

О ТЕНЯХ ЧЕРНЫХ ДЫР В НЕЭЙНШТЕЙНОВСКИХ ТЕОРИЯХ ГРАВИТАЦИИ

А. Ф. Захаров^{1,2,*}

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, 123182, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

В недавней статье С. О. Алексеева и др. (опубликованной в журнале «ЭЧАЯ») авторы утверждают, что они обсуждают возможность оценки параметров теней черных дыр, которые могут возникать в модели Хорндески и гравитации бамблби (шмеля). Оставляя в стороне вопрос о том, что ни одна из предложенных альтернативных теорий гравитации не может считаться предпочтительной по отношению к общей теории относительности Эйнштейна, следует отметить, что указанными авторами не было доказано, что ими найдены вращающиеся решения типа черных дыр в рассматриваемых неэйнштейновских теориях гравитации. Как известно, процедура учета вращения, предложенная Ньюменом–Дженисом, была применена для «получения» метрики Керра из метрики Шварцшильда в рамках ОТО. Позднее рядом авторов было показано, что для большого числа случаев неэйнштейновской теории гравитации алгоритм Ньюмена–Джениса не может быть использован для получения аналогов решений типа Керра в таких теориях гравитации. Поэтому для каждой версии альтернативной теории гравитации необходимо доказывать, что процедура Ньюмена–Джениса в действительности дает решение типа Керра в рассматриваемой неэйнштейновской теории гравитации. Кроме того, следует отметить, что в обсуждаемой работе С. О. Алексеева и др. было рассмотрено, по сути дела, множество прицельных параметров, соответствующих неустойчивым круговым фотонным орбитам, а то, что соответствующие параметры движения определяют форму и размер теней, осталось недоказанным для рассмотренных метрик типа черных дыр в альтернативных теориях гравитации. То, что задача о нахождении формы и размера тени и задача о нахождении круговых фотонных орбит для черных дыр Керра эквивалентны, показано более 20 лет назад в работе А. Ф. Захарова и др., опубликованной в журнале «New Astronomy», где также было отмечено, что тень черной дыры в Галактическом центре может быть восстановлена с использованием РСДБ-наблюдения интерферометров, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. В последние годы в ряде недавних работ показано, что для некоторых обобщений метрики Керра–Ньюмена возможно наличие круговых фотонных орбит при отсутствии теней, поэтому говорить о наличии и свойствах теней только

* E-mail: alex.fed.zakharov@gmail.com

на основании рассмотрения круговых фотонных орбит не является обоснованным, как это утверждается в работе С. О. Алексеева и др.

In a recent article by S. O. Alekseev et al. (published in the journal “Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei”), the authors claim that they are discussing the possibility of estimating the parameters of black hole shadows that may occur in the Horndeski model and Bumblebee gravity. Leaving aside the question that none of the proposed alternative theories of gravity can be considered preferable to Einstein’s General Theory of Relativity, it should be noted that these authors did not prove that they have found rotating solutions such as black holes in non-Einstein’s theories of gravity they consider. As is known, the rotation accounting procedure proposed by Newman–Janis was applied to “derive” the Kerr metric from the Schwarzschild metric in the framework of General Relativity. Later, a number of authors showed that for a large number of cases of the non-Einstein theory of gravity, the Newman–Janis algorithm cannot be used to obtain analogues of Kerr-type solutions in such theories of gravity. Therefore, for each version of the alternative theory of gravity, it is necessary to prove that the Newman–Janis procedure actually gives a Kerr-type solution in the non-Einstein theory of gravity under consideration. In addition, it should be noted that the paper under discussion by S. O. Alekseev et al. considered, in fact, many impact parameters corresponding to unstable circular photon orbits, and the fact that the corresponding motion parameters determine the shape and size of shadows remained unproven for the considered solutions such as black holes in alternative theories of gravity. The fact that the problem of finding the shape and size of the shadow and the problem of finding circular photon orbits for Kerr black holes are equivalent was shown more than 20 years ago in the work of A. F. Zakharov et al., published in the journal “New Astronomy”, where it was also noted that the shadow of a black hole in the Galactic Center can be reconstructed using VLBI observations of interferometers operating in the millimeter and submillimeter range. In recent years, a number of papers have shown that circular photon orbits are possible for some generalizations of the Kerr–Newman metric in the absence of shadows; therefore, it is not reasonable to talk about the presence and properties of shadows only on the basis of consideration of circular photon orbits, as stated in the work by S. O. Alekseev et al.

PACS: 04.70Dy; 95.30.Sf; 97.60.Lf; 04.50.Kd; 04.20.Jb

ВВЕДЕНИЕ

В цикле работ, опубликованных С. О. Алексеевым и его соавторами, обсуждаются тени черных дыр в альтернативных теориях гравитации. Несмотря на утверждения о том, что этими авторами представлены тени черных дыр, такие выводы вызывают большие сомнения, в частности, заключения, полученные в недавней работе [1], опубликованной в журнале «ЭЧАЯ» и представленной на сессии ядерной группы Отделения физических наук РАН в феврале 2025 г. Эта опубликованная работа имеет существенные недостатки, связанные с необоснованными декларациями, часть из которых будет обсуждена ниже. Следует заметить, что

идея о том, что тень черной дыры в Галактическом центре (ГЦ) может быть восстановлена по данным наблюдений глобального интерферометра, была высказана в работе А. Ф. Захарова и др. [2] и подтвердилась в результате обработки наблюдений коллаборации «Телескоп горизонта событий» (ТГС) в 2022 г. [3].

1. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Появление концепции черной дыры обычно связывают с именем Дж. А. Уилера и его опубликованными в 1968 г. классическими работами [4, 5] (см. также воспоминания Уилера о возникновении концепции в книге [6]). Предпосылки возникновения этой концепции в 1960-е гг. обсуждаются в статье [7]. Замечательный свежий обзор об экспериментальных проявлениях астрофизических черных дыр опубликован недавно [8], в частности, в данной работе представлены последние достижения в этой области. Обычно считается, что астрофизические черные дыры определяются только тремя параметрами: массой, моментом вращения и зарядом. Это утверждение называется теоремой об отсутствии волос (по *hair theorem*). На начальном этапе обсуждения данного утверждения, по-видимому, более правильно было бы говорить не о теореме, а о гипотезе, причем условия, при которых эта гипотеза была бы справедлива, в точности не были известны. Первые доказательства вариантов теоремы об отсутствии волос были даны В. Израэлем [9, 10] и Б. Картером [11]. Теорема об отсутствии волос часто ассоциируется с именем Дж. А. Уилера, однако сам он говорил о влиянии Р. Фейнмана и Дж. Бекенштейна на возникновение этой гипотезы*. Данную идею красиво высказал С. Чандрасекар [13]: «Вряд ли я погрешу против истины, утверждая, что черные дыры — это наиболее совершенные макроскопические объекты во Вселенной... И поскольку общая теория относительности предсказывает, что они описываются всего одним семейством решений, эти объекты можно считать также и самыми простыми». Тем самым в цитированной фразе предполагается, что в рамках естественных предположений об астрономических условиях космической среды электрический заряд астрофизической черной дыры должен быть пренебрежимо мал, поэтому самый общий случай класс метрик астрофизических черных дыр соответствует метрикам Керра, т. е. вращающимся черным дырам. Для обработки и анализа данных, полученных при наблюдениях черных дыр, астрономы обычно ограничиваются использованием метрики Керра, и наблюдательных оснований для рассмотрения решений типа черных дыр в альтернативных теориях гравитации, как правило, не

* См. <https://www.webofstories.com/play/john.wheeler/84>, а также книгу К. Торна [12].

имеется. Тем не менее различные обобщения решений типа черных дыр с дополнительными «волосами» (параметрами) в последнее время довольно часто обсуждаются в мысленных экспериментах.

2. ТЕНИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЧЕРНЫХ ДЫР

Ранее было показано [14], что если мы рассмотрим константы движения для классических черных дыр Керра, то область захвата и область рассеяния для фотонов разделяются константами движения Чандрасекара (ξ, η), соответствующими круговым фотонным орбитам. Тем самым для метрики Керра форма и размер тени определяются этими критическими значениями параметров (как показано в работе [2]). Как известно, в настоящее время обсуждается возможность восстановления теней в окрестности ближайших сверхмассивных черных дыр не только для классических черных дыр Керра–Ньюмена, но и для некоторых их обобщений.

После открытия какого-либо физического (или астрономического) явления появляется и его теоретическое объяснение, однако весьма не часто теоретические предсказания реализуются в экспериментах или астрономических наблюдениях, поэтому целесообразно напомнить, что идея использовать наземные и наземно-космические глобальные системы радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), работающие в миллиметровом или субмиллиметровом диапазоне, для восстановления тени в окрестности Галактического центра была предложена в работе [2] (что естественным образом может быть обобщено на другие сверхмассивные черные дыры, такие как черная дыра в центре галактики М87). Возможность восстановить тень черной дыры в Галактическом центре с использованием глобальных наземно-космических (и наземных) интерферометров, работающих в миллиметровом диапазоне, была *впервые* предложена в работе [2]. Предсказание, сделанное в работе [2], замечательным образом полностью подтвердилось, когда коллаборация ТГС восстановила размер тени в Галактическом центре с использованием наземного глобального интерферометра, работающего в миллиметровом диапазоне [3]. Тем самым мысленный эксперимент Дж. Бардина (упоминаемый ниже), по сути дела, превратился еще в один тест общей теории относительности [15, 16]. Факт предсказания возможности обнаружения тени в ГЦ является известным в мировом научном сообществе, в частности, в недавней работе [17] отмечается, что идея восстановления тени черной дыры в центре Галактики с помощью глобальных интерферометров, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн, первоначально была высказана в работе [2]. Как отмечено ранее, предсказание о том, какой необходимо наблюдать объект, с помощью каких средств и что должно получиться в результате наблюдений, в точности реализуется нечасто, как это произошло в случае

предсказания о возможности восстановления тени в ГЦ, реализованного коллаборацией ТГС. Таким образом, важно отметить тот факт, что было реализовано предсказание о возможности восстановления тени черной дыры в Галактическом центре и была подтверждена оценка размера тени для Sgr A* (предсказанная в работе [2] и подтвержденная коллаборацией ТГС [3]), которая составляет примерно 50 угловых микросекунд.

Примерно полвека назад Дж. М. Бардин рассмотрел мысленный эксперимент, в котором за черной дырой с экстремальным вращением ($\hat{a} = 1$) на бесконечности имеется плоский излучающий экран [18], и тогда удаленный наблюдатель, находящийся в экваториальной плоскости, может наблюдать темное пятно, при этом предполагается, что фотоны движутся по геодезическим и не рассеиваются (например, на электронах) в окрестности черной дыры. Похожий рисунок впоследствии был воспроизведен в книге С. Чандрасекара [13]. Однако ни Бардин, ни Чандрасекар не обсуждали возможность наблюдательного обнаружения такого темного пятна (тени), поскольку: а) даже для сверхмассивных черных дыр размеры теней очень малы; б) как правило, не существует светящегося экрана за астрофизической черной дырой; в) довольно трудно отличить темную область (тень) от области с низкой светимостью. Ответы на вопросы о том, каким образом можно восстановить тень из наблюдений, были даны в работе [2]. Действительно, в 2000-е гг. уже обсуждались наземно-космические интерферометры, такие как «Радиоастрон» (угловое разрешение которого на самой короткой длине волны 1,3 см составляло порядка 7 угловых микросекунд) и «Миллиметрон» (с угловым разрешением на несколько порядков лучше), а наземные глобальные системы РСДБ имели угловое разрешение порядка нескольких десятков (или нескольких единиц) угловых микросекунд, что сопоставимо с размером тени в Галактическом центре и M87*. При наличии источников излучения вне фотонных круговых орбит вторичные изображения этих источников должны находиться вблизи тени, и это делает возможным восстановить тень черной дыры, как было предсказано в работе [2] и реализовано в [3] при восстановлении тени черной дыры, находящейся в Галактическом центре.

