

Проверка расширенных теорий гравитации с помощью астрономических данных: тени черных дыр и радиус разворота

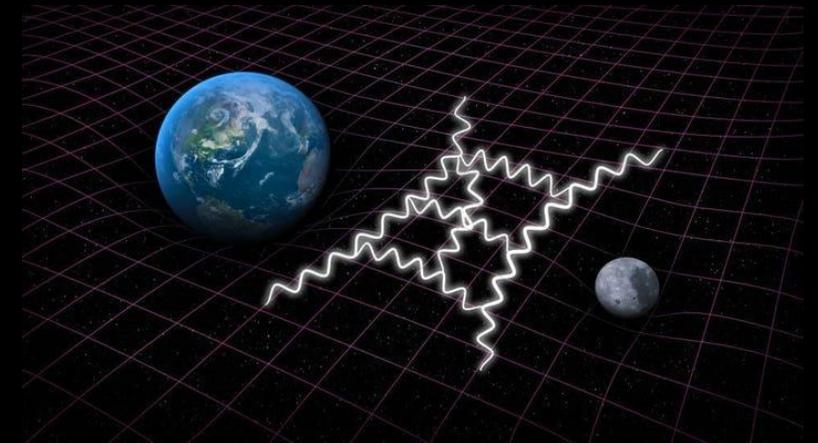
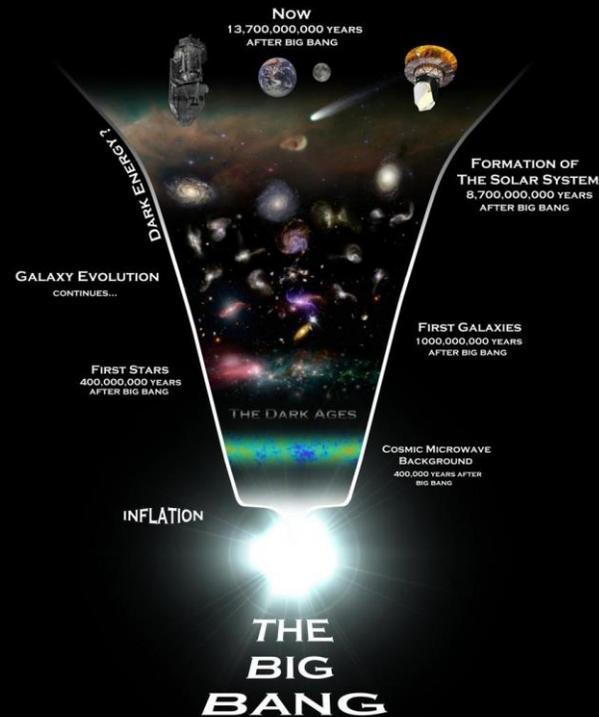
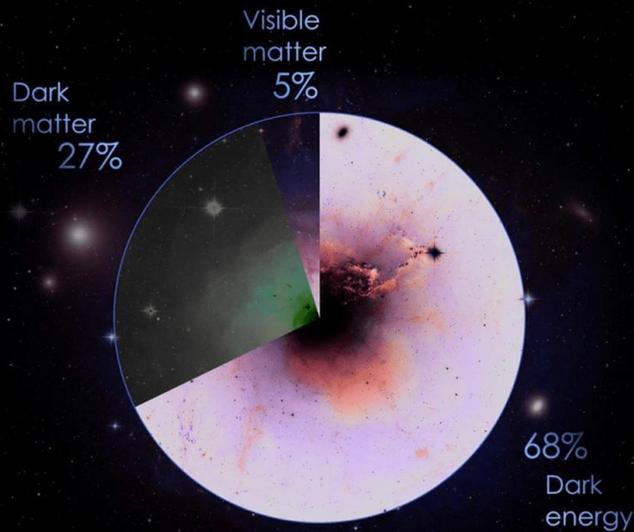


