

ТЕСТЫ ТЕОРИЙ ГРАВИТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБЛЮДЕНИЙ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА И ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ M87

*А. Ф. Захаров**

Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

В октябре 2019 г. Нобелевская премия по физике была присуждена за прояснение «оснований нашего современного понимания истории Вселенной от Большого взрыва до наших дней», в частности, половина премии вручена Дж. Пиблсу за его работы по физической космологии, половина премии поделена между М. Майором и Д. Кело за открытие первой экзопланеты вблизи звезды солнечного типа. Фактически это означает также признание важности работ в области гравитации, астрофизики и космологии. Обсуждается применение астрономических наблюдений Галактического Центра для получения ограничений на гравитационное поле вблизи сверхмассивной черной дыры. Со времен Ньютона известно, что гравитационный потенциал можно оценить с помощью анализа движения пробных частиц в этом поле. В настоящее время имеются два основных метода наблюдения для исследования гравитационного потенциала в Галактическом Центре и доказательства наличия там сверхмассивной черной дыры, а именно: мониторинг орбит ярких звезд вблизи Галактического Центра с использованием самых больших телескопов с адаптивной оптикой и измерение размера и формы теней вокруг черной дыры, что дает альтернативную возможность оценить параметры черной дыры с помощью телескопа горизонта событий. В апреле 2019 г. коллаборация «Телескоп горизонта событий» (The Event Horizon Telescope) сообщила о восстановлении ярких структур в окрестности сверхмассивной черной дыры в центре галактики M87. В наших работах обсуждались возможности проверки теорий гравитации с использованием наблюдений ярких звезд в центре Галактики. Недавно коллаборация LIGO–Virgo не только обнаружила гравитационные волны и двойные черные дыры, но и определила верхний предел массы гравитона: $m_g < 1,2 \cdot 10^{-22}$ эВ [1]. Показано, что анализ траекторий ярких звезд может с сопоставимой точностью ограничивать массу гравитона. Обсуждаются возможности

*E-mail: alex_f_zakharov5@mail.ru

как значительного улучшения текущих оценок массы гравитона с использованием в последующем наблюдений ярких звезд телескопами Keck, VLT, GRAVITY, E-ELT и TMT, так и достижения оценки массы гравитона $m_g < 5 \cdot 10^{-23}$ эВ [2]. Также обсуждаются недавние результаты коллабораций GRAVITY и Keck по оценке гравитационного красного смещения спектра звезды S2 вблизи прохода перицентра ее орбиты. Эти данные подтвердили предсказания общей теории относительности для Галактического Центра. Поэтому такой анализ позволяет использовать наблюдения ярких звезд вблизи Галактического Центра как полезный метод получения ограничений на параметры закона гравитации, в частности, для проверки общей теории относительности. Показано, что в будущем оценки массы гравитона, определяемые с помощью анализа свойств траекторий ярких звезд, будут лучше имеющихся в настоящее время ограничений, полученных из данных наблюдений гравитационно-волновых сигналов с использованием интерферометров LIGO–Virgo. Как показано в работе [3], аналогично можно получать ограничения на приливной заряд для черной дыры. Анализ размера теней вокруг сверхмассивной черной дыры в Галактическом Центре (или/и в центре галактики M87), наблюдаемых с помощью телескопа горизонта событий, также ограничивает параметры различных альтернативных теорий гравитации [4].