Напомним определение фотонных круговых орбит. Рассмотрим движение фотона от бесконечности к черной дыре Керра. В этом случае движение фотона определяется многочленом $\hat{R}_{ph}(\hat{r})$ [19, 20]. Как показано в работе [14], если многочлен $\hat{R}_{ph}(\hat{r})$ не имеет корней при значении $\hat{r} > \hat{r}_+ = 1 + \sqrt{1 - \hat{a}^2}$, то фотон захватывается черной дырой, а если многочлен $\hat{R}_{ph}(\hat{r})$ имеет однократный корень $\hat{r}_t > \hat{r}_+$ ($\hat{R}_{ph}(\hat{r}_t) = 0$) (и $d\hat{R}_{ph}/d\hat{r}|_{\hat{r}=\hat{r}_t} > 0$), то имеется рассеяние фотона на черной дыре и приближение фотона к черной дыре сменяется удалением, и в случае, ес-

ли имеется двукратный корень многочлена $\hat{R}_{\text{ph}}(\hat{r}_s) = d\hat{R}_{\text{ph}}/d\hat{r}|_{\hat{r}=\hat{r}_s} = 0$, фотон,двигающийся от бесконечности, приближается к орбите с постоянным значением радиальной координаты $\hat{r}_s = \text{const.}$ Эти орбиты в литературе часто называются *круговыми*, хотя в точности круговыми они являются только в случае экваториального движения при $\eta = 0$.

При рассмотрении обобщений классической метрики черной дыры Керра необходимо доказать, что для области значений прицельных параметров внутри области, которую они называют «тенью», действительно происходит захват фотонов обобщенной черной дырой, т. е. необходимо было обобщить утверждения работы [14] на случай обобщенной метрики черной дыры. При отсутствии доказательства указанного утверждения для обобщенной метрики черной дыры можно говорить только о прицельных параметрах, соответствующих круговым фотонным орбитам, а то, что эти области констант движения разделяют области захвата и рассеяния (как это происходит для черных дыр Керра), остается недоказанным предположением, тем самым отстается недоказанным, что параметры движения, соответствующие круговым фотонным орбитам, определяют границу тени.

В работе [2] отмечено, что кривая $\eta(\xi)$, определяющая множество значений констант движения (η, ξ) , соответствующих двукратному корню многочлена $\hat{R}_{\text{ph}}(\hat{r})$, и максимальное значение функции $\eta(\xi)$, равное 27, принимается при значении $\xi = 2a$, т. е. $\eta(2a) = 27$. В этом случае при экваториальном положении удаленного наблюдателя граница тени определяется кривой $\beta(\alpha)$ (в соответствии с обозначениями работы [2]), причем максимальное значение функции $\beta(\alpha)$, равное $5\sqrt{5}$, принимается при значении $\alpha = 2a$, тем самым размер тени в направлении вращения черной дыры в случае экваториального положения удаленного наблюдателя не зависит от значения спина a .

Если рассмотреть движение фотонов от бесконечности к черной дыре, то, как было отмечено ранее, для черных дыр, описываемых метриками Керра и Райсснера–Нордстрема, форма и размер тени определяются прицельными параметрами для фотонов, навивающихся на предельную орбиту с постоянным значением радиальной координаты. Таким образом, если найти неустойчивые круговые орбиты для этих метрик, то задача определения формы и размера тени будет решена. Однако в случае обобщения таких метрик оказывается возможным то, что имеются неустойчивые фотонные орбиты при отсутствии теней. Такие примеры приведены, например, в работах [21–23]. Поэтому при рассмотрении обобщений метрик Керра–Ньюмена необходимо доказать, что на самом деле изотропные геодезические с параметрами движения внутри соответствующей замкнутой ограниченной области захватываются черной дырой и тем самым формируют тень, в то время как геодезические с прицельными параметрами этой области рассеиваются черной дырой.

3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕОРИЯХ ГРАВИТАЦИИ И НЕУЧТЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ

В последние годы появилось множество теоретических работ, в которых рассматриваются обобщения модели черной дыры Керра для Галактического центра (и центров других галактик), несмотря на то, что точность восстановления изображения в окрестности тени пока не позволяет однозначно оценить даже спин черной дыры в простейшей модели метрики Керра. В настоящее время угловое разрешение интерферометра ТГС на длине волны 1,3 мм составляет примерно 25 угловых микросекунд, и для восстановления изображения кольца с угловым диаметром примерно 42 угловые микросекунды в окрестности тени в М87* коллаборации ТГС, в которой участвовали несколько сотен исследователей, понадобилось 3 года, а для восстановления тени в ГЦ — более 5 лет. Напомним, что угловой диаметр тени черной дыры в Галактическом центре имеет примерно 52 угловые микросекунды, а яркое изображение в окрестности тени характеризуется переменностью на масштабах порядка десятков минут и более. Планируется, что следующее поколение ТГС (Next Generation of Event Horizon Telescope — ngEHT) будет проводить наблюдения на длине волны 0,87 мм, т. е. примерно в 1,5 раза короче, чем длина волны 1,3 мм*. Таким образом, только через 5–10 лет могут ожидать улучшения изображения колец в окрестности черных дыр в М87* и Sgr A*, полученные с помощью интерферометра ngEHT, имеющего угловое разрешение примерно в 1,5 раза лучше.

