

ТЕНИ ЧЕРНЫХ ДЫР КАК ИСТОЧНИК ОГРАНИЧЕНИЙ НА РАСШИРЕННЫЕ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ 2: SGR A*

В. А. Прокопов^{a,b}, С. О. Алексеев^{a,b}, О. И. Зенин^b

^a Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,
Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119234, Москва, Россия

^b Физический факультет,
Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119234, Москва, Россия

Поступила в редакцию 29 сентября 2022 г.,
после переработки 8 октября 2022 г.
Принята к публикации 9 октября 2022 г.

Почти сразу после опубликования [1] проектом Event Horizon Telescope (EHT) было получено первое прямое изображение черной дыры в центре нашей галактики: Sagittarius A* [2]. Полученные ранее [1] результаты для модели Хорндески с инвариантом Гаусса–Бонне, петлевой квантовой гравитации, скалярных моделей Бамбелби, Гаусса–Бонне и конформной гравитации полностью согласуются с наблюдениями Sgr A*. В $f(Q)$ гравитации наблюдения Sgr A* дополнительно ограничивают значения параметра α : $-0,025 < \alpha < 0,005$. Для альтернативного обобщения метрики Бамбелби с приближением Шварцшильда ограничение становится следующим: $-0,05 < l < 0,45$. Полученные ограничения демонстрируют тот максимум, которого можно достичь без учета вращения черной дыры.

DOI: 10.31857/S0044451022120070

EDN: LCRZOY

1. ВВЕДЕНИЕ

Черная дыра (ЧД) в центре нашей Галактики Sgr A* более чем в тысячу раз меньше черной дыры в центре галактики M87 [3]. Таким образом, после получения изображений теней от черных дыр (ЧД) различных масс стало возможным сравнить их друг с другом, а также использовать их для более точной проверки предсказаний различных расширенных теорий гравитации. Отметим, что оценка массы Sgr A* от Event Horizon Telescope (EHT) сходится с оценкой, полученной по результатам наблюдений за траекториями звезд, вращающихся вокруг Sgr A*, что дает возможность более точно проверять применимость различных расширенных теорий гравитации, налагая дополнительные ограничения на них. Напомним, что ограничения на размер тени ЧД при наблюдении Sgr A* составляют ($4.3M < D < 5.3M$) [2].

В настоящей работе с привлечением новых данных [2] уточняются ограничения, наложенные нами ранее [1] на модель Бамбелби (расширение ОТО с помощью векторного поля [4]) и телепараллельный эквивалент общей теории относительности (TEGR) [5]. В то же время, на модель Хорндески [6], петлевую квантовую гравитацию (loop quantum gravity, LQG) [7], скалярную гравитацию Гаусса–Бонне [8] и модель гравитации с конформной симметрией [9] новые наблюдательные данные Sgr A* дополнительных ограничений не накладывают.

2. ОБОБЩЕННАЯ МЕТРИКА МОДЕЛИ БАМБЕЛБИ

Напомним, что в модели Бамбелби размер тени не зависит от метрической функции $B(r)$, если на рассматриваемом масштабе $B(r) > 0$ и нет других особых точек (регулярность над горизонтом) [1]. Метрика Бамбелби отличается от шварцшильдовской только компонентой $B(r)$, поэтому рассмотрим предложенное ранее альтернативное обобщение [1]:

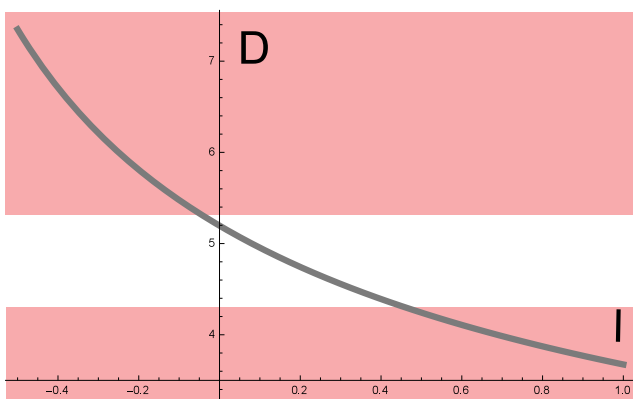


Рис. 1. Зависимость размера тени ЧД D от параметра l в альтернативном обобщении метрики Бамбелби в приближении Шварцшильда (в единицах массы ЧД M , $M = 1$)