In October 2019, the Nobel prize in physics was awarded for clarifying “the foundations of our modern understanding of the history of the Universe from the Great Explosion to the present day”, in particular, half of the prize was given to J. Peebles for his work on physical cosmology, and half of the prize was divided between M. Mayor and D. Queloz for the discovery of the first exoplanet near a solar-type star. In fact, this also means recognition of the importance of investigations in gravity, astrophysics and cosmology. The application of astronomical observations of the Galactic Center to obtain restrictions on the gravitational field near a supermassive black hole was discussed in this paper. Since Newton’s times, it has been known that the gravitational potential can be estimated from the analysis of test body motions in this field. There are currently two main methods of observation to study the gravitational potential in the Galactic Center to prove a presence of a supermassive black hole there, namely, (a) monitoring orbits of bright stars near the Galactic Center using the largest telescopes with adaptive optics; (b) measuring the size and shape of shadows around the black hole that provides an alternative way to evaluate the parameters of a black hole with the Event Horizon Telescope. In April 2019, the Event Horizon Telescope collaboration reported the reconstruction of bright structures in the vicinity of the supermassive black hole in the center of M87 galaxy. Earlier, we discussed the opportunities to test theories of gravity with observations of bright stars at the Galactic Center of the Galaxy. Recently, the LIGO–Virgo collaboration not only did it detect gravitational waves and binary black holes, but it also found the upper limit on graviton mass $m_g < 1.2 \cdot 10^{-22}$ eV [1]. We showed that the analysis of the trajectories of bright stars could constrain graviton mass with a comparable accuracy.

We discussed opportunities to improve the current estimates of the graviton mass with subsequent observations by Keck, VLT, GRAVITY, E-ELT and TMT, and thus opportunities to reach a graviton mass constraint such low as $m_g < 5 \cdot 10^{-23}$ eV [2]. We also discussed the recent results of the GRAVITY and Keck collaboration on the estimation of gravitational redshifts for S2 star near its pericenter passage. These results confirmed predictions of General Relativity for the Galactic Center. Therefore, the analysis makes

it possible to consider observations of bright stars near Galactic Center as a useful tool to constrain parameters of gravity theories, in particular to test General Relativity. We have shown that in the future graviton mass constraints found with analysis of trajectories of bright stars will be better than the current estimates obtained from observations of gravitational wave signals using LIGO–Virgo interferometers. As shown in [3], similarly, we could obtain limits on the tidal charge for the black hole. Analysis of the size and shapes of shadows around the supermassive black hole at the Galactic Center (or/and at the center of M87), observed with the Event Horizon Telescope, could constrain parameters of various alternative theories of gravity, as it was discussed in [4].

PACS: 04.80.Cc

1. НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ ПО ФИЗИКЕ В 2019 Г. И ВЛИЯНИЕ Н. Н. БОГОЛЮБОВА НА РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГРАВИТАЦИИ, АСТРОФИЗИКИ И КОСМОЛОГИИ

В последние годы исследования в области гравитации и астрофизики вызывают большой интерес как у теоретиков, так и у экспериментаторов. Так, обнаружение в 2015 г. гравитационных волн, двойных черных дыр, а затем 17 августа 2017 г. открытие сливающихся нейтронных звезд, сопровождающееся вспышкой килоновой, наблюдаемой в широком диапазоне частот электромагнитного излучения (от гамма- до оптического), привело к тому, что в 2017 г. основных создателей гравитационно-волнового лазерного интерферометра LIGO наградили Нобелевской премией. А в 2019 г. Нобелевская премия была присуждена Дж. Пиблсу за теоретические работы в области физической космологии, которая, как известно, тесно связана с теорией гравитации*, и М. Майору и Д. Кело за открытие экзопланеты 51 Пегаса b

*Дж. Пиблс внес существенный вклад в целый ряд важных космологических работ, в частности, Р. Дикке, Дж. Пиблс, П. Ролл и Д. Уилкинсон первыми поняли [5], что наблюдения А. Пензиаса и Р. Вильсона [6] подтверждают предсказания модели горячей Вселенной Г. Гамова, и последующие работы Дж. Пиблса имели решающее значение в превращении космологии из раздела описательной философии в раздел физики [9, 10]. Следует отметить, что впервые фоновое микроволновое излучение было обнаружено в Пулковской обсерватории в 1955 г. Т. А. Шмаоновым [7, 8]. В его работе не было объяснения того, что это является признаком горячей модели Вселенной. Сразу после получения своего результата Шмаонов обратился с вопросами о возможной его интерпретации к своим руководителям С. Э. Хайкину и Н. Л. Кайдановскому, а также известному ныне радиоастроному академику Ю. Н. Парийскому. Однако следует принять во внимание тот факт, что после иммиграции Гамова на Запад его работы предпочитали не цитировать в советской научной литературе. Кроме того, следует отметить, что в 1950-е гг. Хайкин подвергался весьма суровой критике физиками и философами Академии наук и ряда ведущих университетов за отклонения в своих мировоззренческих взглядах от диалектического материализма и эти отклонения проявились в весьма удачной, на наш взгляд, книге «Механика» [11]. К сожалению, в число критиков Хайкина входил и президент АН СССР и директор ФИАН С. И. Вавилов (Хайкин работал в ФИАН в это время). Принимая во внимание, что