В последние годы сделан большой шаг вперед в проверке эффектов ОТО и стало возможным проверить предсказания общей теории относительности в наблюдениях и экспериментах. Этот успех стимулировал появление большого количества работ, в которых авторы при рассмотрении альтернативных теорий гравитации выражали надежду на то, что развитие этих исследований приведет к объяснению темной материи и темной энергии как гравитационного эффекта [24–27]. Однако, по крайней мере пока, предложенные альтернативные теории гравитации не продемонстрировали свое превосходство над стандартной ОТО, т. е. до сих пор нет ни одной альтернативной теории гравитации, которая описывала бы все наблюдательные и экспериментальные эффекты ОТО и в то же время объясняла феномены темной материи и темной энергии как эффекты, связанные с изменением теории гравитации.

Также следует отметить, что при обсуждении теней черных дыр в альтернативных теориях гравитации обычно рассматривают гипотетические эксперименты, в которых отклонения от предсказаний ОТО могут быть обнаружены в мысленном эксперименте, в котором отбрасываются такие важные реалистичные компоненты для модели астрофизической

* <https://www.ngeht.org/sgra-image-announcement>.

черной дыры, как наличие гравитирующего вещества в ее окрестности, плазменные эффекты, отклонение траекторий движения фотонов от изотропных геодезических в заданной метрике и т. п. Например, при первоначальных обсуждениях астрономических задач, которые можно было бы решить с использованием наземно-космического интерферометра «Радиоастрон», предполагалось, что радиоизлучение на использованных длинах волн (в том числе на наиболее короткой длине волны 1,3 см) распространяется по изотропным геодезическим в окрестности черных дыр, включая сверхмассивную черную дыру в Галактическом центре, и тогда можно было бы наблюдать с помощью этого инструмента структуры размером порядка 7 угловых микросекунд, т. е. сопоставимые по размеру с горизонтом событий этой черной дыры. Однако, как показало численное моделирование, проведенное в работах [28, 29], радиоизлучение на длинах волн, используемых для наблюдений «Радиоастрона», рассеивается, и тем самым простейшая теоретическая модель, где рассматривается только распространение излучения в метрике черной дыры, является адекватной для описания распространения излучения на длине 1,3 мм, используемой для наблюдений ТГС, и неприемлемой для интерпретации наблюдений Галактического центра с помощью интерферометра «Радиоастрон».

Итак, сделав один шаг от мысленных экспериментов к экспериментальной проверке предсказаний, в работе [1] сделано два шага назад вновь к рассмотрению в мысленных экспериментах наблюдательных проявлений неэйнштейновских теорий гравитации, большая часть из которых, как может оказаться в ближайшем будущем, не может рассматриваться как приемлемое обобщение ОТО.

4. АЛГОРИТМ НЬЮМЕНА–ДЖЕНИСА В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕОРИЯХ ГРАВИТАЦИИ

Этот алгоритм, впоследствии называемый по именам авторов, был продемонстрирован ими для «вывода» метрики Керра из метрики Шварцшильда 60 лет назад [30] (следует заметить, что эти авторы ставили слово «вывод» в кавычки, т. е. считали его весьма условным). Этот прием продемонстрировал успешное применение тетрад Ньюмена–Пенроуза, незадолго до этого предложенный Ньюменом совместно с Пенроузом [31]. Сам Т. Ньюмен при обсуждении этого подхода в 2005 г. называл используемую им и Дженисом операцию по получению метрики Керра «грязным трюком». Ряд авторов исследовали возможность получения вращающихся решений из статических в рамках альтернативных теорий гравитации.

Так, авторы работы [32] обнаружили, что применение алгоритма Ньюмена–Джениса к произвольному сферически-симметричному решению в теориях гравитации, отличных от общей теории относительности, приводит к патологиям в результирующей аксиально-симметричной метрике.

В частности, эти авторы отметили, что в целом алгоритм Ньюмена–Джениса не следует использовать для построения решений для вращающихся черных дыр вне рамок общей теории относительности. Однако в работе [1] (как и примерно в десятке других работ этих авторов) без видимых сомнений применяется алгоритм Ньюмена–Джениса к сферически-симметричной метрике в неэйнштейновских теориях, в частности к модели гравитации Хорндески и бамблби. Ясно, что с учетом предостережений авторов [32] при использовании алгоритма Ньюмена–Джениса необходимо было бы доказать, что полученные метрики на самом деле являются решениями типа вращающихся черных дыр в указанных альтернативных теориях гравитации. В отсутствие такого доказательства попросту не имеет смысла говорить об астрофизических эффектах, связанных с этими объектами, поскольку нет оснований ожидать, что такие объекты существуют в природе. В частности, нет смысла обсуждать тени в окрестности этих объектов, как это делается в работе [1].

5. ВЫВОДЫ

Реакция редакционных коллегий научных журналов на случаи «неатрибутированного заимствования из работ других авторов» характеризуется широким спектром различных возможностей: от безусловного ретрагирования статей с таким заимствованием (как описывается ниже в статье [33]) до простого игнорирования имеющегося факта заимствования. Следует отметить, что в случаях перерисовывания рисунков с минимальными изменениями факты заимствования представляются особенно наглядными.

