

УДК 53.01

© Зенин О. И., Алексеев С. О., Прокопов В. А., 2023

ТЕНИ ЧЕРНЫХ ДЫР КАК ИСТОЧНИК ПРОВЕРКИ РАСШИРЕННЫХ ТЕОРИЙ ГРАВИТАЦИИ*Зенин О. И.^{а,1}, Алексеев С. О.^{а,2}, Прокопов В. А.^{а,3}^а МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, 119234, Россия

Первые изображения чёрных дыр открыли новые возможности для проверки расширенных теорий гравитации. В данной работе предложен и развит метод построения фона тени сферически-симметричных неврацающихся черных дыр для случая $g_{11} \neq -g_{00}^{-1}$. Результаты анализа для расширенных теорий гравитации сравниваются с предсказаниями общей теории относительности (ОТО) при учете данных Event Horizon Telescope (глобальная сеть радиотелескопов, на которой было получено первое прямое изображение ЧД). После публикации статьи [1] проектом Event Horizon Telescope (ЕНТ) было получено первое прямое изображение черной дыры в центре нашей галактики: Sagittarius A* [2]. Полученные в работе [1] результаты полностью согласуются с результатами наблюдений Sgr A* и M87* для следующих моделей: модель Хорндески с инвариантом Гаусса-Бонне, петлевая квантовая гравитация, скалярная модель бамбелби, модель Гаусса-Бонне. В конформной гравитации должны быть исключены большие значения m_2 и Q_s . 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: $-0,05 < l < 0,45$.

Ключевые слова: Тень черной дыры, Event Horizon Telescope, расширенные теории гравитации, модель бамбелби, $f(Q)$ гравитация.

BLACK HOLE SHADOWS AS A SOURCE FOR TESTING EXTENDED THEORIESZenin O. I.^{а,1}, Alexeyev S. O.^{а,2}, Prokopov V. A.^{а,3}^а Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234, Russia

The first images of black holes have opened up new possibilities for testing extended theories of gravity. In this paper, we propose and develop a method for constructing the background of the shadow of spherically symmetric non-rotating black holes for the case of $g_{11} \neq -g_{00}^{-1}$. The results of the analysis for the extended theories of gravity are compared with the predictions of the general theory of relativity (GRT) when taking into account the data of the Event Horizon Telescope (the global network of radio telescopes on which the first direct image of the BH was obtained). After the publication of the article [1], the Event Horizon Telescope (HET) project obtained the first direct image of a black hole in the center of our galaxy: Sagittarius A* [2]. The results obtained in [1] are in full agreement with the results of observations of Sagittarius A* and M87* for the following models: the Horndeski model with the Gauss-Bonnet invariant, loop quantum gravity, Bumblebee scalar model, Gauss-Bonnet model. In conformal gravity, large values of m_2 and Q_s should be excluded. In $f(Q)$ gravity, observations of Sgr A* additionally limit the values of the parameter α : $-0.025 < \alpha < 0.005$. For an alternative generalization of the bumblebee metric with the Schwarzschild approximation, the constraint becomes as follows: $-0.05 < l < 0.45$.

Keywords: Black hole shadow, Event Horizon Telescope, extended theories of gravity, bumblebee model, $f(Q)$ gravity.

PACS: 04.80.Cc, 04.50.Kd

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2023.1.65-70

*Работа при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Фундаментальные и прикладные космические исследования” (ГАИШ); при поддержке средств Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» грант № 22-2-2-11-1.