в 1995 г. [15] при проведении измерений доплеровского смещения спектральных линий звезды, имеющей экзопланету (первая экзопланета была открыта вблизи пульсара PSR 1257 + 12 [16] **). Космический телескоп «Хеопс» («Cheops») Европейского космического агентства с решающим участием швейцарских ученых был выведен на орбиту российской ракетой-носителем «Союз» с космодрома Коуроу в Гвиане (Франция) 17 декабря 2019 г. (т. е. через несколько дней после проведенной 10 декабря церемонии вручения Нобелевской премии в Стокгольме). С помощью этого телескопа ученым удастся оценить плотность ближайших экзопланет. Краткий обзор исследований в области поиска экзопланет, в частности, с использованием гравитационного микролинзирования приведен в работе [19], в которой обсуждается открытие первой экзопланеты в другой галактике (туманности Андромеды) с использованием наблюдений пиксельного линзирования [20]. Детальное описание различных методов поиска экзопланет приводится в работе [21].

Н. Н. Боголюбов внес огромный вклад в развитие математики (в частности, в теорию динамических систем), математической и теоретической физики, однако теория гравитации (несмотря на то, что эта область теоретической физики достаточно сильно математизирована), по-видимому, не принад-

Хайкин был одним из самых эрудированных советских физиков, а имя Гамова было фактически под запретом, представляется вероятным, что Хайкин, понимая научную значимость полученных Шмаоновым результатов и избегая заведомо необоснованной политизированной критики своих коллег, предпочел не сообщать своему ученику, что фактически эти наблюдения подтверждают модель горячей Вселенной Гамова. В тот период считалось, как утверждает советская космология, что Вселенная бесконечна и во времени, и в пространстве, и только такая концепция соответствует господствовавшей тогда в СССР философии диалектического материализма, в противном случае ученые признавались представителями идеализма [12, 13], в частности, относительно космологических решений А. А. Фридмана в Большой советской энциклопедии было сказано, что «конечно, эти решения [Фридмана] неправомерно рассматривать как основу для моделей всей Вселенной» [14]. Тем самым советская наука фактически отдавала приоритет открытию расширяющейся модели Вселенной Фридмана–Гамова таким зарубежным исследователям, как Леметр, Эйнштейн, де Ситтер, Пиблс и др.

*Идею использовать транзиты и доплеровское смещение для обнаружения планет вне Солнечной системы предложил Отто Людвигович Струве [17] в то время, когда он работал в Калифорнийском университете в Беркли. Струве является одним из замечательных представителей семьи блестящих астрономов, работавших до революции 1917 г. в России. После революции и Гражданской войны он иммигрировал в США, где очень успешно занимался астрономией, в частности, долгое время был главным редактором «Astrophysical Journal» и директором Йеркской обсерватории, куда пригласил на работу одного из самых знаменитых астрофизиков XX в. С. Чандрасекара. В предложенном Струве подходе поиска экзопланет учет (ньютоновской) гравитации является важным элементом теоретической модели. Впоследствии университет в Беркли стал одним из мировых центров, связанных с открытием новых экзопланет с помощью транзитов и измерений доплеровских смещений, и лидер этой группы астрономов Дж. Марси рассматривался как один из реальных кандидатов на присуждение Нобелевской премии [18]. Следует отметить, что временной интервал между высказанной идеей и ее практической реализацией может быть довольно большим и в случае поисков экзопланет составляет более 40 лет.

