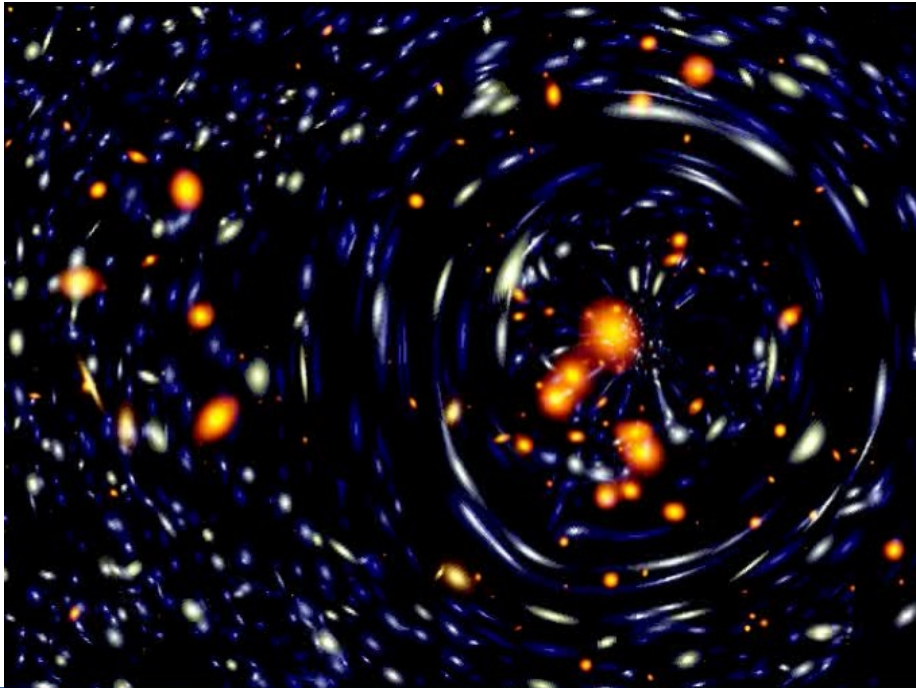
- Артур Едингтон - потврда Ајнштајнових предвиђања:

$\alpha_1 = 1''.98 \pm 0''.12$ и $\alpha_2 = 1''.61 \pm 0''.30$

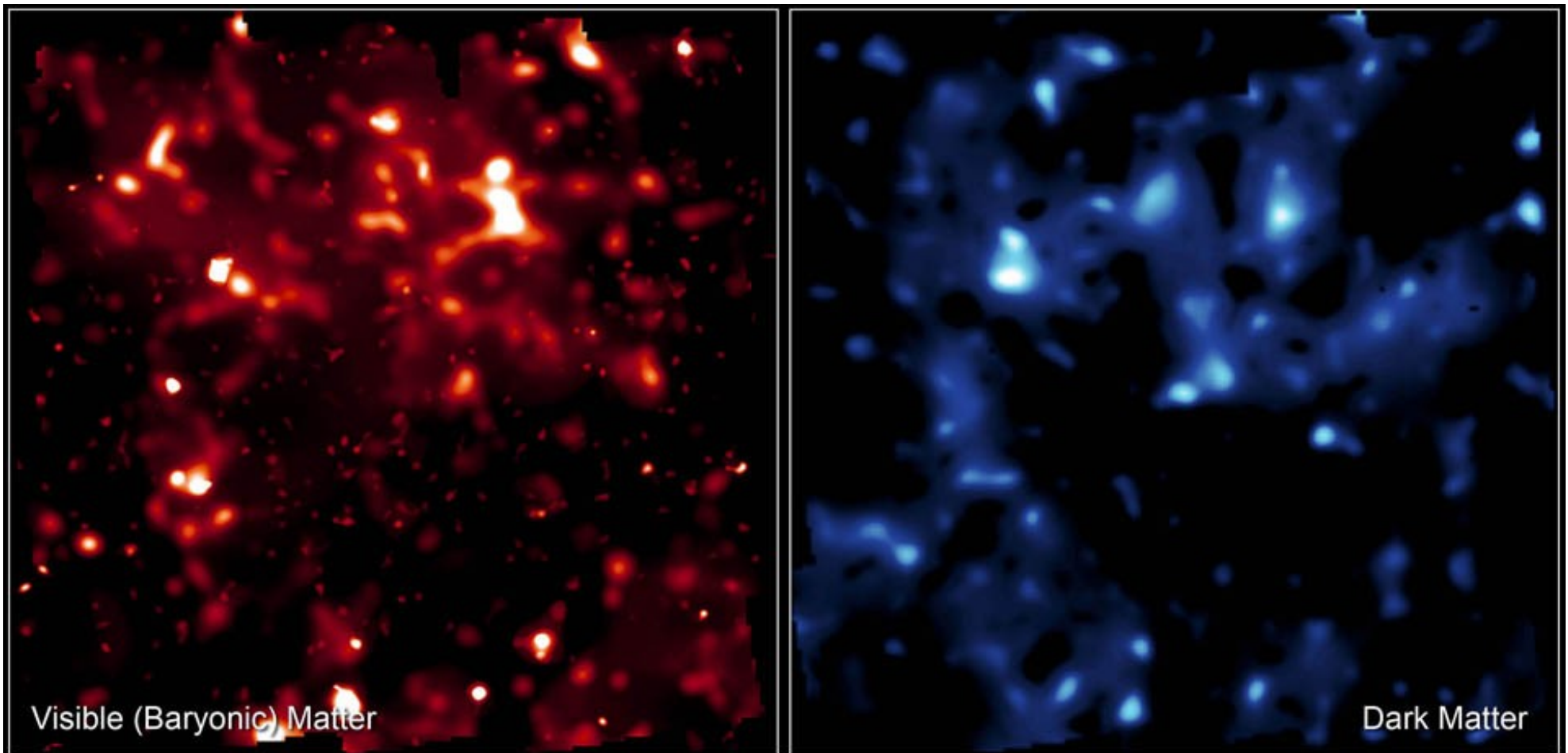
Детекција ТМ помоћу слабих гравитационих сочива



- Слаба гравитациона сочива: једини метод за директну детекцију ТМ



Просторна расподела видљиве и тамне материје



Distribution of Visible and Dark Matter • Cosmic Evolution Survey
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, and R. Massey (California Institute of Technology)

STScI-PRC07-01b

Галактичко јато 1E 0657-558 ("Bullet cluster"): први директан доказ постојања ТМ

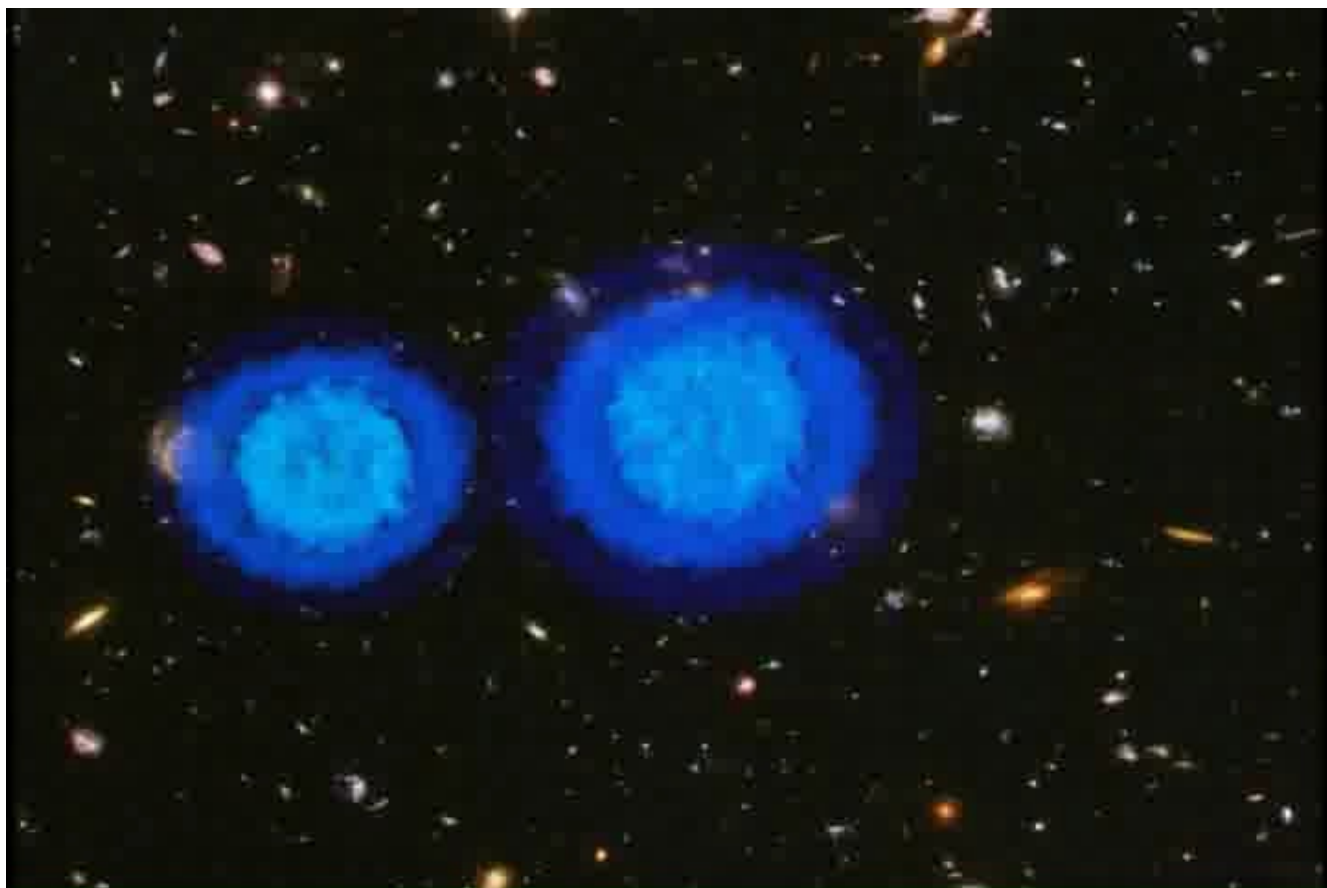
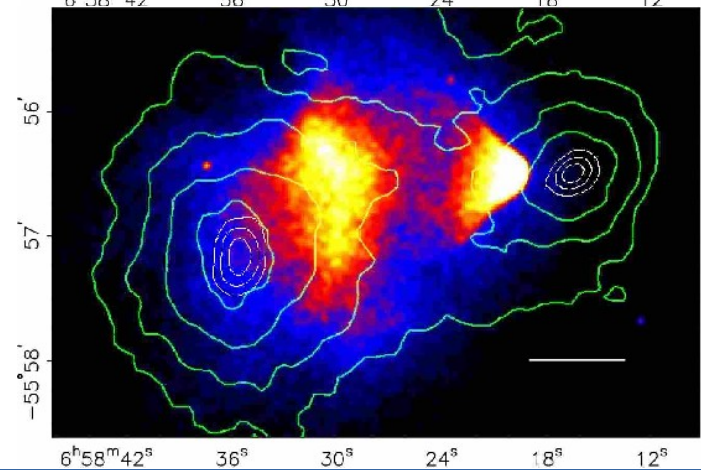
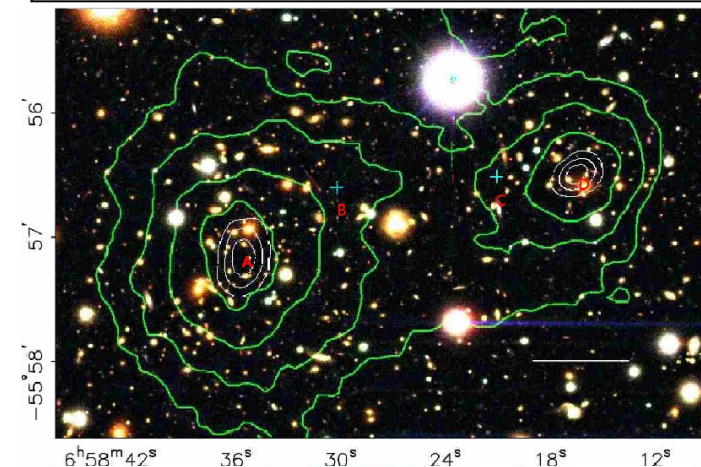
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 648:L109–L113, 2006 September 10