¹E-mail: dkiiiabu4@gmail.com²E-mail: salexeyev@gmail.com³E-mail: slaprok777@gmail.com

Введение

С момента создания первых математических моделей чёрных дыр (ЧД) прошло уже более ста лет. О существовании подобных объектов свидетельствуют результаты динамики двойных систем [3], гравитационно-волновой астрономии [4, 5], а также прямые изображения тени чёрной дыры [6]. В настоящее время общая теория относительности (ОТО), решениями которой и являются метрики ЧД, с огромной точностью описывает астрофизические явления. Однако, и в рамках ОТО существуют проблемы, такие как темная материя, темная энергия, эволюция ранней Вселенной, квантование гравитации и т.д., которые ждут лучшего теоретического обоснования. Именно по этой причине и развиваются новые гравитационные модели, например, $f(R)$ гравитация [7], телепараллельная гравитация (в частности $f(Q)$ гравитация [8]), скалярно-тензорные теории, включая общий случай с уравнениями поля второго порядка: теорию Хорндески [9–12], гравитационные модели с конформной симметрией [13, 14], петлевая квантовая гравитация [15–17], скалярная гравитация Гаусса-Бонне [18] и многие другие. Для дальнейшего развития теорий необходимо сравнить их предсказания с реальными наблюдательными данными (в нашем случае это масштаб горизонта ЧД).

Обсудим кратко особенности расширенных моделей гравитации. Начнем с модели бамбелби, которая расширяет ОТО с помощью векторного поля. При выборе подходящего потенциала векторное поле бамбелби V_μ приобретает ненулевое вакуумное среднее, генерируя спонтанное нарушение Лоренцевой симметрии [19]. Обсуждаемый подход имеет перспективу стать “мостом” между теорией струн и ОТО на Планковских масштабах, корректируя ОТО в области высоких энергий.

Далее рассмотрим телепараллельный эквивалент общей теории относительности (TEGR). Данная теория представляет собой расширение ОТО с ненулевыми кручением и неметричностью, в котором геометрическая деформация генерирует гравитационное поле. TEGR включает дополнительные степени свободы, применимые для описания нерешенных проблем ОТО. Поскольку кривизна и кручение в $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$ постулируются равными нулю, единственным нетривиальным объектом, оставшимся в STEGR, который характеризует геометрию, является тензор неметричности $Q_{\alpha\mu\nu}$ [8]. Этот тензор может быть использован для построения скаляра неметричности Q , который и войдет в действие теории.

1. Обобщенная метрика модели бамбелби

Модель бамбелби — гравитационная модель, расширяющая стандартный формализм ОТО, в которой при подходящем потенциале векторное поле бамбелби V_μ приобретает ненулевое вакуумное среднее значение, вызывая спонтанное нарушение Лоренцевой симметрии [19]. Развитие модели бамбелби мотивировано, в первую очередь, открытием того факта, что в пределе теория струн (а впоследствии и в других квантовых теориях гравитации) может приводить к тензорным полям с ненулевыми вакуумными средними. Тем не менее в некоторых моделях бамбелби могут появляться и безмассовые моды, которые ведут себя как фотоны.

Сферически-симметричное решение модели бамбелби имеет вид:

$$A(r) = \bar{A}(r) \tag{1.1}$$

$$B(r) = \frac{1+l}{\bar{B}(r)}, \tag{1.2}$$

l — константа, $\bar{B}(r)$ и $\bar{A}(r)$ — функции, представимые в виде рядов Тейлора.

Наши расчёты показывают, что размер тени не зависит от параметра l . Как было установлено ранее, размер тени не зависит от метрической функции $B(r)$, если на рассматриваемом масштабе $B(r) > 0$ и нет других особых точек (регулярность вне горизонта) [1]. Метрика бамбелби отличается от Шварцшильдской только компонентой $B(r)$, поэтому рассмотрим предложенное ранее

альтернативное обобщение [1]:

$$A(r) = (1 + l)\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \quad (1.3)$$

$$B(r)^{-1} = 1 - \frac{2M}{r}, \quad (1.4)$$

l — константа.

Влияние параметра l на размер тени ЧД показано на рис. 1. С учетом результатов наблюдения Sgr A* [2], получим, что $-0,05 < l < 0,45$. Следует обратить внимание, что в случае ограничений, которые были получены по результатам наблюдений M87*, среднее значение параметра l находится значительно ближе к отрицательной области (старые ограничения $-0,3 < l < 0,45$ [1]). Скорее всего, при дальнейшем уточнении наблюдательных данных, параметр l имеет тенденцию к тому, чтобы стать полностью положительным.