Зенин Олег Игоревич
(Физический факультет МГУ)
Станислав Олегович Алексеев
(ГАИШ МГУ)

Введение

Необходимость расширения ОТО обоснована:

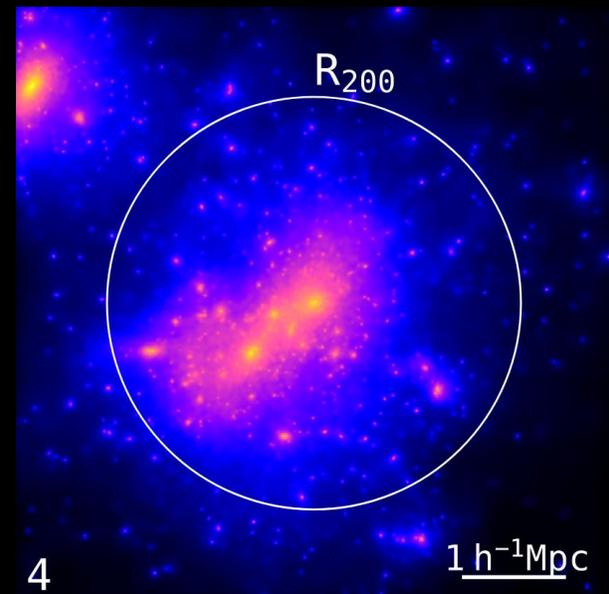
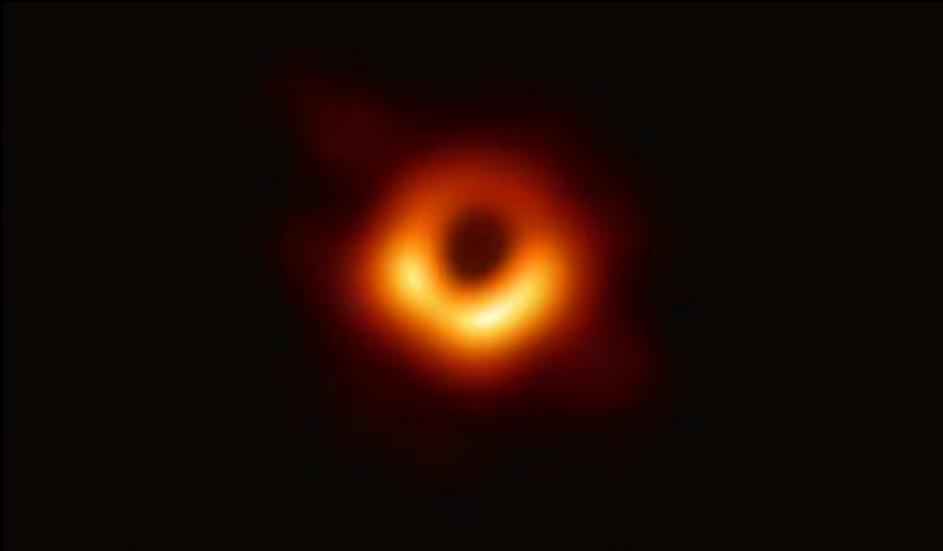
- Проблема темной энергии
- Проблема темной материи
- Эволюция ранней Вселенной
- Квантование гравитации



Введение

Необходимо использовать новейшие астрономические данные:

- Прямые изображения черных дыр и анализ параметров их тени
- Наблюдение скоплений галактик и анализ «радиуса разворота» для них