© 2006. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

A DIRECT EMPIRICAL PROOF OF THE EXISTENCE OF DARK MATTER¹

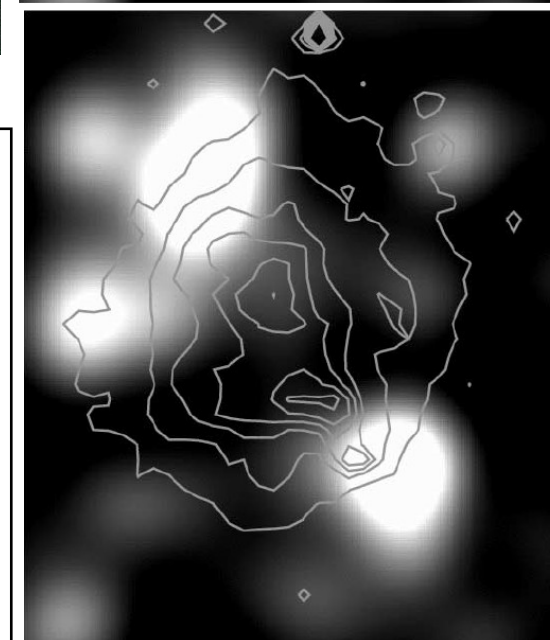
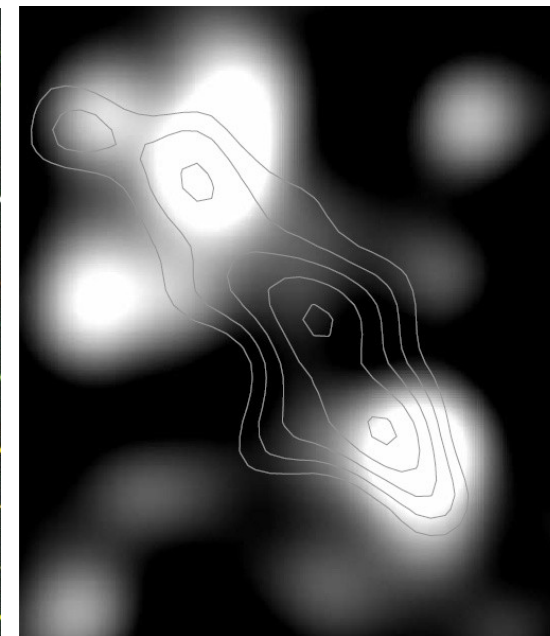
DOUGLAS CLOWE,² MARUŠA BRADAČ,³ ANTHONY H. GONZALEZ,⁴ MAXIM MARKEVITCH,^{5,6}
SCOTT W. RANDALL,⁵ CHRISTINE JONES,⁵ AND DENNIS ZARITSKY²

Received 2006 June 6; accepted 2006 August 3; published 2006 August 30



Супротан пример: галактичко јато Abell 520

- Такође судар галактичких јата али се, за разлику од 1E 0657-558, центар масе тамне материје поклапа са центром масе барионске материје



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 668:806–814, 2007 October 20
© 2007. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

A DARK CORE IN ABELL 520¹

ANDISHEH MAHDAVI, HENK HOEKSTRA, ARIF BABUL, AND DAVID D. BALAM
Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, Victoria, BC V8W 3P6, Canada

AND

PETER L. CAPAK
California Institute of Technology, MC 105-24, 1200 East California Boulevard, Pasadena, CA 91125

Received 2007 February 10; accepted 2007 June 18

ON DARK PEAKS AND MISSING MASS: A WEAK-LENSING MASS RECONSTRUCTION OF THE MERGING CLUSTER SYSTEM A520*

DOUGLAS CLOWE¹, MAXIM MARKEVITCH², MARUŠA BRADAČ³, ANTHONY H. GONZALEZ⁴, SUN MI CHUNG⁴,
RICHARD MASSEY⁵, AND DENNIS ZARITSKY⁶

¹ Department of Physics and Astronomy, Ohio University, 251B Clippinger Labs, Athens, OH 45701, USA; clowe@ohio.edu

² NASA Goddard Space Flight Center, Code 662, 8800 Greenbelt Road, Greenbelt, MD 20706, USA

³ Department of Physics, University of California, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA

⁴ Department of Astronomy, University of Florida, 211 Bryant Space Science Center, Gainesville, FL 32611, USA

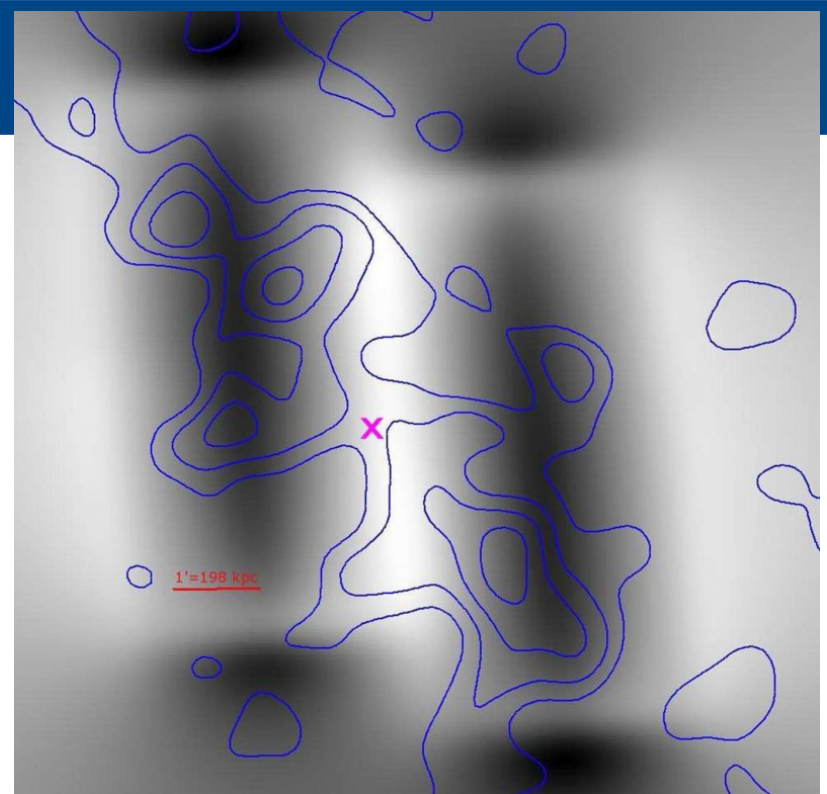
⁵ Department of Physics, Durham University, South Road, Durham DH1 3LE, UK

⁶ Steward Observatory, University of Arizona, 933 North Cherry Avenue, Tucson, AZ 85721, USA

Received 2012 May 8; accepted 2012 September 4; published 2012 October 8

ABSTRACT

Merging clusters of galaxies are unique in their power to directly probe and place limits on the self-interaction cross-section of dark matter. Detailed observations of several merging clusters have shown the intracluster gas to be displaced from the centroids of dark matter and galaxy density by ram pressure, while the latter components are spatially coincident, consistent with collisionless dark matter. This has been used to place upper limits on the dark matter particle self-interaction cross-section of order $1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. The cluster A520 has been seen as a possible exception. We revisit A520 presenting new *Hubble Space Telescope* Advanced Camera for Surveys mosaic images and a Magellan image set. We perform a detailed weak-lensing analysis and show that the weak-lensing mass measurements and morphologies of the core galaxy-filled structures are mostly in good agreement with previous works. There is, however, one significant difference: We do not detect the previously claimed “dark core” that contains excess mass with no significant galaxy overdensity at the location of the X-ray plasma. This peak has been suggested to be indicative of a large self-interaction cross-section for dark matter (at least $\sim 5\sigma$ larger than the upper limit of $0.7 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ determined by observations of the Bullet Cluster). We find no such indication and instead find that the mass distribution of A520, after subtraction of the X-ray plasma mass, is in good agreement with the luminosity distribution of the cluster galaxies. We conclude that A520 shows no evidence to contradict the collisionless dark matter scenario.



HUBBLE SPACE TELESCOPE/ADVANCED CAMERA FOR SURVEYS CONFIRMATION OF THE DARK SUBSTRUCTURE IN A520*

M. J. JEE¹, H. HOEKSTRA², A. MAHDAVI³, AND A. BABUL^{4,5}

¹ Department of Physics, University of California, Davis, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA; mjjee@physics.ucdavis.edu

² Leiden Observatory, Leiden University, 2311-EZ Leiden, The Netherlands

³ Department of Physics and Astronomy, San Francisco State University, San Francisco, CA 94131, USA

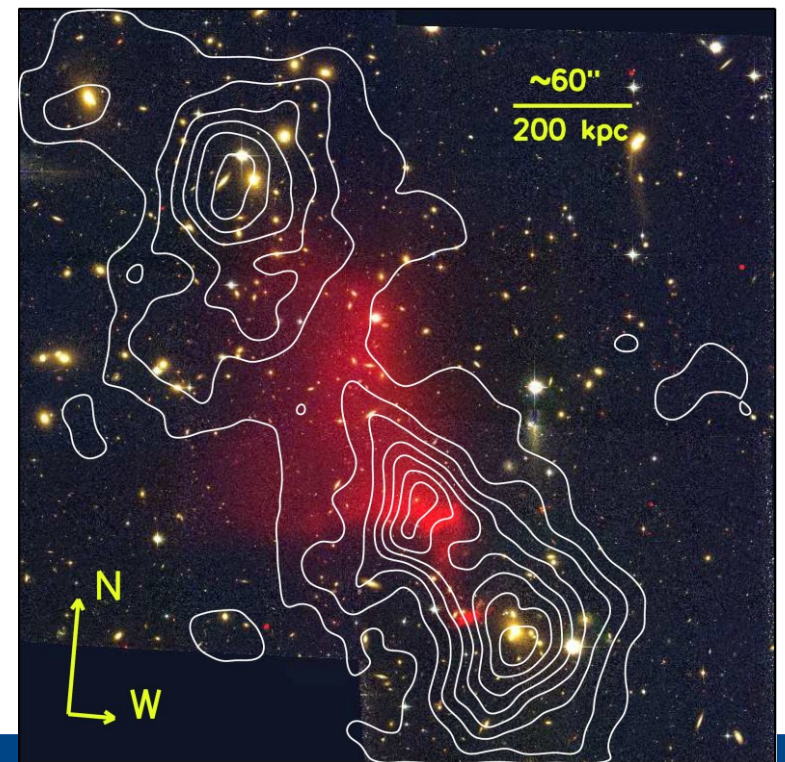
⁴ Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, Victoria, BC, V8W 2Y2, Canada

⁵ Kavli Institute for Theoretical Physics, Kohn Hall, University of California, Santa Barbara, CA 93106, USA

Received 2013 September 18; accepted 2014 January 15; published 2014 February 19

ABSTRACT

We present a weak-lensing study of the cluster A520 based on Advanced Camera for Surveys (ACS) data. The excellent data quality provides a mean source density of $\sim 109 \text{ arcmin}^{-2}$, which improves both resolution and significance of the mass reconstruction compared to a previous study based on Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) images. We take care in removing instrumental effects such as the charge trailing due to radiation damage of the detector and the position-dependent point-spread function. This new ACS analysis confirms the previous claims that a substantial amount of dark mass is present between two luminous subclusters where we observe very little light. The centroid of the dark peak in the current ACS analysis is offset to the southwest by $\sim 1'$ with respect to the centroid from the WFPC2 analysis. Interestingly, this new centroid is in better agreement with the location where the X-ray emission is strongest, and the mass-to-light ratio estimated with this centroid is much higher ($813 \pm 78 M_{\odot}/L_{R\odot}$) than the previous value; the aperture mass with the WFPC2 centroid provides a consistent mass. Although we cannot provide a definite explanation for the dark peak, we discuss a revised scenario, wherein dark matter with a more conventional range ($\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) of self-interacting cross-section can lead to the detection of this dark substructure. If supported by detailed numerical simulations, this hypothesis opens up the possibility that the A520 system can be used to establish a lower limit of the self-interacting cross-section of dark matter.



"Bullet cluster" као доказ за гравитацију са Јукава чланом?