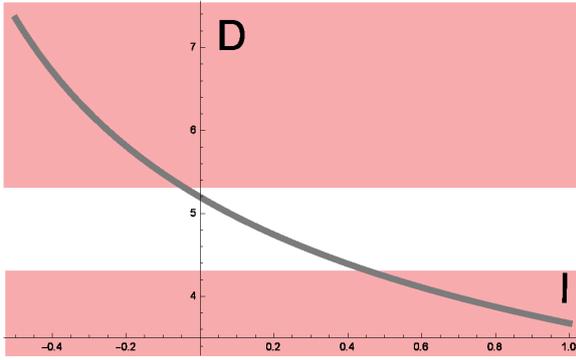


Рис. 1. Зависимость размера тени ЧД D от параметра l в альтернативном обобщении метрики бамбелби в приближении Шварцшильда (в единицах массы ЧД M , $M = 1$).

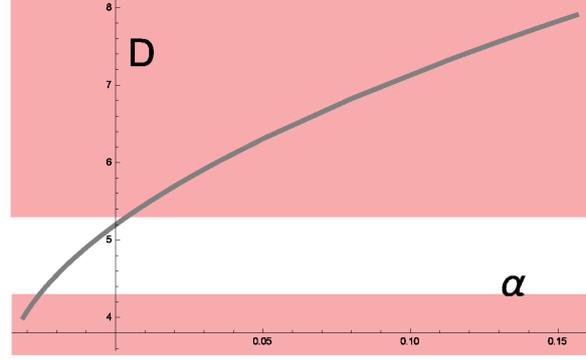


Рис. 2. Зависимость размера тени ЧД D от параметра α в $f(Q)$ гравитации в единицах массы ЧД M_{ren} .

2. $f(Q)$ гравитация

$f(Q)$ гравитация — это симметричная теория телепараллелизма (STEGR) с ненулевым скаляром неметричности Q [8]. Ключевое различие между STEGR и ОТО заключается в роли, которую играют символы Кристофеля $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$. В ОТО постулируется, что кручения нет, а $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$ полностью определяются метрикой. В STEGR этот постулат отбрасывается, вместо этого требуется, чтобы $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$ не содержали кручений и обеспечивали нулевые значения компонент тензора Римана. В соответствии с этим постулатом символы Кристофеля выбираются произвольно и не зависят от метрики. Поскольку и кривизна, и кручение в $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$ постулируются равными нулю, единственным нетривиальным объектом, оставшимся в STEGR, который характеризует геометрию, является тензор неметричности $Q_{\alpha\mu\nu}$. Этот тензор может быть использован для построения скаляра неметричности Q . Компоненты метрики имеют вид: [8]:

$$A(r) = 1 - \frac{2M_{ren}}{r} - \alpha \frac{32}{r^2} \quad (2.1)$$

$$B(r)^{-1} = 1 - \frac{2M_{ren}}{r} - \alpha \frac{96}{r^2} \quad (2.2)$$

$$2M_{ren} = 2M - \alpha \left(\frac{32}{3M} + c_1 \right) \quad (2.3)$$

где a — параметр разложения, c_1 — постоянная интегрирования, M_{ren} — ренормированная масса. Будем применять M_{ren} , как обычную массу, поскольку для удаленного наблюдателя между ними

нет разницы, и нормируем все величины на эту массу. Влияние параметра a на размер тени ЧД показано на рис. 2. С учетом наблюдений Sgr A* [2] ограничения на α примут вид: $-0,025 < \alpha < 0,005$. Можно заметить, что, в отличие от случая M87* (старые ограничения $-0,025 < \alpha < 0,04$ [1]), среднее значение параметра α сдвигается ближе к отрицательной области. Скорее всего, при дальнейшем уточнении наблюдательных данных, параметр α имеет тенденцию сместиться в отрицательную область.