В статье [1] присутствует ссылка на работу [35], где имеется большое неатрибутированное заимствование (а по сути дела плагиат), на что было указано в комментарии [34]. Так, в этом комментарии к статье [35] сказано: «Если сравнить рисунок 2 из работы [2] (где рассмотрены значения спина $a = 0$, $a = 0,5$, $a = 1$) и рисунок 2 (верхняя панель) из работы [35] (где рассмотрены значения спина $a = 0$, $a = 0,3$, $a = 0,5$, $a = 0,9$, $a = 0,98$), то можно прийти к выводу, что эти рисунки в большой степени совпадают, тем самым обсуждаются, по сути дела, одни и те же свойства теней (изменение формы теней и размер тени в направлении вращения, не зависящий от величины спина), т.е. в более поздней работе [35] не отмечено, что в указанном случае обсуждаются свойства теней, известные и обсуждаемые в литературе уже в течение 20 лет...» Пояснений или комментариев по поводу подобного сходства рисунков в этих двух указанных работах ([2] и [35]) авторами «ответа» [37] не было приведено, т.е. этот факт был попросту проигнорирован. Поэтому в статье [37] приведен не ответ на комментарий [34], а по сути дела формальная бюрократическая отписка. Впоследствии в статье [1] не указывается, что в работе [35] обнаружено большое неатрибутированное заимствование, на которое указано в работе [34], тем самым реклами-

руется работа, содержащая такого рода заимствование. Очевидно, что такое неадекватное представление материала вряд ли можно признать приемлемым.

К сожалению, подобное «неатрибутированное заимствование» авторов работы [35] не единично. В частности, работа [36] была доложена на XXVII Международной конференции молодых ученых и специалистов (XXVII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, AYSS-2023), проведенной в 2023 г. в ОИЯИ, впоследствии эта работа была опубликована в журнале «Письма в ЭЧАЯ». Можно заметить, что на с. 13 (или на слайде 11 презентации О. И. Зенина, находящейся на сайте конференции «AYSS-2023»*) и на с. 14 презентации О. И. Зенина** на международной конференции «Quarks-2024» приведены изображения теней для метрики Керра и различных значений параметров спина a , совпадающие с рис. 2 из статьи [35], однако сравнение этого рисунка с рис. 2 из статьи [2] показывает, что указанные рисунки в большей степени совпадают и различаются только тем, что в статье [35] приведены значения спина $a = 0, 0,3, 0,5, 0,9, 0,98$, а в статье [2] — $a = 0, 0,5, 1$, т. е. различия в этих рисунках весьма незначительны, и обсуждаются одни и те же свойства зависимости формы тени от спина при расположении наблюдателя в экваториальной плоскости. То есть в статье [35] и докладах О. И. Зенина перерисованы и выданы за свои оригинальные рисунки, несмотря на то, что весьма похожие рисунки были опубликованы в статье [2], а замечание [34], что это неатрибутированное заимствование, попросту осталось проигнорированным.

В недавней публикации в журнале «Nature» [33] рассмотрены многочисленные примеры заказного покупного авторства, плагиата и другие случаи нарушения публикационной этики российскими авторами, в частности, детально обсужден подобный случай повторного воспроизведения рисунков статьи другими авторами и отмечено, что статья с повторным воспроизведением опубликованного ранее рисунка была отозвана редколлегией журнала «Proteomics» вследствие «существенного неатрибутированного совпадения рисунков». Как отмечено выше, имеет место существенное неатрибутированное совпадение рисунка из статьи [35] и аналогичного рисунка из указанной презентации О. И. Зенина, с одной стороны, и рис. 2 из статьи [2] — с другой, однако редакционные коллегии отечественных журналов обычно существенно более толерантны при рассмотрении подобных случаев (см., например, обсуждение этого вопроса в комментарии [34] и «ответе» [37], где большая часть утверждений комментария [34] попросту проигнорирована). В «ответе» [37], в частности, утверждается, что авторы показали, что фотонные круговые

* <https://indico.jinr.ru/event/3792/contributions/23361/attachments/17336/29494/Зенин.pdf>.

** <https://indico.quarks.ru/event/2024/contributions/908/attachments/891/1082/Zenin.pdf>.

орбиты для соответствующей метрики для модели нелокальной гравитации определяют границу тени. Однако с этим утверждением трудно согласиться, поскольку, для того чтобы имела тень, все фотоны, двигающиеся в бесконечности по изотропным геодезическим, соответствующим прицельным параметрам внутри замкнутой ограниченной кривой («границей тени»), должны захватываться черной дырой, в то время как фотоны, прицельные параметры которых находятся вне этой замкнутой ограниченной области, рассеиваются черной дырой, что в приведенном «ответе» не было показано.

Как уже отмечалось ранее, то, что фотонные круговые орбиты соответствуют границе тени для черной дыры Керра, показано в работах [2, 14], а для черной дыры Райсснера–Нордстрема аналогичное утверждение представлено в работах [39–42]. Следует отметить, что в ряде недавних работ показано для некоторых метрик, являющихся обобщением решения Керра–Ньюмена, что возможно существование фотонных круговых орбит при отсутствии теней. Этот факт имеет не только теоретическое, но и практическое значение, поскольку тени галактических центров, как, например, для M87* и Sgr A*, могут быть получены из анализа РСДБ-наблюдений, в то же время при отсутствии тени проверить наблюдением наличие или отсутствие круговых фотонных орбит представляется весьма затруднительным.

В работе [38] (которая по сути дела является расширенным вариантом «ответа» [37]), по словам авторов, обсуждаются тени черных дыр для семи альтернативных теорий гравитации. Однако в работе [38], как и в [35], не доказано, что при наличии соответствующих круговых фотонных орбит действительно имеют место тени, или, как отмечено выше, не показано, что все фотоны, двигающиеся в бесконечности по изотропным геодезическим, соответствующим прицельным параметрам внутри замкнутой ограниченной кривой («границей тени»), должны захватываться черной дырой, а фотоны, прицельные параметры которых соответствуют границе тени, должны асимптотически приближаться к круговой орбите с постоянным значением радиальной координаты.