The Bullet Cluster 1E0657-558 evidence shows modified gravity in the absence of dark matter

J. R. Brownstein^{1★} and J. W. Moffat^{2★}

Mon. Not. R. Astron. Soc. **382**, 29–47 (2007)

The weak field, point particle spherically symmetric acceleration law in MOG is obtained from the action principle for the relativistic equations of motion of a test particle in Moffat (2005, 2006a). The weak field point particle gravitational potential for a static spherically symmetric system consists of two parts:

$$\Phi(r) = \Phi_N(r) + \Phi_Y(r), \quad (1)$$

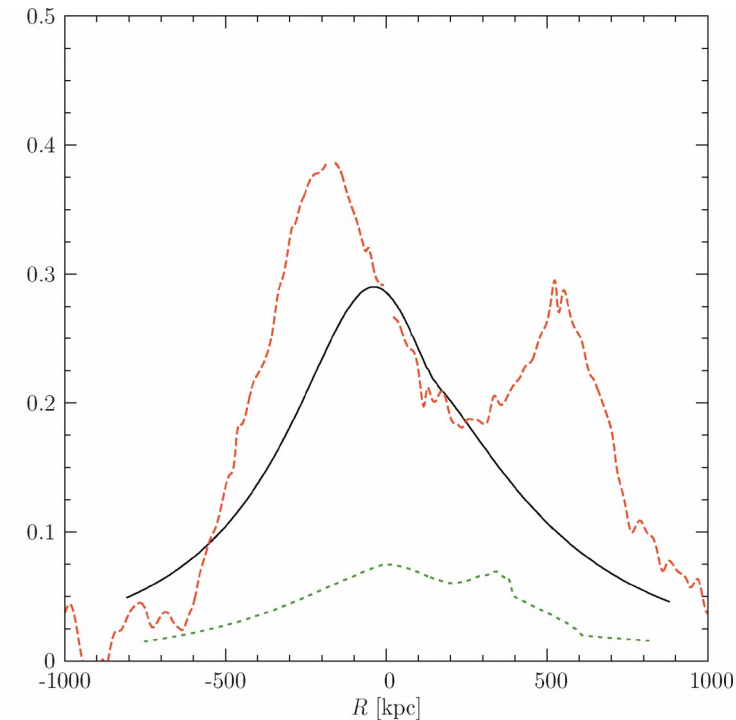
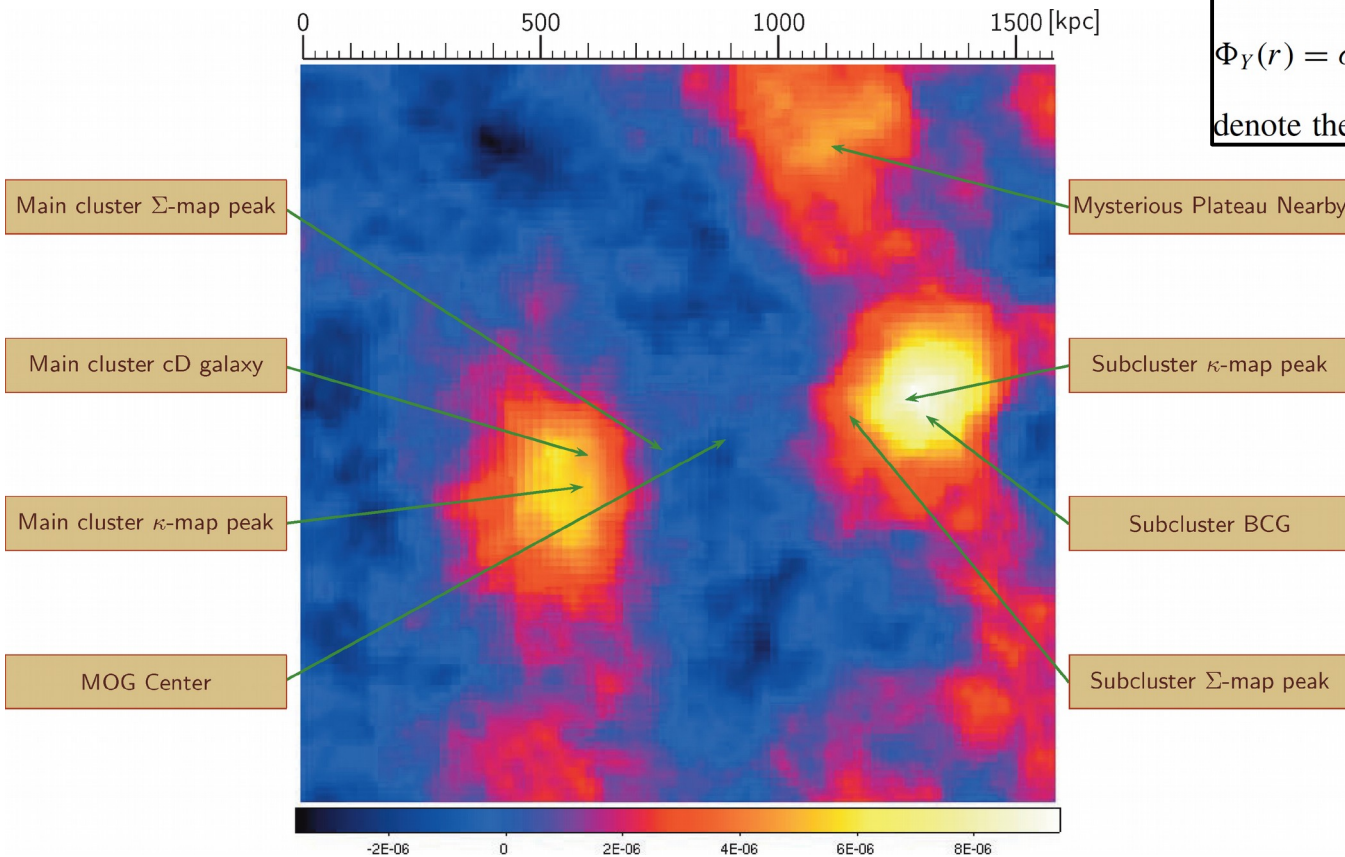
where

$$\Phi_N(r) = -\frac{G_\infty M}{r} \quad (2)$$

and

$$\Phi_Y(r) = \sigma \frac{\exp(-\mu r)}{r} \quad (3)$$

denote the Newtonian and Yukawa potentials, respectively.

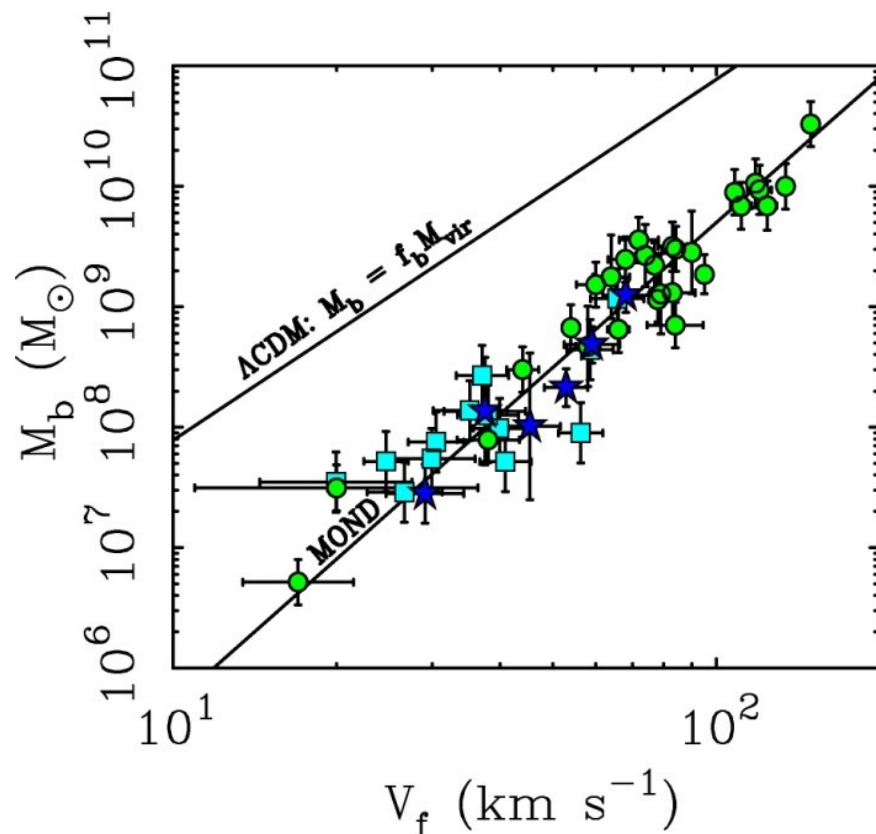
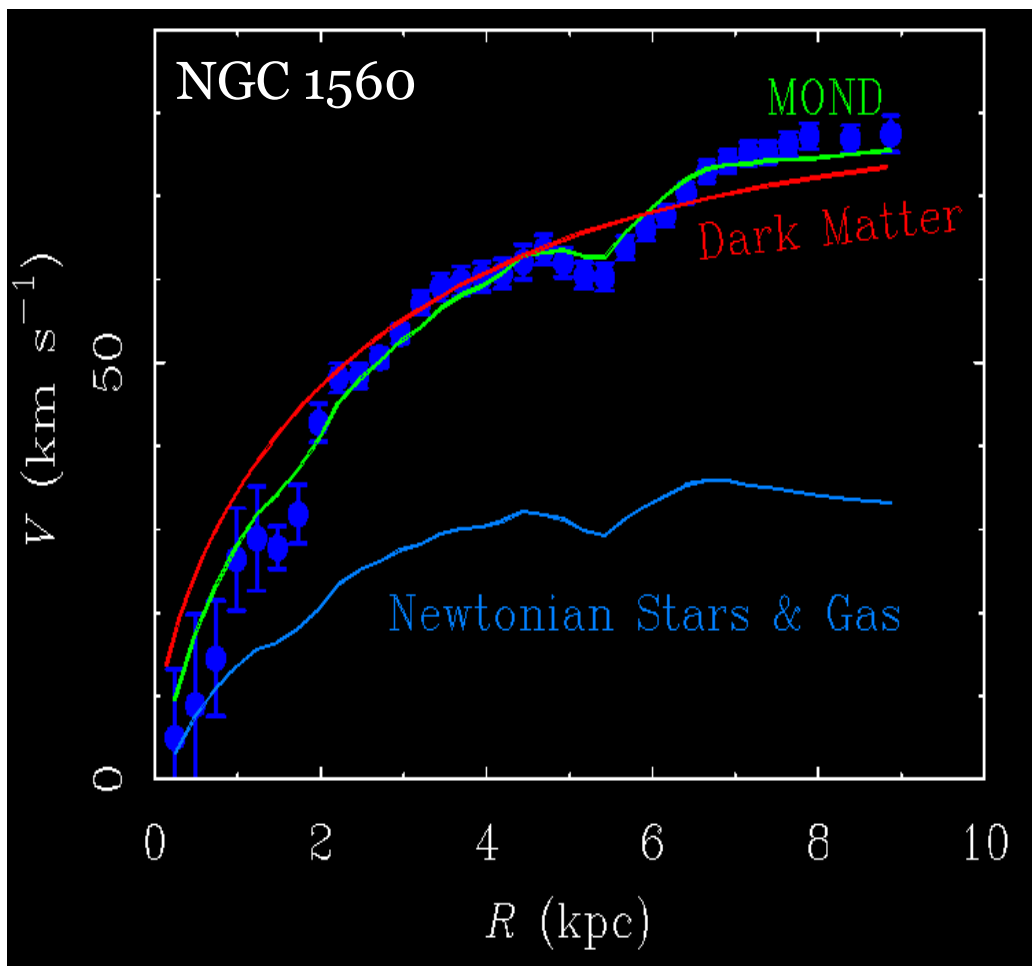


Модификувана Њутнова динамика (МОНД)

- Milgrom, 1983, ApJ, 270, 365:
- МОНД стране:
<http://astroweb.case.edu/ssm/mond/>

$$\vec{F} = m \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \vec{a} \quad \begin{cases} \mu(x) = 1 & \text{if } |x| \gg 1 \\ \mu(x) = x & \text{if } |x| \ll 1 \end{cases}$$

$$\frac{GMm}{r^2} = m \frac{\left(\frac{v^2}{r}\right)^2}{a_0} \Rightarrow v^4 = GMa_0$$



- МОНД код галактичких јата: приближно иста количина недетектоване и видљиве материје (много мање него у ΛCDM)

Барионска Тали-Фишера релација за галаксије богате гасом (McGaugh 2011, *PRL*, 106, 121303)

Проблеми: да ли је ТМ само гравитациони ефекат?

nature.com blogs

newsblog

Nature brings you breaking news from the world of science

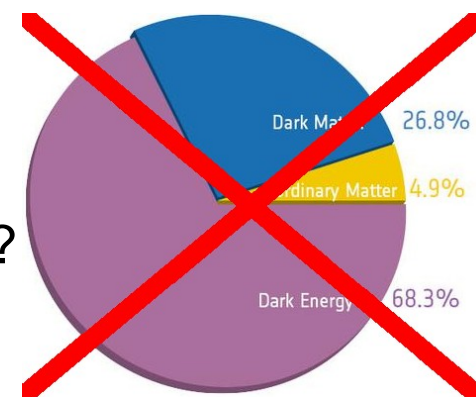


Cosmologist Priyamvada Natarajan of Yale University agrees ... McGaugh's work highlights a regularity in the behavior of galaxies that hasn't been explained yet by processes involving dark matter. "It reveals there are physical processes we don't understand," she says. These almost certainly involve **interaction between dark matter and normal matter** that can result in a deviation of the proportion of dark matter to ordinary matter from the cosmic average value of 5/6. "We don't fully understand how baryons [ordinary matter] and dark matter interplay."