Заключение

На данный момент разрешение изображений чёрных дыр в проекте Event Horizon примерно вдвое меньше размера объекта [6]. Дальнейшее совершенствование наземного оборудования позволило бы увеличить разрешение всего в несколько раз. Помимо этого уже достигнут максимально возможный размер сети наземных радиотелескопов. Как было показано ранее в [20, 21] и расширено в настоящей работе, ограничение для реальных моделей расширенной гравитации требуют увеличения точности на несколько порядков. Поэтому, следующим шагом могла бы стать сеть из орбитальных телескопов.

Нами рассчитана зависимость размера тени чёрной дыры от параметров модели в различных расширенных теориях гравитации и установлены ограничения на них с использованием данных наблюдений M87* и Sgr A*. Результаты для модели Хорндески с инвариантом Гаусса-Бонне, петлевой квантовой гравитации, скалярных моделей бамбелби и Гаусса-Бонне полностью согласуются с наблюдениями M87*. Вернее сказать, предсказания этих моделей не выходят за ограничения, установленными имеющимися данными наблюдений. Как нами показано, в конформной гравитации должны быть исключены большие значения m_2 и Q_s (например, если $m_2 = 2$, то $Q_s < 0,9$), как было показано в [1]. В STEGR $f(Q)$ гравитации наблюдения M87* ограничивают значения α следующим образом: $-0,025 < \alpha < 0,005$. Для альтернативного обобщения метрики бамбелби с приближением Шварцшильда: $-0,05 < l < 0,45$. Эти результаты демонстрируют тот максимум, которого можно достичь без учета вращения чёрной дыры.

Финансирование: работа Зенина Олега Игоревича финансировалась за счет средств Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» грант № 22-2-2-11-1.

Благодарность: Зенин Олег Игоревич выражает благодарность организационному комитету международной зимней школы-семинара по гравитации, астрофизике и космологии «Петровские чтения» за финансирование поездки

Список литературы

1. Алексеев С.О., Прокопов В.А., Зенин О.И. *ЖЭТФ*, 2022, 161 (7), 108.
2. The Event Horizon Telescope Collaboration. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, **930**, L17.
3. Orosz J.A., McClintock J.E., et al. *Astrophys. J.*, 2011, **742**, 84.
4. Abbott B., et al. *Phys. Rev. D*, 2016, **93**, 12.
5. Abbott B., et al. *American Physical Society*, 2017, **119** 16.
6. Akiyama K., et al. *Astrophys. J.*, 2019, **875** (1) L5.
7. Capozziello S., De Laurentis M. *Phys. Rept.*, 2011, **509** 167.
8. D'Ambrosio F., Fell S.D.B., et al. *Phys. Rev. D*, 2022, **105** (2) 024042.
9. Sotiriou T.P., Faraoni V. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, **82** 451.
10. De Felice A., Tsujikawa S. *Living Rev. Rel.*, 2010, **13** 3.
11. Charmousis C., Copeland E.J., et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **108** 5.
12. Babichev E., Charmousis C., et al. *JCAP*, 2017, **4** 27.
13. Mannheim P.D. *Foundations of Physics*, 2011, **42** (3) 388.
14. Myung Y.S., Zou D.-C. *Physical Review D*, 2019, **100** (6).

15. Casares P.A.M. A review on loop quantum gravity (2018). <http://arxiv.org/abs/1808.01252>
16. De Lorenzo T., Pacilio C., et al. *General Relativity and Gravitation*, 2015, **47** (4).
17. Hu J.-P., Shi L.-L., et al. *Astrophysics and Space Science*, Sep 2018, **363** (10).
18. Yunes N., Stein L.C. *Phys. Rev. D*, 2011, **83**, 104002.
19. Casana R., Cavalcante A., et al. *Physical Review D*, May 2018, **97** (10), 104001.
20. Алексеев С.О., Латош Б.Н., Прокопов В.А., Емцова Е.Д. *ЖЭТФ*. 2019. **157** (5). 796.
21. Алексеев С.О., Прокопов В.А. *ЖЭТФ*. 2020. **155** (5). 847.