лежала к числу его основных интересов. Тем не менее влияние Н. Н. Боголюбова на развитие исследований в области гравитации, астрофизики и космологии было очень велико, в частности, он был в числе членов президиума (наряду с В. А. Амбарцумяном, В. Б. Брагинским, Я. Б. Зельдовичем, Е. М. Лифшицем, А. А. Логуновым, М. А. Марковым, Л. И. Седовым, А. А. Соколовым и др.) на V Всесоюзной гравитационной конференции, организованной в МГУ в 1981 г. [23]. Н. Н. Боголюбов председательствовал на сессии, где А. А. Логунов представил результаты работ его группы по предложенной ими релятивистской теории гравитации, в которой имеются две метрики: фоновая метрика Минковского и метрика, описывающая гравитационное поле. По поводу этого доклада Н. Н. Боголюбов отметил, что такого рода теория — «всяческого рода обсуждения» [23]. Впоследствии в рамках биметрической теории гравитации группа А. А. Логунова рассматривала варианты теории с массивным гравитоном. С 1983 г. Н. Н. Боголюбов (наряду с В. А. Амбарцумяном и М. А. Марковым) входил в состав президиума секции гравитации НТС Министерства высшего и среднего специального образования СССР, президиум возглавлял А. А. Логунов. Кроме того, Н. Н. Боголюбов был основателем и главным редактором журнала «Теоретическая и математическая физика», в котором публиковалось довольно много работ по гравитации, в частности по теории массивной гравитации, в период, когда интерес к таким теориям был довольно низок в силу того, что в 1970-х гг. был обнаружен ряд патологий (в том числе духов) у этого класса альтернативных теорий гравитации. Необходимо отметить, что в последние годы теоретики нашли возможность построения теорий массивной гравитации без духов и такие теории рассматриваются как альтернативные эйнштейновской общей теории относительности [22].

Также нужно отметить, что последним аспирантом Н. Н. Боголюбова на физическом факультете МГУ был В. Н. Мельников, который с 1988 г. много лет был президентом Всесоюзного (затем — Российского) гравитационного общества. В. Н. Мельников приложил много усилий для того, чтобы в России исследования по гравитации и связанных с ней космологией и астрофизикой проводились с учетом основных тенденций развития мировой науки. Выбор гравитации в качестве основного объекта исследований был сделан В. Н. Мельниковым не без влияния Н. Н. Боголюбова [23], что говорит о том, что он считал важной эту область исследований.

2. ТЕСТЫ ТЕОРИЙ ГРАВИТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Общая теория относительности (ОТО) была создана А. Эйнштейном в 1915 г. С помощью созданной им теории гравитации, обобщающей ньютоновскую теорию, Эйнштейн в том же году объяснил найденную в середине

XIX в. знаменитым французским астрономом Ж. Леверье аномалию, связанную с орбитальной прецессией Меркурия. В 1919 г. предсказания ОТО об отклонении луча света вблизи солнечного диска во время солнечного затмения были подтверждены данными наблюдений Эддингтона и Дайсона. После этого журналисты всего мира стали писать, что модель Вселенной, в которой действует закон всемирного тяготения Ньютона, должна быть заменена моделью Вселенной, в которой действует закон гравитации Эйнштейна. Когда говорят о практической значимости учета релятивистских поправок, обычно вспоминают позиционные системы GPS/ГЛОНАСС, в которых в случае отсутствия учета релятивистских поправок для хода часов на борту космических аппаратов ошибки определения глобального местоположения достигали бы гигантских значений, и, по сути дела, подобная система глобального позиционирования была бы бесполезна.