- Да ли Λ CDM прецењује количину материје у космосу?
- Мање ТМ \Rightarrow мање ТЕ потребне за посматрано убрзано ширење свемира
- ТМ: гравитациони ефекат или материја сачињена од честица?
- Равне ротационе криве код спиралних галаксија указују на логаритамски потенцијал (Binney & Tremaine, 1987):

$$v_c^2(r) = r \cdot \frac{d\phi}{dr} = v_0^2 \quad \Rightarrow \quad \phi(r) \propto v_0^2 \ln r + const$$

- Њутновска граница једначина поља ОТР за $\Lambda \neq 0$ (Adler, Bazin & Schiffer, 1965): $\phi = -\frac{GM}{r} - \frac{\Lambda}{6}r^2$
- Други члан значајан само на великим растојањима



Могуће алтернативе за ТМ

- 1) Нарушење принципа еквиваленције између гравитационе и инертне масе
 - експериментално потврђено важење са $\eta \approx 10^{-13}$ (η - Етвешов параметар)
- 2) **Махов принцип**: утицај глобалне расподеле масе у космосу на дати систем

3) Теорије модификоване гравитације (МГ)

- Омогућавају фундаментални приступ за разлику од емпиријског МОНД-а
 - 1) Теорије са додатним пољима: скаларно-тензорске (Бранс-Дикеова), биметричке, тензорско-векторско-скаларне (ТеВеС - релативистички МОНД), ...
 - 2) Теорије чије једначине поља укључују изводе реда вишег од другог: $f(R)$
 - 3) Вишедимензионе теорије: Калуза-Клајнова, Рандал-Сундрумова, супергравитација, струне, ...
- **Проширене теорије** (заједнички назив за скаларно-тензорске и теорије четвртог реда): додају поправке и/или проширују ОТР

- **f(R) гравитација**:
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [f(R) + \mathcal{L}_m] \quad f(R) = R + 2\Lambda \Rightarrow GR + \Lambda$$

Planck 2015 results. XIV. Dark energy and modified gravity

Planck Collaboration: P. A. R. Ade⁹⁰, N. Aghanim⁶³, M. Arnaud⁷⁷, M. Ashdown^{73,7}, J. Aumont⁶³, C. Baccigalupi⁸⁹, A. J. Banday^{101,10}

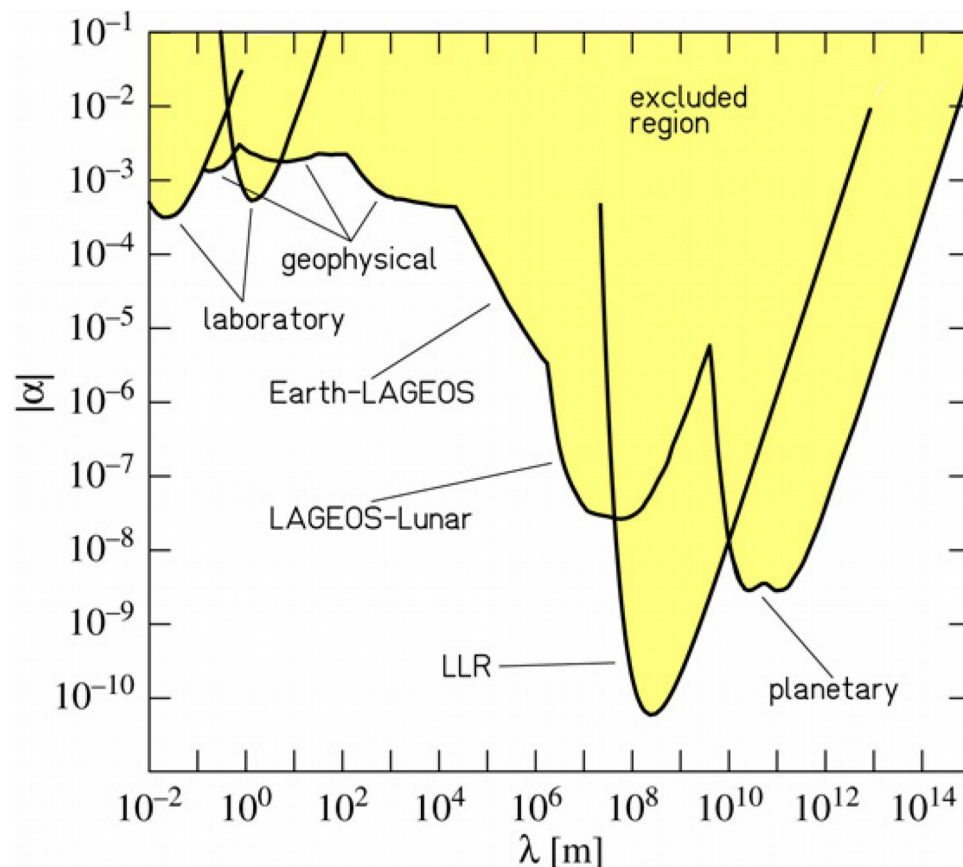
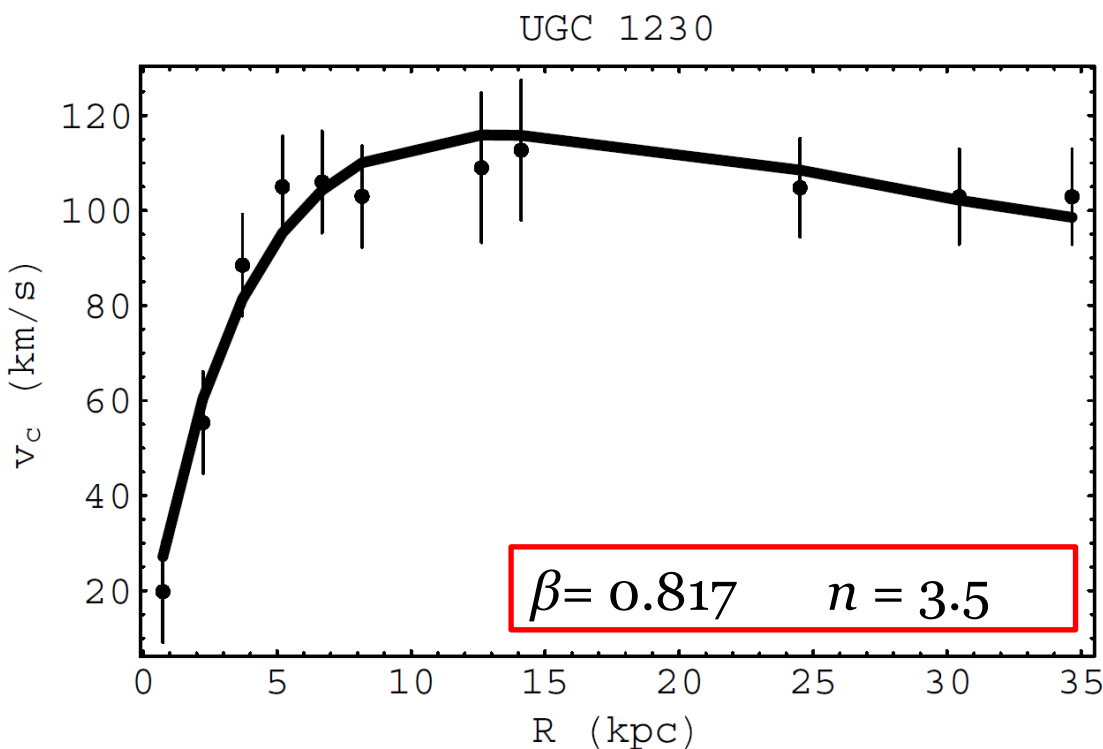
R^n и гравитација са Јукава чланом

1) $f(R) = f_0 R^n \Rightarrow R^n$ гравитациони потенцијал: $\Phi(r) = -\frac{Gm}{2r} \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^\beta \right]$

$$\beta = \frac{12n^2 - 7n - 1 - \sqrt{36n^4 + 12n^3 - 83n^2 + 50n + 1}}{6n^2 - 4n + 2}$$

2) $f(R) \simeq f_0 + f_1 R + f_2 R^2 + f_3 R^3 + \dots \Rightarrow$ Гравитациони потенцијал са Јукава чланом (Carozziello et al. 2009, MNRAS, 394, 947):

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



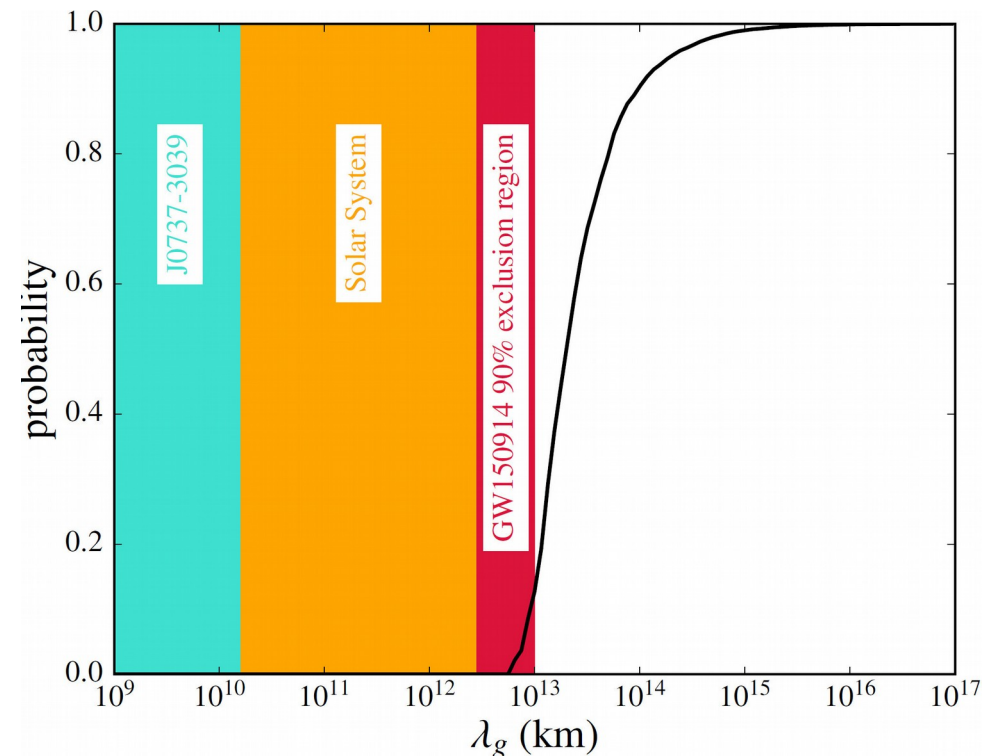
Adelberger et al. 2009, PrPNP, 62, 102

Tests of general relativity with GW150914 (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