References

1. Alexeyev S., Prokopov V., Zenin O. *J. Exp. Theor. Phys.*, 2022, **135** (1) 91.
2. The Event Horizon Telescope Collaboration. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, **930**, L17.
3. Orosz J.A., McClintock J.E., et al. *Astrophys. J.*, 2011, **742**, 84.
4. Abbott B., et al. *Phys. Rev. D*, 2016, **93**, 12.
5. Abbott B., et al. *American Physical Society*, 2017, **119** 16.
6. Akiyama K., et al. *Astrophys. J.*, 2019, **875** (1) L5.
7. Capozziello S., De Laurentis M. *Phys. Rept.*, 2011, **509** 167.
8. D'Ambrosio F., Fell S.D.B., et al. *Phys. Rev. D*, 2022, **105** (2) 024042.
9. Sotiriou T.P., Faraoni V. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, **82** 451.
10. De Felice A., Tsujikawa S. *Living Rev. Rel.*, 2010, **13** 3.
11. Charmousis C., Copeland E.J., et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **108** 5.
12. Babichev E., Charmousis C., et al. *JCAP*, 2017, **4** 27.
13. Mannheim P.D. *Foundations of Physics*, 2011, **42** (3) 388.
14. Myung Y.S., Zou D.-C. *Physical Review D*, 2019, **100** (6).
15. Casares P.A.M. A review on loop quantum gravity (2018). <http://arxiv.org/abs/1808.01252>
16. De Lorenzo T., Pacilio C., et al. *General Relativity and Gravitation*, 2015, **47** (4).
17. Hu J.-P., Shi L.-L., et al. *Astrophysics and Space Science*, Sep 2018, **363** (10).
18. Yunes N., Stein L.C. *Phys. Rev. D*, 2011, **83**, 104002.
19. Casana R., Cavalcante A., et al. *Physical Review D*, May 2018, **97** (10), 104001.
20. Alexeyev S., Latosh B., Prokopov V., Emtsova E. *J. Exp. Theor. Phys.*, 2019, **128** (5), 720.
21. Alexeyev S., Prokopov V. *J. Exp. Theor. Phys.*, 2020, **130** (5), 666.

Авторы

Зенин Олег Игоревич, кафедра квантовой теории и физики высоких энергий, Физический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, ул. Колмогорова, 1, стр. 2, г. Москва, 119234, Россия.
E-mail: dkiiiabu4@gmail.com

Алексеев Станислав Олегович, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, Отдел релятивистской астрофизики, Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга, МГУ имени М.В. Ломоносова, Университетский пр-т, 13, г. Москва, 119234, Россия.
E-mail: salexeyev@gmail.com

Прокопов Вячеслав Алексеевич, ведущий специалист, Отдел релятивистской астрофизики, Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга, МГУ имени М.В. Ломоносова, Университетский пр-т, 13, г. Москва, 119234, Россия.
E-mail: slaprok777@gmail.com

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зенин О. И., Алексеев С. О., Прокопов В. А. Тени черных дыр как источник проверки расширенных теорий гравитации. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2023. № 1. С. 65–70.

Authors

Zenin Oleg Igorevich, Department of Quantum Theory and High Energy Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, st. Kolmogorova, 1, building 2, Moscow, 119234, Russia.
E-mail: dkiiiabu4@gmail.com

Alexeyev Stanislav, Leading Researcher, Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Universitetskiy Ave., 13, Moscow, 119234, Russia.
E-mail: salexeyev@gmail.com

Prokopov Vjacheslav Alekseevich, Leading Specialist, Department of Relativistic Astrophysics, Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Universitetskiy Ave., 13, Moscow, 119234, Russia.
E-mail: slaprok777@gmail.com

Please cite this article in English as:

Zenin O. I., Alexeyev S. O., Prokopov V. A. Black hole shadows as a source for testing extended theories. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2023, no. 1, pp. 65–70.