Авторы работы [38] утверждают, что они представили формы и размеры теней для семи различных вариантов «расширенной» теории гравитации, однако, как было отмечено выше, были показаны области значений параметров, соответствующих круговым фотонным орбитам. Следует отметить, что в последние годы действительно предложено множество различных альтернативных теорий гравитации, но ни одна из этих теорий не была признана предпочтительнее стандартной ОТО, которая с успехом описывает все гравитационные эксперименты и наблюдения. При рассмотрении идеализированных моделей галактических центров, в которых изучается поведение изотропных геодезических в заданных метриках, можно ожидать в наблюдениях отклонения от предсказаний ОТО, причем эти отклонения вызваны не действием альтернативной теории гравитации, а влиянием неучтенных параметров моделей галакти-

ческих центров. Когда обсуждаются реалистичные теоретические модели галактических центров, то наряду с метрикой, описывающей черную дыру (или ее обобщением в альтернативной теории гравитации), имеются такие компоненты модели, как распределение массы звездного скопления, возможное пространственное распределение массы темной материи, плазменные эффекты и подобные феномены. Влияние этих факторов на результаты астрономических наблюдений при использовании простейшей модели может быть интерпретировано как обнаружение признаков альтернативной теории гравитации.

Подведем некоторые итоги нашему обсуждению выше. Пока ни одна из альтернативных теорий гравитации не может быть принята как достойная и предпочтительная замена ОТО, поэтому результаты, получаемые в рамках рассматриваемых альтернативных теорий гравитации, не представляют такого же интереса, как результаты, полученные для ОТО. Как показал анализ авторов [32], применение алгоритма Ньюмена–Джениса не гарантирует получение корректных решений типа вращающихся черных дыр в альтернативных теориях гравитации. Кроме того, в отличие от случаев черных дыр Керра–Ньюмена, для их обобщений наличие неустойчивых круговых фотонных орбит не означает, что обнаружена тень черной дыры, как показано, в частности, в работах [21, 23]. На сессии секции ядерной физики Отделения физических наук РАН, проведенной 17 февраля 2025 г., посвященной 70-летию В. А. Рубакова, С. О. Алексееву был задан вопрос, почему он называет тенями множество критических значений прицельных параметров, соответствующих неустойчивым круговым фотонным орбитам. Он ответил, что «мы с этим вопросом отдельно разбираемся» (презентация С. О. Алексеева доступна на сайте конференции, начиная с 40:55 на https://vkvideo.ru/video-229096117_456239030), хотя более естественным кажется порядок, когда сначала разбираются, а затем делают доклады и пишут работы, где делают заявления, которые в этом случае были бы более обоснованными. Однако никаких положительных результатов этого «разбирательства» в обсуждаемой статье не представлено, как и доказательств того, что найдены тени черных дыр в рассматриваемых альтернативных теориях гравитации. Также не доказано, что приведенные метрики являются решениями типа черных дыр для рассматриваемых неэйнштейновских теорий гравитации, поскольку авторы статьи, как отмечалось ранее, попросту продекларировали, что нашли некоторую метрику, где учтено вращение, и эта метрика представляет собой черную дыру для теории Хорндески и бамблби (ведь если представлены метрики не являются решениями этих неэйнштейновских теорий гравитации, то последующие обсуждения не имеют никакого смысла). Также и после получения множества критических значений прицельных параметров, соответствующих неустойчивой круговой фотонной орбите, авторы безосновательно заявили, что ими получены тени для решений типа черных дыр в альтернативных теориях гравитации. Последнее за-

мечание касается возможности обнаружения признаков каких-либо альтернативных теорий гравитации из наблюдений Галактического центра или M87*. Следует отметить, что С.О.Алексеев и др. рассматривают идеализированную модель, в которой имеется только черная дыра (или ее обобщение) и геодезические в выписанной метрике. Однако в окрестности черной дыры имеется не только сверхмассивная черная дыра, но и дополнительное распределение массы, связанное с наличием звездного скопления, плазмы и, возможно, темной материи. Можно ожидать, что знание о параметрах черной дыры будет существенно улучшено, однако прогресс знаний о пространственном распределении массы и влиянии плазменных эффектов достаточно медленный и, возможно, небольшие различия формы и размера тени черной дыры в альтернативной теории гравитации в принципе неотличимы от стандартной тени черной дыры Керра вследствие отсутствия детального знания пространственного распределения массы и влияния плазменных эффектов.

Имеется интересное отличие доклада С.О.Алексеева от текста обсуждаемой статьи. Так, в докладе он отметил, что его группа «была вдохновлена исследованиями», представленными в работах [2, 14, 15, 42] (см. также с. 14 в презентации С.О.Алексеева на указанной сессии ОФН РАН (<https://indico.inr.ac.ru/event/5/sessions/39/#20250217>)). Однако при написании статьи [1] «вдохновение» указанными статьями прошло и авторы не упомянули работы [2, 14, 15] в представленном С.О.Алексеевым докладе на сессии РАН. Авторы доклада посчитали необходимым отметить важность содержания этих работ и то, что их необходимо цитировать. Тем самым видится существенное несоответствие между произнесенным докладом и текстом статьи, и непонятно, в каком случае авторы выражали свою позицию по поводу представленного материала. Следует также отметить, что в работе [1] приводится ссылка [35], т.е. на работу, в которой имеются большие неатрибутированные заимствования (т.е. по сути дела плагиат) и по поводу содержания которой приведен целый ряд других замечаний, отмеченных в комментарии [34]. Отсутствие аргументированного ответа на вопросы, приведенные в [34], позволяет говорить о том, что выводы, сделанные в работе [35], также являются безосновательными декларациями, как и утверждения в статье [1]. В то же время в ней отсутствуют ссылки на работу [2], в которой ранее приводились форма и размер тени для черной дыры Керра при различных значениях спина в случае положения удаленного наблюдателя в экваториальной плоскости, воспроизведенные с минимальными изменениями в работе [35], что свидетельствует о предвзятом и неадекватном изложении материала в [1].