Радиус разворота

Общий вид сферически-симметричной метрики:

$$ds^2 = -A(r)dt^2 + B(r)dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Гравитационный потенциал:

$$\phi = \frac{c^2}{2} B^{-1}(r) (1 - A^{-1}(r))$$

Условие на радиус разворота (максимум грав. потенциала):

$$\frac{d\phi}{dr} = 0, \quad \frac{d^2\phi}{dr^2} < 0$$

Метрика модели Λ CDM:

$$A(r) = 1 - \frac{2GM}{c^2 r} - \frac{\Lambda}{3} r^2$$

$$B^{-1}(r) = A(r)$$

Производная грав. Потенциала в ОТО:

$$\frac{d\phi}{dr} = \frac{GM}{r^2} - \frac{\Lambda c^2 r}{3} = 0$$

Радиус разворота:

$$r_t = \left(\frac{3GM}{\Lambda c^2} \right)^{1/3}$$

Модель Хорндески, случай 1

Метрика [1]:

$$A(r) = B^{-1}(r) = 1 - \frac{2GM}{c^2 r} - \frac{2\alpha_4}{r^2} - \frac{8\alpha_5\eta}{5r^3} - \frac{\Lambda}{3}r^2$$

Производные грав. Потенциала [2]:

$$\frac{d\phi}{dr} = \frac{GM}{r_t^2} + \frac{2\alpha_4 c^2}{r_t^3} + \frac{12\alpha_5 \eta c^2}{5r_t^4} - \frac{\Lambda}{3}c^2 r_t = 0$$

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} = -\frac{2GM}{r_t^3} - \frac{6\alpha_4 c^2}{r_t^4} - \frac{48\alpha_5 \eta c^2}{5r_t^5} - \frac{\Lambda}{3}c^2 < 0$$

Соотношение на параметры [2]:

$$3GM r_t^2 + 8\alpha_4 c^2 r_t + 12\alpha_5 \eta c^2 > 0$$

Ограничение на параметры (событие GW200115) [1]:

$$|\alpha_5 \eta| \leq 2070_{659}^{565} km^3$$

Ограничения из анализа соотношения на параметры [2]:

$$\alpha_4(M = 10^{11} M_\odot) > -8.8 \times 10^{35}$$

$$\alpha_4(M = 10^{15} M_\odot) > -1.9 \times 10^{41}$$

Выражение для фонового скалярного поля [1] и ограничение по пульсарному таймингу [3]:

$$\phi_0 = \ln\left(-\frac{\alpha_4}{\alpha_5}\right) \quad \phi_0 < 0.00004$$

Из прошлых ограничений получено [2]:

$$\eta(M = 10^{11} M_\odot) < 2.26 \times 10^{-24}$$

$$\eta(M = 10^{15} M_\odot) < 1.06 \times 10^{-29}$$

1. E. Babichev, C. Charmousis, M. Hassaine and N. Lecoer, *Phys.Rev.D* 108, 024019 (2023).
2. Зенин О. И., Алексеев С. О., *ЖЭТФ*, Т. 167, № 5 (2025).
3. P. Dyadina, N. Avdeev and S. Alexeyev, *Mon. Not. Royal Astr. Soc.* 483, 947 (2019).

Модель Хорндески, случай 2

Метрика [1]:

$$A(r) = B^{-1}(r) = 1 + \frac{r^2}{2\alpha} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{8\alpha GM}{c^2 r^3}} \right)$$

Производные грав. Потенциала [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dr} &= \frac{c^2 r}{2\alpha} - \frac{c^2 r}{2\alpha} \sqrt{1 + \frac{8\alpha GM}{c^2 r^3}} - \\ &\quad - \frac{3GM}{r^2 \sqrt{1 + \frac{8\alpha GM}{c^2 r^3}}} \approx \\ &\approx -\frac{5GM}{r^2} + \frac{12\alpha G^2 M^2}{c^2 r^5} = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} \approx \frac{10GM}{r^3} - \frac{60\alpha G^2 M^2}{c^2 r^6} < 0$$

Радиус разворота [2]:

$$r_t = \left(\frac{12\alpha GM}{5c^2} \right)^{1/3}$$

Выражение для второй производной приводит к тождеству [2]:

$$\frac{12}{5} < 6$$

Ограничение из [3]:

$$\alpha \leq M$$

1. A. Vakopoulos, C. Charmousis, P. Kanti, N. Lecoecur and T. Nakas, *Phys.Rev.D* 109, 024032 (2024).
2. Зенин О. И., Алексеев С. О., *ЖЭТФ*, Т. 167, № 5 (2025).
3. H. Huang, J. Kunz and D. Mitra, *JCAP* 05, 07 (2024).