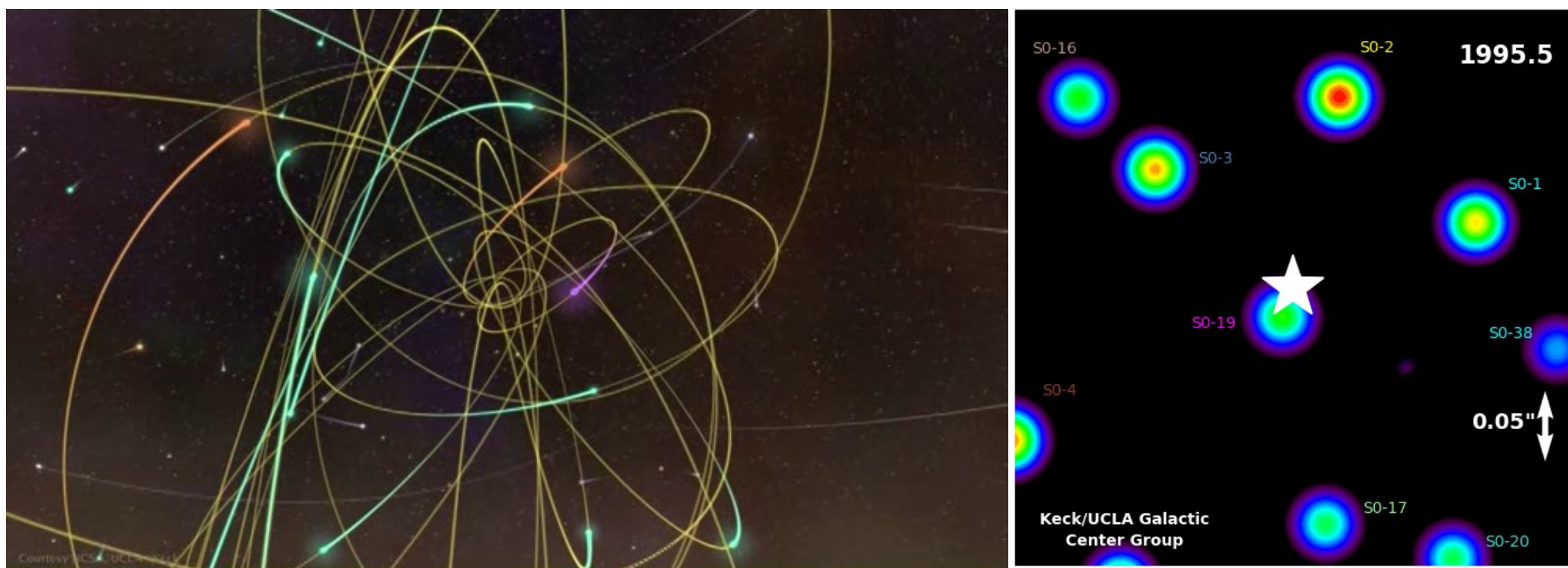
The LIGO detection of GW150914 provides an unprecedented opportunity to study the two-body motion of a compact-object binary in the large velocity, highly nonlinear regime, and to witness the final merger of the binary and the excitation of uniquely relativistic modes of the gravitational field. We carry out several investigations to determine whether GW150914 is consistent with a binary black-hole merger in general relativity. We find that the final-remnant's mass and spin, determined from the inspiral and post-inspiral phases of the signal, are mutually consistent with the binary black-hole solution in general relativity. The data following the peak of GW150914 are consistent with the least-damped quasi-normal-mode inferred from the mass and spin of the remnant black hole. By using waveform models that allow for parameterized general-relativity violations during the inspiral and merger phases, we perform quantitative tests on the gravitational-wave phase in the dynamical regime and, bound, for the first time several high-order post-Newtonian coefficients. We constrain the graviton Compton wavelength in a hypothetical theory of gravity in which the graviton is massive and place a 90%-confidence lower bound of 10^{13} km. Within our statistical uncertainties, we find no evidence for violations of general relativity in the genuinely strong-field regime of gravity.

Constraining the graviton Compton wavelength. Since the 1970s, there have been attempts to construct theories of gravity mediated by a graviton with a non-zero mass. Those attempts have led to conceptual difficulties, some of which have been addressed, circumvented or overcome, but others remain open (see Ref. [86] and references therein). Here, we take a phenomenological approach and consider a hypothetical massive-graviton theory in which, due to a modification of the dispersion relation, GWs travel at a speed different from the speed of light.

In GR, gravitons are massless and travel at the speed of light $v_g = c$. In a hypothetical massive graviton theory the dispersion relation can be modified to $E^2 = p^2c^2 + m_g^2c^4$ where E is the graviton energy, p the momentum, and m_g is the graviton rest mass related to the graviton Compton wavelength as $\lambda_g = h/(m_gc)$ with h the Planck constant. Thus, we have $v_g^2/c^2 \equiv c^2p^2/E^2 = 1 - h^2c^2/(\lambda_g^2E^2)$, and the massive graviton propagates at an energy (or frequency) dependent speed. In such a massive graviton theory the Newtonian potential is altered by a Yukawa-type correction: $\varphi(r) \equiv (GM/r)[1 - \exp(-r/\lambda_g)]$.



Звездано јато Sgr A* у галактичком центру (ГЦ)

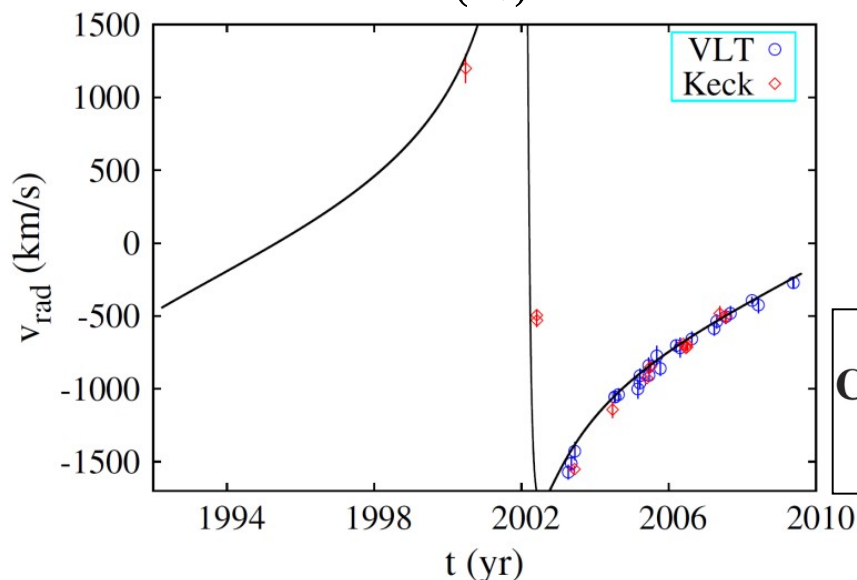
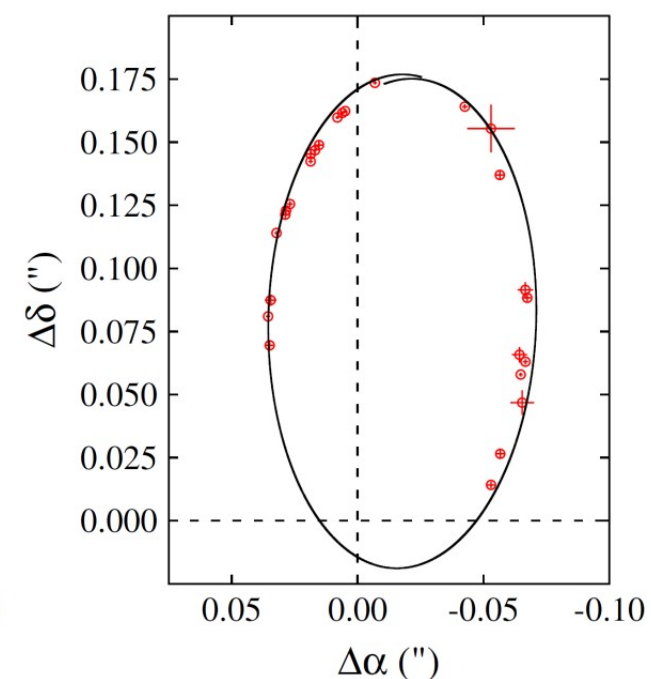
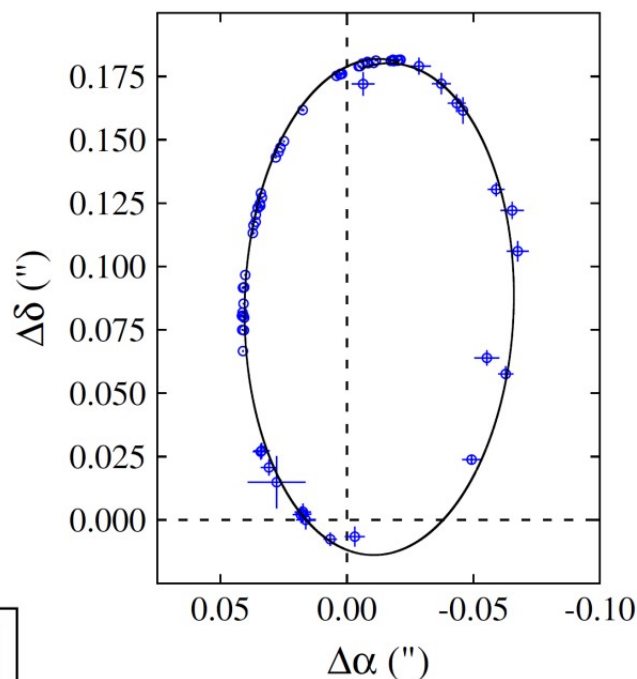
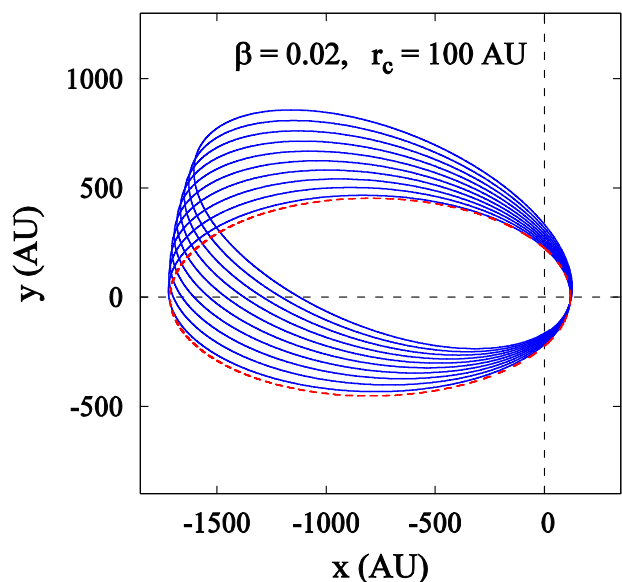


- S-звезде се крећу великим брзинама ($v > 1000 \text{ km/s}$) и по веома елиптичним орбитама око централне СМЦР Млечног пута (Eckart & Genzel, 1996, Nature, 383, 415)
- Астрометријска посматрања:
 - 1) NTT/VLT: Gillessen et al. 2009, ApJ, 692, 1075
 - 2) Keck: Ghez et al. 2008, ApJ, 689, 1044

Објављени резултати I

1) R^n гравитација: $\Phi(r) = -\frac{GM}{2r} \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^\beta \right]$

- Поређење посматране и симулиране орбите S2 звезде у R^n гравитацији:



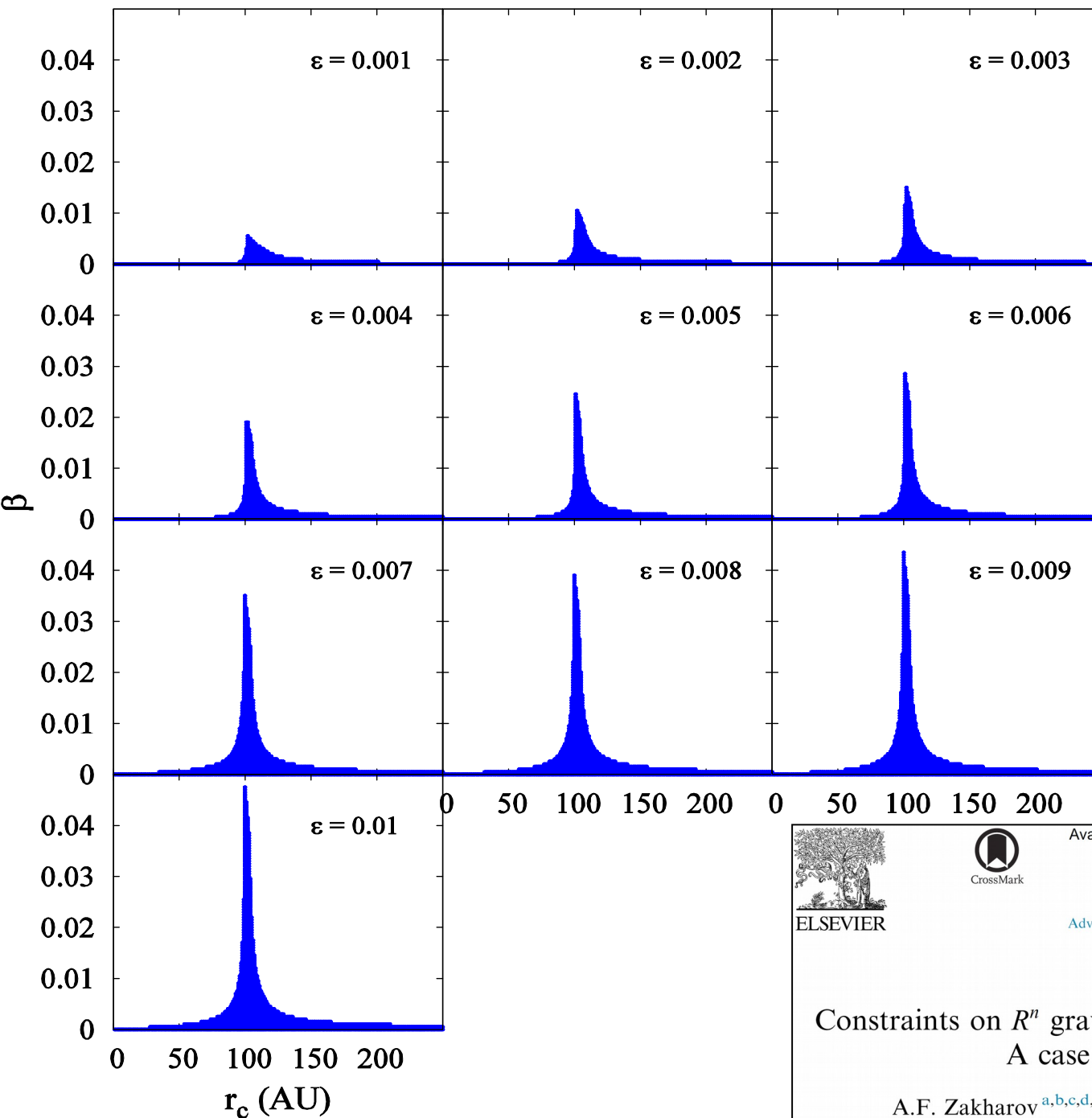
- $\beta = 0.01; r_c = 100 \text{ AU}$
- Прецесија: $\approx -1^\circ$ по орбиталном периоду

PHYSICAL REVIEW D **85**, 124004 (2012)

Constraints on R^n gravity from precession of orbits of S2-like stars

D. Borka,^{1,*} P. Jovanović,² V. Borka Jovanović,¹ and A. F. Zakharov^{3,4}

Објављени резултати II



Зависност параметара R^n гравитације од астрометријске прецизности

- Двокомпоненти модел за расподелу масе у ГЦ (Genzel et al. 2003, ApJ, 594, 812): СМЦР + проширена расподела (за звездано јато и ТМ)

$$\rho(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha},$$

$$\alpha = \begin{cases} 2.0 \pm 0.1, & r \geq r_0 \\ 1.4 \pm 0.1, & r < r_0 \end{cases}$$



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Advances in Space Research 54 (2014) 1108–1112

**ADVANCES IN
SPACE
RESEARCH**
(a COSPAR publication)

www.elsevier.com/locate/asr

Constraints on R^n gravity from precession of orbits of S2-like stars:
A case of a bulk distribution of mass

A.F. Zakharov^{a,b,c,d,e,*}, D. Borka^f, V. Borka Jovanović^f, P. Jovanović^g

Објављени резултати III

- Угао орбиталне прецесије у R^n гравитацији:

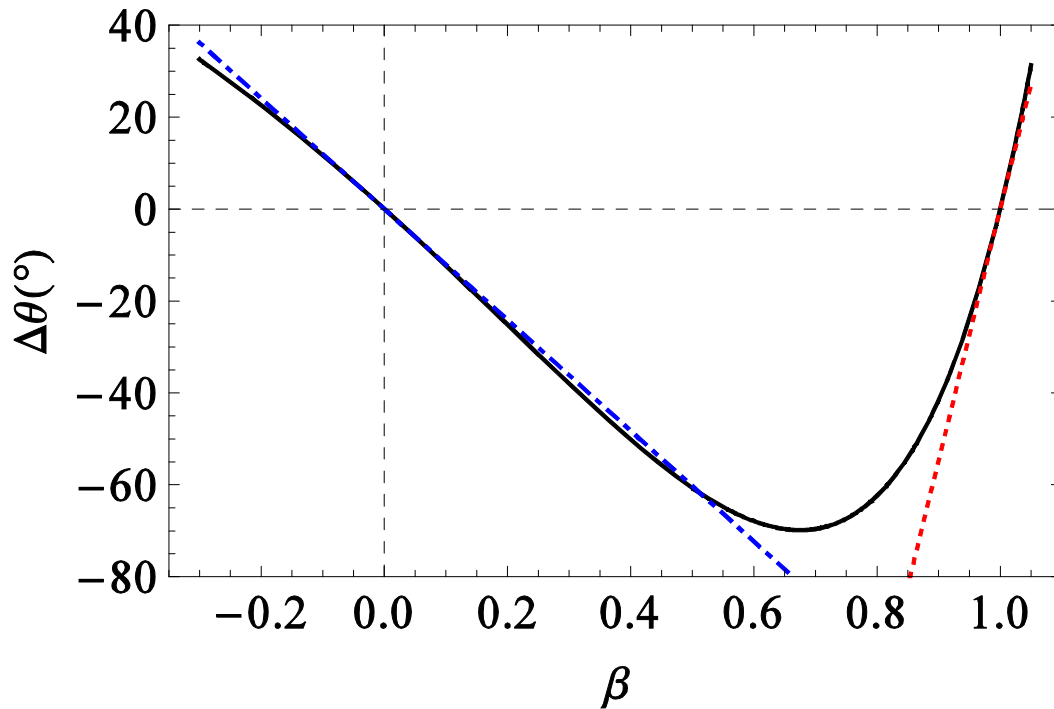
$$\Delta\theta = \frac{\pi}{2} \beta (\beta - 1) \left(\frac{a(1 - e^2)}{r_c} \right)^\beta \times {}_2F_1 \left(\frac{\beta + 1}{2}, \frac{\beta + 2}{2}; 2; e^2 \right),$$

$$\beta \approx 0$$

$$\Delta\theta = \frac{\pi^{rad} \beta (\sqrt{1 - e^2} - 1)}{e^2}$$

$$\beta \approx 1$$

$$\Delta\theta = \frac{\pi^{rad} a (\beta - 1) (\sqrt{1 - e^2} - 1 + e^2)}{r_c e^2}$$



β	$\Delta\theta^\circ$
0.005	-0.602
0.01	-1.203
0.015	-1.802
0.02	-2.400
0.025	-2.997
0.03	-3.592
0.035	-4.186
0.040	-4.779
0.045	-5.666

- Обе, R^n гравитација и проширена маса изазивају ретроградну прецесију

Објављени резултати IV

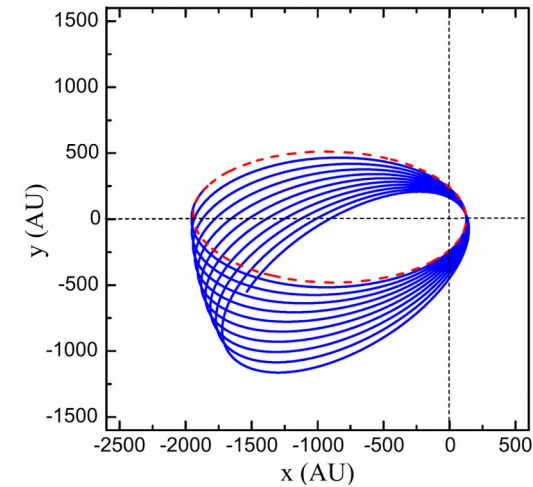
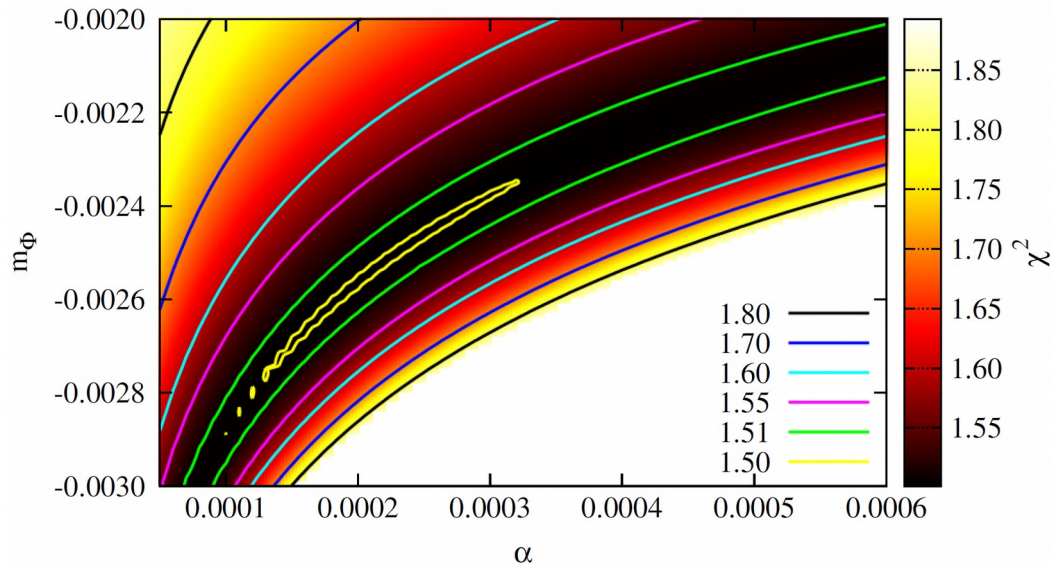
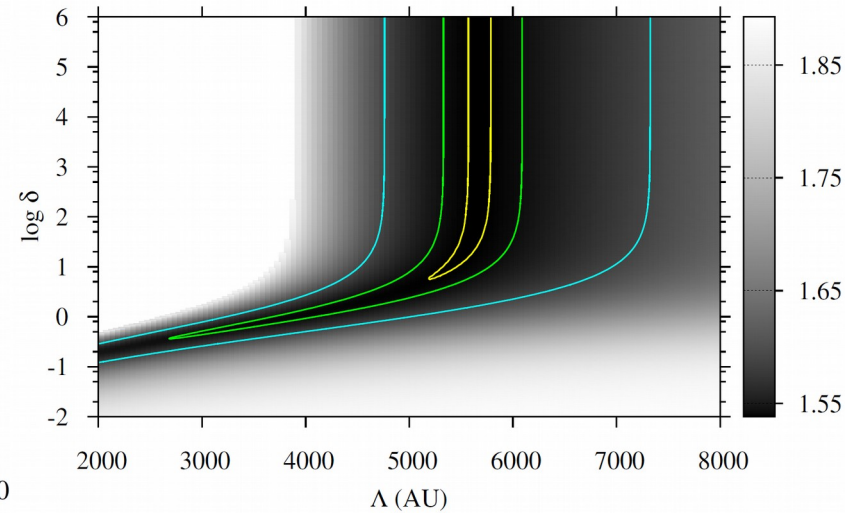
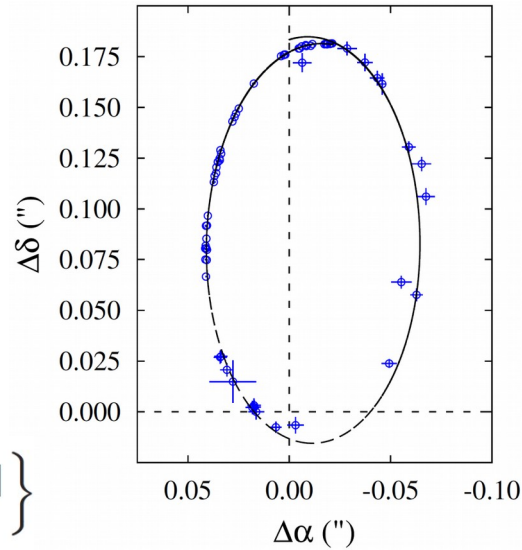
2. Гравитација са Yukawa

чланом:

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

3. Сандерсов потенцијал (Sanders, 1990, A&AR, 2, 1):

$$\Phi_{ST}(\mathbf{x}) = -\frac{G_{\infty}M}{|\mathbf{x}|} \left\{ 1 + \alpha e^{-\sqrt{1-3\alpha m_{\phi}}|\mathbf{x}|} \right\}$$



PHYSICAL REVIEW D **90**, 044052 (2014)

Constraining extended gravity models by S2 star orbits around the Galactic Centre

S. Capozziello,^{1,2,3,*} D. Borka,⁴ P. Jovanović,⁵ and V. Borka Jovanović⁴

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

Constraining the range of Yukawa gravity interaction from S2 star orbits

D. Borka,^{a,1} P. Jovanović,^b V. Borka Jovanović^a and A.F. Zakharov^{c,d,e}

Објављени резултати V

the hybrid metric-Palatini

gravity theory proposed in [48, 50], where the action is given by

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [R + f(\mathcal{R}) + 2\kappa^2 \mathcal{L}_m] . \quad (2)$$

where $\kappa^2 \equiv 8\pi G$, R is the Einstein-Hilbert term, $\mathcal{R} \equiv g^{\mu\nu} \mathcal{R}_{\mu\nu}$ is the Palatini curvature

In the weak field limit and far from the sources, the scalar field behaves as $\phi(r) \approx \phi_0 + (2G\phi_0 M/3r)e^{-m_\phi r}$; the effective mass is defined as

$$m_\phi^2 \equiv (2V - V_\phi - \phi(1 + \phi)V_{\phi\phi})/3 \Big|_{\phi=\phi_0} , \quad (23)$$

where ϕ_0 is the amplitude of the background value of ϕ .