Подводя итоги обсуждения статьи [1], следует отметить, что, как было отмечено в работе [32], применение процедуры Ньюмена–Джениса к статическим сферически-симметричным решениям в неэйнштейновских теориях гравитации не только не гарантирует получение решений типа вращающихся черных дыр в рассматриваемых альтернативных тео-

риях, но и в большей части случаев приводит к получению метрик с патологиями. Поэтому, если применяется процедура Ньюмена–Джениса для «получения» решения типа вращающейся черной дыры в неэйнштейновской теории гравитации, необходимо доказать, что полученная с использованием процедуры Ньюмена–Джениса метрика действительно является метрикой типа вращающейся черной дыры. Желательно было бы также доказать, что полученная для заданного значения спина метрика единственная, подобно тому, как это было доказано для метрики Керра в ОТО, поскольку если для заданного значения спина имеется несколько вариантов метрики типа вращающейся черной дыры, то даже в случае, если эта теория неэйнштейновской гравитации реализуется в природе, не факт, что рассматриваемое решение описывает заданный нами объект (например, ГЦ или М87*). Как показано в ряде примеров, несмотря на то, что для черной дыры Керра при наличии круговой фотонной орбиты можно говорить о значениях прицельных параметров, определяющих форму и размер теней, для неэйнштейновских теорий гравитации такое взаимно-однозначное соответствие может не выполняться. В работе [1], по сути, описывается мысленный эксперимент, в котором рассматривается движение фотонов по геодезическим в метрике, которая, по мнению авторов этой работы, является метрикой типа вращающейся черной дыры в неэйнштейновской теории гравитации без всякого влияния на них окружающей среды в окрестности такого объекта. Однако игнорирование эффектов, связанных с наличием плазмы в окрестности астрофизической черной дыры, может привести к неверным выводам, в частности, как показано много лет назад [28], при РСДБ-наблюдениях на длине порядка 1 см происходит рассеяние электромагнитного излучения на электронах и тень черной дыры невозможно восстановить, поэтому важное значение имеет реалистичная постановка задачи, в которой учитываются эффекты влияния среды (плазмы, пространственного распределения материи и т. п.).

В заключение можно отметить, что в недавней работе [43] обсуждены тени квантовых черных дыр и проблемы, связанные с их реконструкцией из наблюдательных данных.

Благодарности. Автор благодарит Е. Е. Донца за обсуждение темы теней сверхмассивных черных дыр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexeyev S. O., Zenin O. I. Black Hole Shadows in Horndesky and Bumblebee Models: Rotation Accounting // *Phys. Part. Nucl.* 2025. V. 56, No. 3. P. 612–617.
2. Zakharov A. F., Nucita A. A., De Paolis F., Ingrosso G. Measuring the Black Hole Parameters in the Galactic Center with RADIOASTRON // *New Astron.* 2005. V. 10, No. 3. P. 479–489; arXiv:astro-ph/0411511.
3. Akiyama K., Alberdi A., Alef W. et al. (Event Horizon Telescope Collab.). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the

- Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way // *Astrophys. J. Lett.* 2022. V. 930. L12.
4. *Wheeler J. A.* Our Universe: The Known and the Unknown // *Am. Scientist.* 1969. V. 56, No. 1. P. 1–20.
 5. *Ruffini R., Wheeler J. A.* Introducing the Black Hole // *Phys. Today.* 1971. V. 24, Iss. 1. P. 30–41.
 6. *Wheeler J. A., Ford K.* Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics. New York: W. W. Norton, 2000.
 7. *Zakharov A. F.* // *Intern. J. Mod. Phys. D.* 2019. V. 28, Iss. 13. 1941003; arXiv:1901.08343.
 8. *Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S.* Experimental Studies of Black Holes: Status and Future Prospects // *Astron. Astrophys. Rev.* 2024. V. 32, Iss. 1. ID. 3; arXiv:2404.03522.
 9. *Israel W.* Event Horizons in Static Vacuum Space-Times // *Phys. Rev.* 1967. V. 164, Iss. 5. P. 1776–1779.
 10. *Israel W.* Event Horizons in Static Electrovac Space-Times // *Commun. Math. Phys.* 1967. V. 8, Iss. 3. P. 245–260.
 11. *Carter B.* Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom // *Phys. Rev. Lett.* 1971. V. 26, Iss. 6. P. 331–333.
 12. *Thorne K. S.* Black Holes and Time Warps. Einstein's Outrageous Legacy. New York: W. W. Norton & Company, 1994.
 13. *Chandrasekhar S.* Mathematical Theory of Black Holes. Oxford: Clarendon Press, 1983.
 14. *Zakharov A. F.* Types of Unbound Geodesics in Kerr Metric // *Sov. Phys. JETP.* 1986. V. 64, Iss. 1. P. 1–3.
 15. *Zakharov A. F.* Shadows near Supermassive Black Holes: From a Theoretical Concept to GR Test // *Intern. J. Mod. Phys. D.* 2024. V. 33, Iss. 14. 2340004; arXiv:2308.01301.
 16. *Zakharov A. F.* Shadow in the Galactic Center: Theoretical Concept — Prediction — Realization // *Natural Sci. Rev.* 2025. V. 2. 100402; arXiv: 2506.16927.
 17. *Bambhaniya P., Joshi A. B., Dey D., Joshi P. S., Mazumdar A., Harada T., Nakao K.* Relativistic Orbits of S2 Star in the Presence of Scalar Field // *Eur. Phys. J. C.* 2024. V. 84. ID. 124.
 18. *Bardeen J. M.* Timelike and Null Geodesics in the Kerr Metric // *Black Holes (Les Astres Occlus)* / Eds: B. S. DeWitt, C. DeWitt-Morette. New York: Gordon & Breach, 1973. P. 215–239.
 19. *Захаров А. Ф.* Орбиты фотонов и ультрарелятивистских частиц в гравитационном поле вращающихся черных дыр // *Астрон. журн.* 1991. Т. 68, № 1. С. 58–64.
 20. *Zakharov A. F.* On the Hotspot near a Kerr Black Hole: Monte Carlo Simulations // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1994. V. 264. P. 283–288.
 21. *Zakharov A. F.* Galactic Center Shadows: Beyond the Standard Model // *Phys. At. Nucl.* 2025. V. 88, Iss. 1. P. 154–170.
 22. *Захаров А. Ф.* Тени галактических центров: от сверхмассивных черных дыр к голым сингулярностям и кротовым норам // *ЭЧАЯ.* 2025. Т. 56, вып. 2. С. 208–218.