Модель DGP

Метрика [1]:

$$A(r) = B^{-1}(r) = 1 - \frac{2GM}{c^2 r} - \frac{r^2}{2r_c^2} + \frac{q^2}{r^2} - \frac{q^4 r_c^2}{5r^3}$$

Производные грав. Потенциала [2]:

$$\frac{d\phi}{dr} = \frac{GM}{r^2} - \frac{c^2 r}{2r_c^2} - \frac{c^2 q^2}{r^3} + \frac{3c^2 q^4 r_c^2}{10r^4} = 0$$

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} = -\frac{2GM}{r^3} - \frac{c^2}{2r_c^2} + \frac{3c^2 q^2}{r^4} - \frac{6c^2 q^4 r_c^2}{5r^5} < 0$$

Соотношение на параметры [2]:

$$\frac{3}{2}c^2 r_c^2 q^4 - 5c^2 r_t q^2 + 3GM r_t^2 > 0$$

Ограничение на параметры [2]:

$$\dot{q} < 10^{-17} \quad r_c < 3.3 \times 10^{14}$$

1. R. Gannouji, *Eur.Phys. C* 78, 318 (2018).
2. Зенин О. И., Алексеев С. О., *ЖЭТФ*, Т. 167, № 5 (2025).

Выводы

- В настоящей работе предложен подход, который при проверке предсказаний поведения расширенной теории гравитации на внегалактических масштабах позволяет наложить дополнительные ограничения на параметры теории.

Выводы

- В настоящей работе предложен подход, который при проверке предсказаний поведения расширенной теории гравитации на внегалактических масштабах позволяет наложить дополнительные ограничения на параметры теории.
- Ввиду недостаточности астрономических данных приходится использовать формулы для ОТО с космологической постоянной, что, естественно, понижает точность оценки.

Выводы

- В настоящей работе предложен подход, который при проверке предсказаний поведения расширенной теории гравитации на внегалактических масштабах позволяет наложить дополнительные ограничения на параметры теории.
- Ввиду недостаточности астрономических данных приходится использовать формулы для ОТО с космологической постоянной, что, естественно, понижает точность оценки.
- Для модели Хорндески в первом варианте удалось получить оценки для параметра, считавшегося ранее свободным и оценивавшегося только в комбинации с другими.

Выводы

- В настоящей работе предложен подход, который при проверке предсказаний поведения расширенной теории гравитации на внегалактических масштабах позволяет наложить дополнительные ограничения на параметры теории.
- Ввиду недостаточности астрономических данных приходится использовать формулы для ОТО с космологической постоянной, что, естественно, понижает точность оценки.
- Для модели Хорндески в первом варианте удалось получить оценки для параметра, считавшегося ранее свободным и оценивавшегося только в комбинации с другими.
- Для модели Хорндески во втором варианте удалось подтвердить значения параметров, полученные ранее.

Выводы

- В настоящей работе предложен подход, который при проверке предсказаний поведения расширенной теории гравитации на внегалактических масштабах позволяет наложить дополнительные ограничения на параметры теории.
- Ввиду недостаточности астрономических данных приходится использовать формулы для ОТО с космологической постоянной, что, естественно, понижает точность оценки.
- Для модели Хорндески в первом варианте удалось получить оценки для параметра, считавшегося ранее свободным и оценивавшегося только в комбинации с другими.
- Для модели Хорндески во втором варианте удалось подтвердить значения параметров, полученные ранее.
- Для модели DGP для обсуждаемого решения показана реализация сценария, в котором на больших расстояниях (за пределами радиуса Вайнштейна) мир эффективно многомерен.

Спасибо за внимание!!!

Работа поддержана
грантом РФФ 23-22-00073