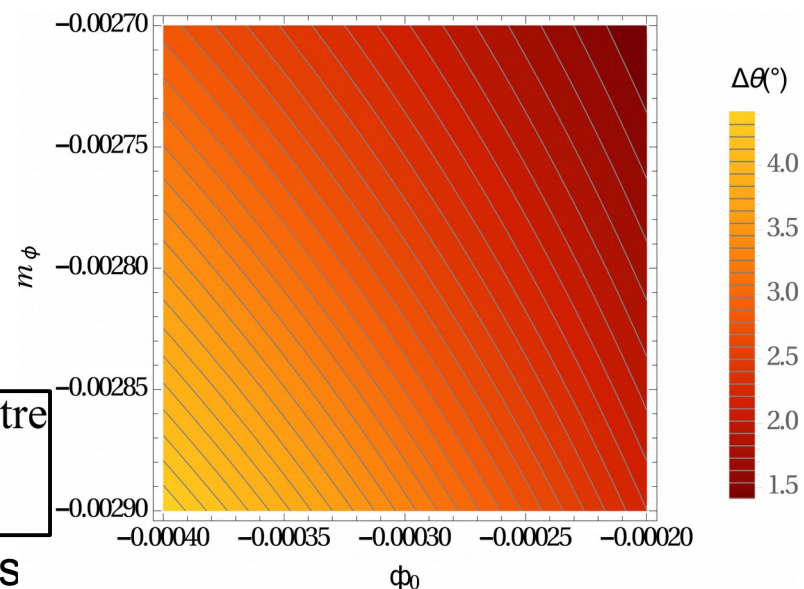
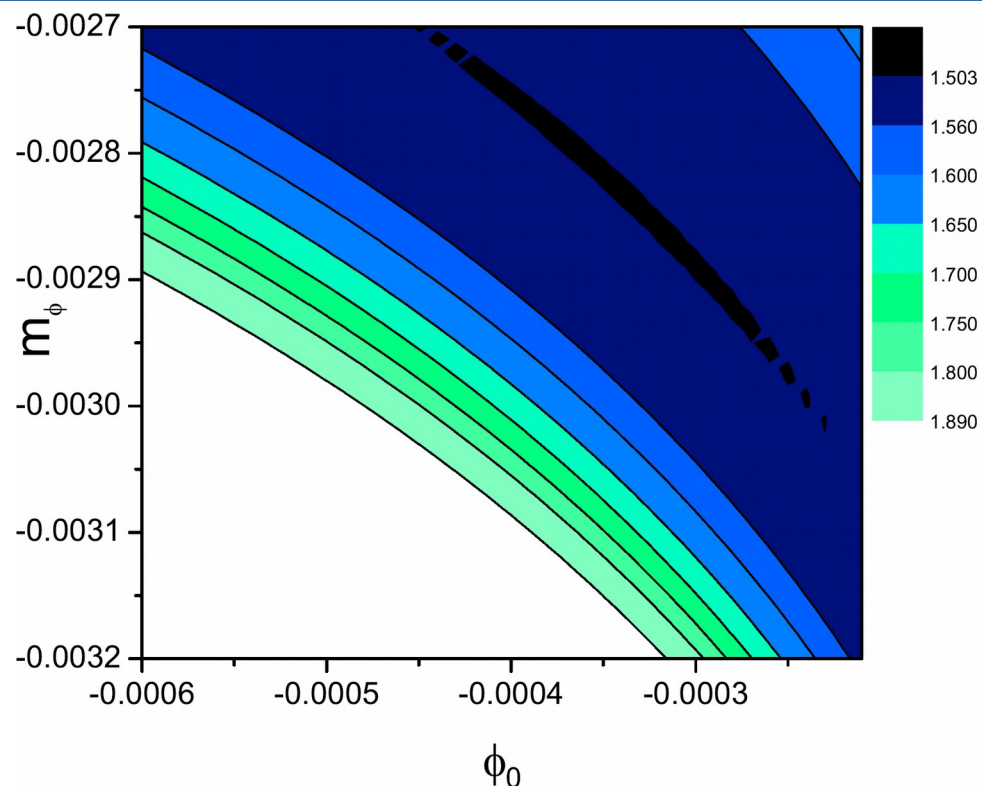
$$\Phi(r) = -\frac{G}{1 + \phi_0} [1 - (\phi_0/3)e^{-m_\phi r}] M/r.$$

The absolute minimum of the reduced χ^2 ($\chi^2 = 1.503$) is obtained for $\phi_0 = -0.00033$ and $m_\phi = -0.0028$, respectively.

Probing hybrid modified gravity by stellar motion around Galactic Centre

D. Borka^a, S. Capozziello^{b,c,d}, P. Jovanović^e, V. Borka Jovanović^a

2016, arXiv:1504.07832, прихваћено у "Astroparticle Physics



Нови резултати I

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

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

а ефективни гравитациони потенцијал има Yukawa облик:

$$\propto r^{-1} \exp(-r/\lambda_g),$$

где је λ_g Комптонова таласна дужина гравитона, а његова маса је (Will, 1998, PRD, 57, 2061): $m_g = hc/\lambda_g$

- χ^2 тест за оцену фитова орбите S2 звезде у Yukawa гравитацији
- Резултати у складу са LIGO:
 $\lambda_g > 4.3 \times 10^{11} \text{ km} \Rightarrow$
 $m_g < 2.9 \times 10^{-21} \text{ eV}$

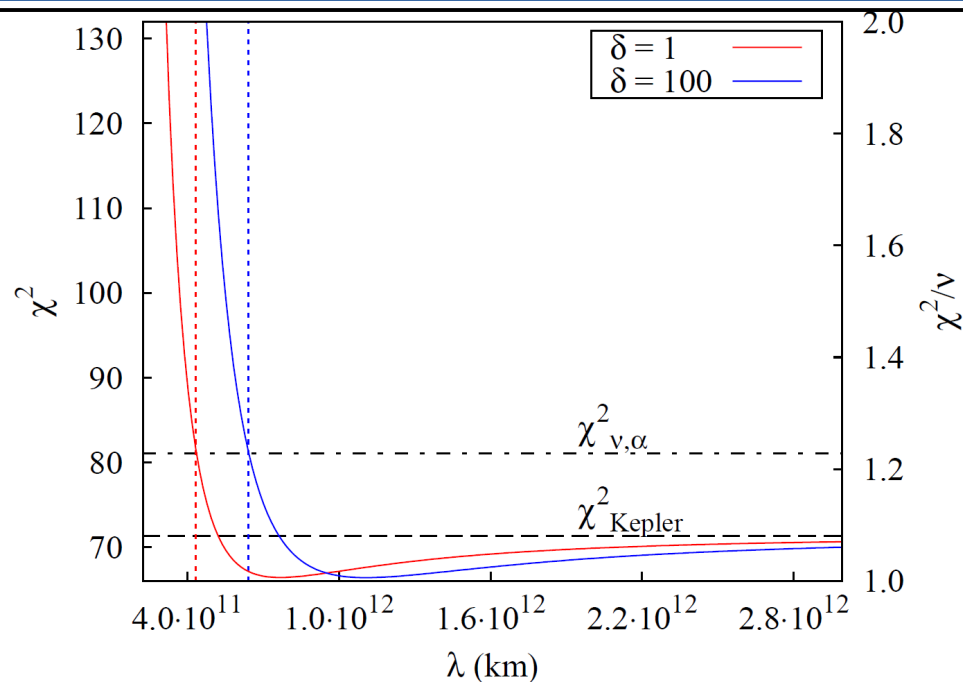


FIG. 1: χ^2 (solid lines) as a function of Yukawa range of interaction λ , i.e. the graviton Compton wavelength λ_g , obtained from the fits of NTT/VLT observations of S2 star [33] using the gravity potential (1) for $\delta = 1$ (red) and $\delta = 100$ (blue). For comparison, the value of the Keplerian fit $\chi_{\text{Kepler}}^2 = 71.34$ is also denoted by the horizontal dashed line. The critical value for $\nu = 66$ degrees of freedom and $\alpha = 0.1$ significance level, $\chi_{\nu,\alpha}^2 = 81.08$, is presented by the horizontal dash-dotted line, and the upper bounds λ_x of the corresponding exclusion regions for λ_g by the vertical dotted lines. The values $\lambda_g < \lambda_x$ can be excluded with 90% probability.

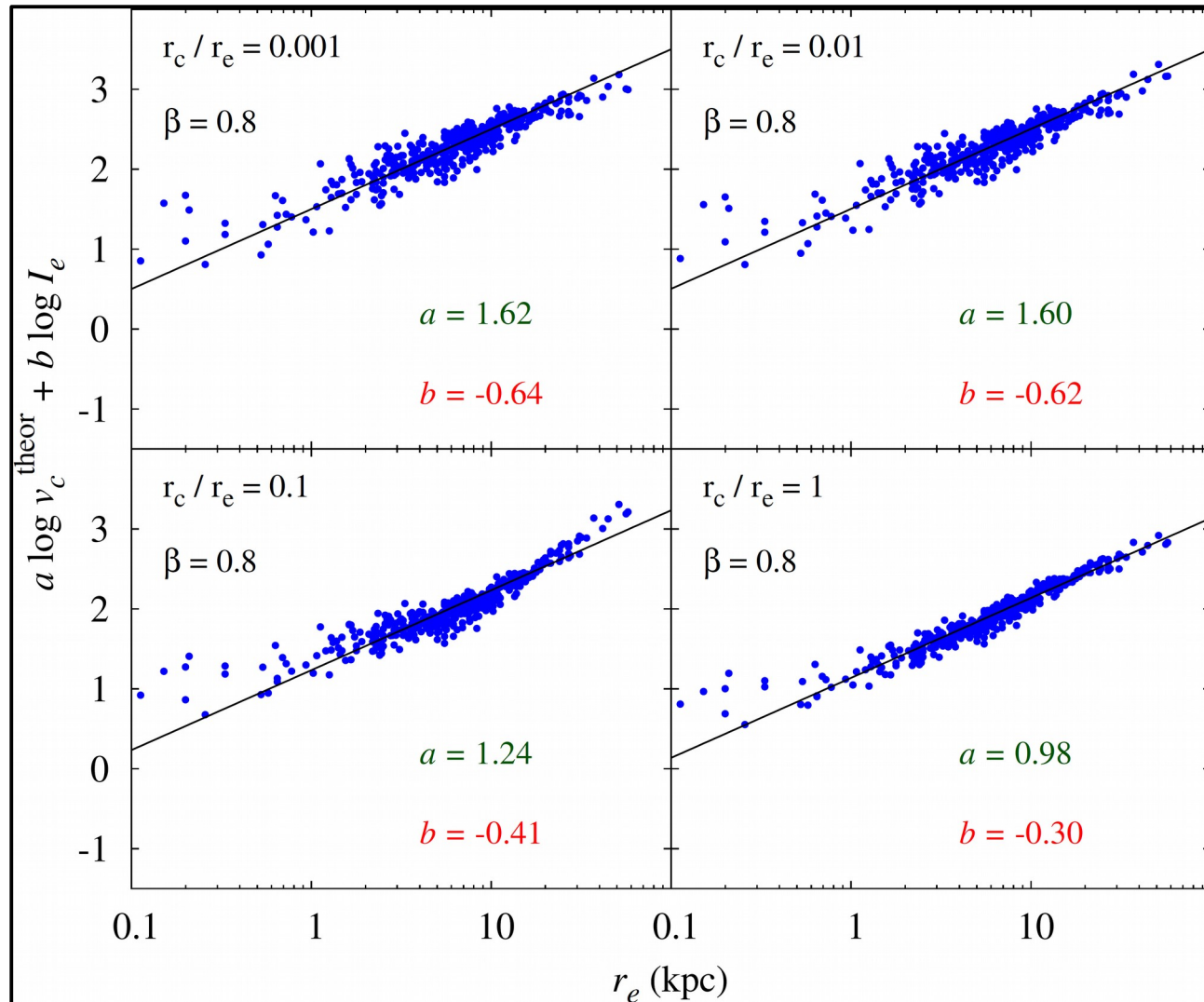
**Bounding the graviton mass with observations of S2 like stars
near the Galactic Center**