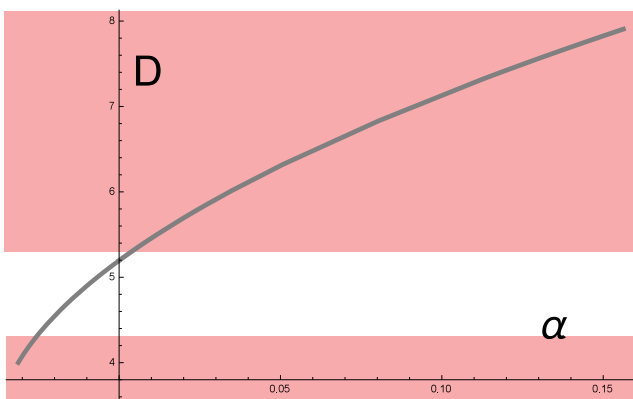


Рис. 2. Зависимость размера тени ЧД D от параметра α в $f(Q)$ -гравитации в единицах массы ЧД M_{ren}

$$A(r) = (1 + l) \left(1 - \frac{2M}{r} \right), \quad (1)$$

$$B(r)^{-1} = 1 - \frac{2M}{r}, \quad (2)$$

где l — константа.

На рис. 1 показано влияние параметра l на размер тени ЧД. С учетом результатов наблюдения Sgr A* [2], получим, что $-0.05 < l < 0.45$. Заметим, что в случае ограничений, полученных на M87*, среднее значение параметра l лежит гораздо ближе к отрицательной области (старые ограничения $-0.3 < l < 0.45$ [1]). Судя по этой тенденции, при дальнейшем уточнении наблюдательных данных параметр l может стать полностью положительным.

3. $f(Q)$ ГРАВИТАЦИЯ

$f(Q)$ -гравитация — это симметричная версия телепараллельной гравитации (STTEGR) с ненулевым скаляром неметричности Q [5]:

$$A(r) = 1 - \frac{2M_{ren}}{r} - \alpha \frac{32}{r^2}, \quad (3)$$

$$B(r)^{-1} = 1 - \frac{2M_{ren}}{r} - \alpha \frac{96}{r^2}, \quad (4)$$

$$2M_{ren} = 2M - \alpha \left(\frac{32}{3M} + c_1 \right), \quad (5)$$

где α — параметр разложения, c_1 — постоянная интегрирования, M_{ren} — ренормированная масса. Для удаленного наблюдателя нет разницы между перенормированной массой и обычной массой Шварцшильда.

На рис. 2 показано влияние параметра α на размер тени ЧД. С учетом наблюдений Sgr A* [2], ограничения на α примут вид $-0.025 < \alpha < 0.005$. Заметим, что, в отличие от случая M87* (старые ограничения $-0.025 < \alpha < 0.04$ [1]), среднее значение параметра α смещается ближе к отрицательной области. Судя по этой тенденции, при дальнейшем уточнении наблюдательных данных параметр α сместится в отрицательную область.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Разрешение первых изображений черных дыр в проекте Event Horizon Telescope составляло приблизительно половину размера тени черной дыры в центре галактики M87* [3]. Верхняя граница размера тени для Sgr A* ($5.3M$) ниже, чем в случае M87* ($6.1M$), что уже сравнимо с расчетным размером тени ЧД в ОТО (примерно $5.2M$ [1]). Это позволило наложить более жесткие ограничения на альтернативную метрику Бамбелби ($-0.05 < l < 0.45$) снизу и $f(Q)$ гравитацию ($-0.025 < \alpha < 0.005$) сверху.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Фундаментальные и прикладные космические исследования” (ГАИШ).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. О. Алексеев, В. А. Прокопов, О. И. Зенин, ЖЭТФ **161**, 108 (2022).
2. The Event Horizon Telescope Collaboration, *Astrophys. J. Letters* **930** L17 (2022).
3. K. Akiyama et al., *Astrophys. J.* **875**, L5 (2019).
4. R. Casana, A. Cavalcante et al., *Physical Review D* **97**, 104001 (2018).
5. F. D'Ambrosio, S. D. B. Fell et al., *Phys. Rev. D* **105**, 024042 (2022).
6. G. W. Horndeski, *Int. J. Theor. Phys.* **10**, 363 (1974).
7. A. Barrau, T. Cailleteau et al., *Class. Quant. Grav.* **31**, 053001 (2014).
8. N. Yunes and L. C. Stein, *Phys. Rev. D* **83**, 104002 (2011).
9. P. D. Mannheim, *Found. Phys.* **42**, 388 (2012).