23. *Захаров А. Ф.* Тени и круговые фотонные орбиты: рассмотрение некоторых случаев обобщений черных дыр Керра–Ньюмена // Письма в ЭЧАЯ. 2025. Т. 22, вып. 3. С. 456–468.
24. *Zakharov A. F., Capozziello S., De Paolis F., Ingrosso G., Nucita A. A.* The Role of Dark Matter and Dark Energy in Cosmological Models: Theoretical Overview // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 148, Iss. 1–4. P. 301–313.
25. *Capozziello S., Francaviglia M.* Extended Theories of Gravity and Their Cosmological and Astrophysical Applications // *Gen. Rel. Grav.* 2008. V. 40, Iss. 2–3. P. 357–420.
26. *Capozziello S., De Laurentis M.* Extended Theories of Gravity // *Phys. Rep.* 2011. V. 509, Iss. 4. P. 167–321.
27. *Faraoni V., Capozziello S.* Beyond Einstein Gravity: A Survey of Gravitational Theories for Cosmology and Astrophysics. V. 170. Berlin: Springer, 2011.
28. *Falcke H., Melia F., Agol E.* Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center // *Astrophys. J. Lett.* 2000. V. 528, Iss. 1. P. L13–L16.
29. *Melia F., Falcke H.* Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2001. V. 39, Iss. 1. P. 309–352.
30. *Newman E. T., Janis A. I.* Note on the Kerr Spinning Particle Metric // *J. Math. Phys.* 1965. V. 6, Iss. 1. P. 915–917.
31. *Newman E. T., Penrose R.* Note on the Kerr Spinning Particle Metric // *J. Math. Phys.* 1962. V. 3, Iss. 3. P. 566–578.
32. *Hansen D., Yunes N.* Applicability of the Newman–Janis Algorithm to Black Hole Solutions of Modified Gravity Theories // *Phys. Rev. D.* 2013. V. 88, Iss. 6. 104020.
33. *Garisto D.* Publishing Nightmare: A Researcher’s Quest to Keep His Own Work from Being Plagiarized // *Nature.* 2024. V. 663. P. 260–262.
34. *Захаров А. Ф.* Комментарий к статье С. О. Алексеева и др. «Нелокальные гравитационные теории и изображения теней черных дыр» // ЖЭТФ. 2025. Т. 167, № 2. С. 220–223.
35. *Алексеев С. О., Байдерин А. А., Немтинова А. В., Зенин О. И.* Нелокальные гравитационные теории и изображения теней черных дыр // ЖЭТФ. 2024. Т. 165. С. 508–515.
36. *Zenin O. I., Alexeyev S. O., Nemtinova A. V., Baiderin A. A.* Extended Gravity and Black Hole Shadows: Rotation Accounting // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21, Iss. 3. P. 581–583.
37. *Алексеев С. О., Байдерин А. А., Немтинова А. В., Зенин О. И.* Ответ на комментарий к статье С. О. Алексеева и др. «Нелокальные гравитационные теории и изображения теней черных дыр» (ЖЭТФ. 165, 508 (2024)) // ЖЭТФ. 2025. Т. 167. С. 224–226.
38. *Алексеев С. О., Байдерин А. А., Зенин О. И.* Моделирование теней черных дыр в расширенных теориях гравитации: учет вращения и связанные эффекты // ЖЭТФ. 2025. Т. 167, вып. 4. С. 477–490.
39. *Zakharov A. F.* Capture Cross Sections for a Charged Reissner–Nordström Black Hole — Photons Ultrarelativistic Uncharged Particles and Slow Uncharged Particles // *Sov. Astron.* 1991. V. 35. P. 147–150.
40. *Zakharov A. F.* Particle Capture Cross Sections for a Reissner–Nordström Black Hole // *Class. Quant. Grav.* 1994. V. 11, Iss. 4. P. 1027–1033.

41. *Zakharov A. F., De Paolis F., Ingrosso G., Nucita A. A.* Direct Measurements of Black Hole Charge with Future Astrometrical Missions // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 442, Iss. 2. P. 795–799.
42. *Zakharov A. F.* Constraints on a Charge in the Reissner–Nordström Metric for the Black Hole at the Galactic Center // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 90, Iss. 6. 062007.
43. *Захаров А. Ф.* О квантовых черных дырах и их тенях // Письма в ЭЧАЯ (принято к публикации).