Alexander F. Zakharov^{1,2,3,4,*}, Predrag Jovanović⁵, Duško Borka⁶, Vesna Borka Jovanović⁶

Нови резултати II

- фундаментална равна (ФР) елиптичних галаксија је емпиријска релација:

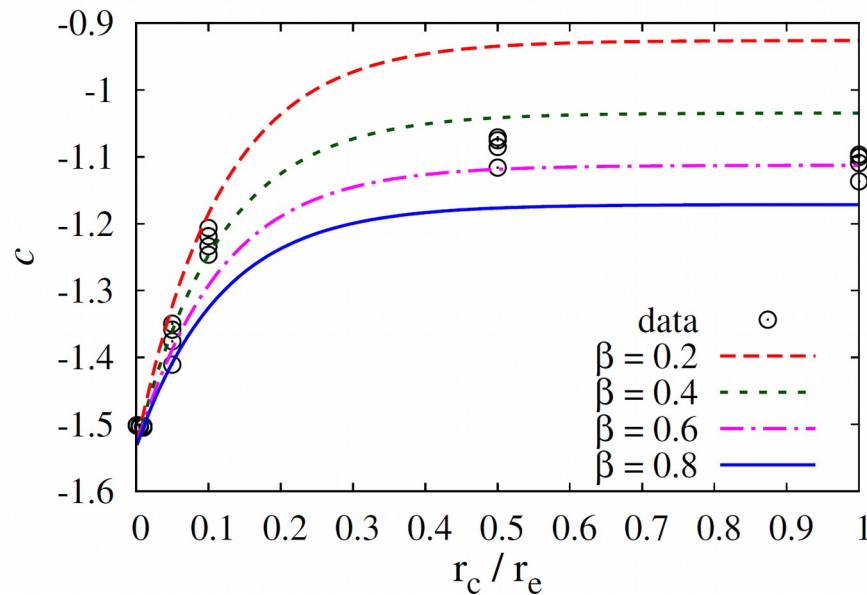
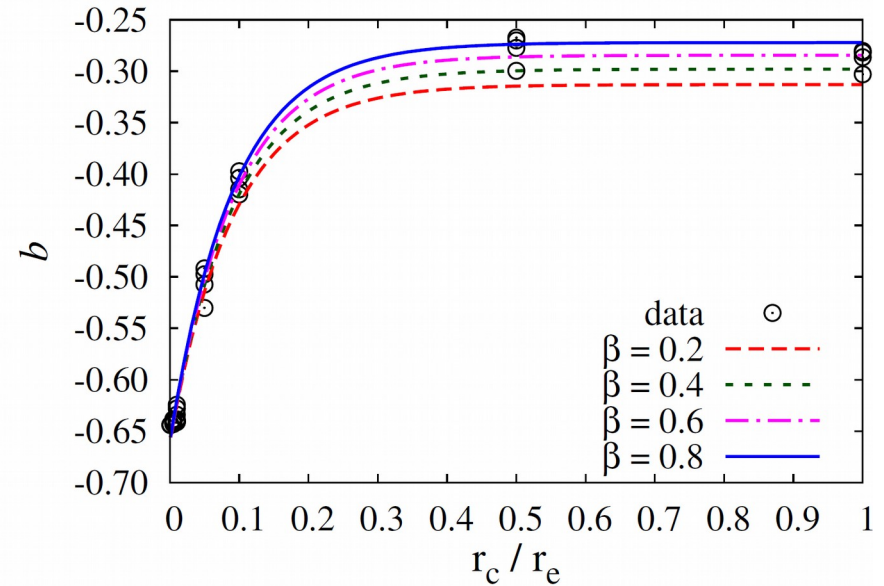
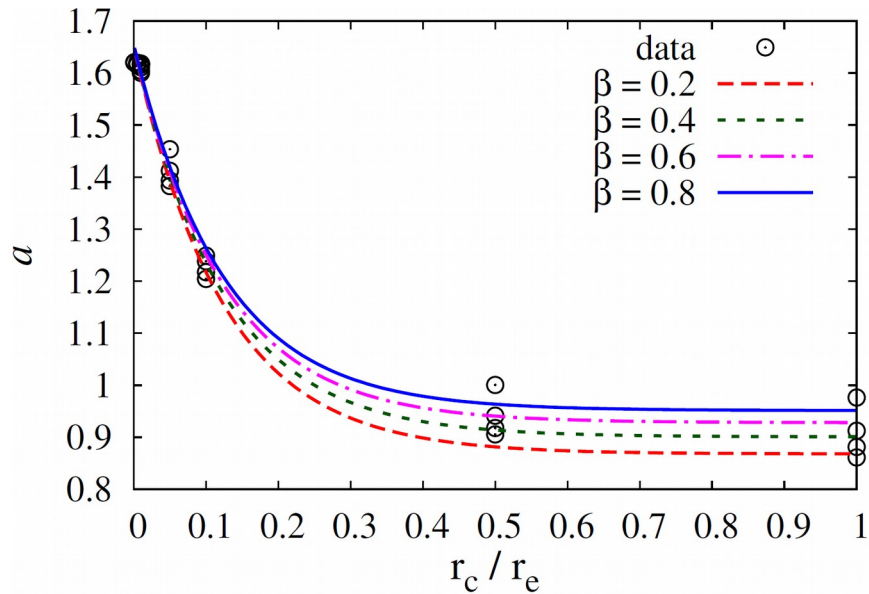
$$\log r_e = a \log \sigma_0 + b \log I_e + c$$
- r_e - ефективни радијус унутар којег је садржана половина луминозности галаксије, σ_0 - централна дисперзија брзине, I_e - средњи површински сјај унутар r_e
- објашњење ФР помоћу R^n гравитације: веза између њихових параметара
- посматрања: Burstein et al. 1997, AJ 114, 1365
- R^n корекциони члан за сферно симетричне проширене системе: Capozziello et al. 2007, MNRAS 375, 1423



Recovering the fundamental plane of galaxies by $f(R)$ gravity

V. Borka Jovanović,^{1,*} S. Capozziello,^{2,3,4} P. Jovanović,⁵ and D. Borka¹

Нови резултати III



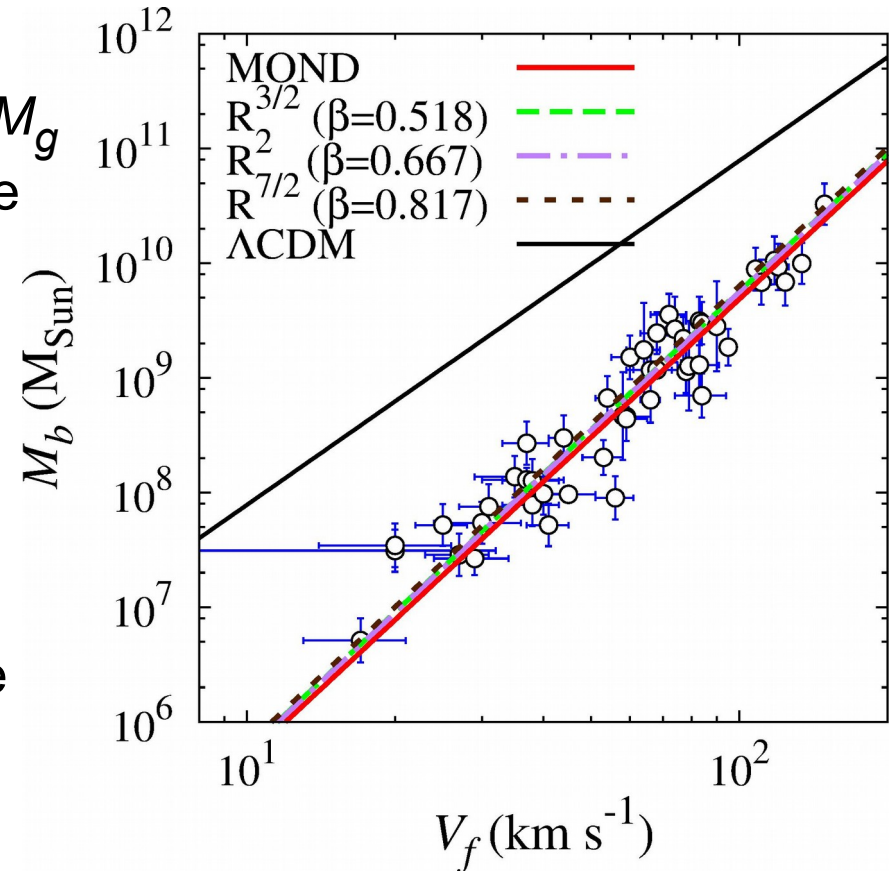
- R^n гравитација на природан начин објашњава ФР елиптичних галаксија

Нови резултати IV

- Барионска Тали-Фишера релација (БТФР) спиралних галаксија је емпиријска релација између барионске масе галаксије $M_b = M_* + M_g$ (маса звезда + маса гаса) и њене константне ротационе брзине v_f
- МОНД: $M_b = A v_f^4$, $A = 47 \pm 6 M_\odot \text{ km}^{-4} \text{ s}^4$
- Λ CDM: $M_b = 0.17 M_{\text{vir}}$,
 $M_{\text{vir}} = (4.6 \times 10^5 M_\odot \text{ km}^{-3} \text{ s}^3) V_{\text{vir}}^3$
- Посматрања: McGaugh, 2012, AJ. 143, 40
- Објашњење БТФР помоћу R^n гравитације
- Кружна брзина у R^n гравитацији:

$$v_c^2(r) = \frac{GM}{2r} \left[1 + (1 - \beta) \left(\frac{r}{r_c} \right)^\beta \right]$$

- r_c – нови фундаментални гравитациони радијус за слабо гравитационо поље



БТФР за галаксије богате гасом

A fundamental gravitational radius at galactic scales as a solution to dark matter problem

S. Capozziello,^{1,2,3,*} P. Jovanović,⁴ V. Borka Jovanović,⁵ and D. Borka⁵

Закључци

- 1) Иако је ОТР до сада најбоља теорија гравитације, са највећим бројем експериментално потврђених предвиђања, вероватно је неопходна њена поправка или проширење да би се боље објасниле посматране појаве на галактичким скалама, као што су равне ротационе криве спиралних галаксија, њихова БТФР, као и ФР елиптичних галаксија
- 2) $f(R)$ теорије МГ представљају ваљану алтернативу ТМ и указују да је она можда гравитациони ефекат, а не материја сачињена од честица
- 3) Yukawa и R^n теорије МГ објашњавају равне ротационе криве спиралних галаксија, а ова прва и "Bullet cluster", без хипотезе о ТМ
- 4) R^n гравитација објашњава БТФР спиралних и ФР елиптичних галаксија без ТМ
- 5) Обе $f(R)$ теорије, и Yukawa и R^n , успешно објашњавају кретање S2 звезде око СМЦР у ГЦ али узрокују различиту орбиталну прецесију у односу на ОТР
- 6) Поређење симулираних орбита S2 звезде у гравитационом потенцијалу са Yukawa чланом представља нови метод за одређивање масе гравитона
- 7) За разлику од ОТР, МГ са Yukawa чланом предвиђа масивне гравитоне чија је маса у оквиру граница добијених помоћу LIGO-а

Хвала на пажњи!