Ближайшая сверхмассивная черная дыра расположена в центре нашей Галактики, поэтому этот объект очень привлекателен для наблюдений. Астрономы наблюдают Галактический Центр в различных спектральных диапазонах, включая гамма-, рентгеновский, инфракрасный, оптический и радиодиапазоны. Для оценки параметров гравитационного потенциала в Галактическом Центре используются в качестве пробных частиц фотоны (в этом случае анализируются размер и форма тени в окрестности Галактического Центра) или яркие звезды, которые движутся в окрестности черной дыры. Несмотря на то, что предсказания ОТО подтверждены результатами многих наблюдений и экспериментов (в частности, для гравитационного поля в окрестности черной дыры в Галактическом Центре коллаборация GRAVITY подтвердила предсказания ОТО о гравитационном красном смещении спектра звезды S2 вблизи прохода перицентра 18 мая 2018 г. [24, 25] и эти выводы согласуются с результатами наблюдений, представленными группой Keck [26]), в большей части теоретических моделей достаточно рассмотреть слабые (постньютоновские) поправки ОТО и только вблизи таких объектов, как нейтронные звезды и черные дыры, релятивистские поправки могут не являться малыми. По этой причине для проверки предсказаний ОТО в сильных гравитационных полях рассматриваются физические процессы в окрестности черных дыр.

В начале XXI в. обсуждались астрофизические задачи для подготовляемого к запуску космического телескопа «Радиоастрон», который должен был проводить наблюдения совместно с наземными телескопами. Угловое разрешение такого интерферометра «Земля–космос» могло составлять порядка 7 угловых микросекунд на наиболее короткой длине волны 1,3 см. Масса черной дыры в Галактическом Центре — порядка $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, а расстояние до нее — порядка 8 кпк, тем самым угловой размер радиуса Шварцшильда $R_S \approx 10 \mu\text{as}$ (микроарксекунд), что сопоставимо с угловым разрешением интерферометра. Казалось бы, можно обсудить проявления ОТО, которые можно было бы обнаружить. При предположении, что фотоны только ис-

кривляются гравитационным полем черной дыры, но не рассеиваются вблизи ее окрестности, в работе [27] описаны размер и форма тени (т. е. темной области для удаленного наблюдателя) и показано, что если удаленный наблюдатель находится в экваториальной плоскости, то максимальное критическое значение прицельного параметра, соответствующего тени $|\beta_{\max}|$ в направлении z (которое совпадает с осью вращения черной дыры), есть $\sqrt{27}$ (в единицах GM/c^2), в то время как соответствующее β_{\max} значение прицельного параметра в перпендикулярном направлении оси вращения есть $\alpha_{\max} = 2a$ (a — нормализованное на массу значение спина черной дыры), в данных обозначениях функция $\beta(\alpha)$ определяет критические значения прицельных параметров, разделяющих захват и рассеяние фотонов. Это означает, что для наблюдателя в экваториальной плоскости значение $|\beta_{\max}|$ одно и то же (не зависит от значения спина), тень деформирована в направлении, параллельном экваториальной плоскости, а эта деформация зависит от спина a . Тем самым размер тени для черной дыры в Галактическом Центре — порядка $50 \mu\text{as}$, и, в принципе, структуры с таким размером могли бы наблюдаться с помощью «Радиоастрона». Однако впоследствии выяснилось, что, по-видимому, форма изображения размывается в силу рассеяния фотонов на электронах для сантиметрового диапазона и для обнаружения тени необходимо перейти к миллиметровому и субмиллиметровому диапазону длин волн, т. е. к длинам волн, которые планируется использовать в проектируемом космическом интерферометре «Миллиметрон», как отмечалось в работе [27]. Международная глобальная сеть телескопов, использующих в том числе миллиметровый диапазон длин волн, или так называемый телескоп горизонта событий (The Event Horizon Telescope), работающий как гигантский интерферометр, размером с Землю, проводит наблюдения распределения ярких пятен в окрестности Галактического Центра, и по этому распределению астрономы определяют параметры черной дыры в Галактическом Центре и ограничения на альтернативные теории гравитации. В апреле 2019 г. эта группа сообщила о получении первого изображения сверхмассивной черной дыры в центре галактики M87, которая находится на расстоянии порядка 17 Мпк от нас, масса черной дыры в ее центре $6,5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ (наблюдения были проведены на длине волны 1,3 мм в апреле 2017 г.). Размер тени для этой черной дыры — порядка $42 \mu\text{as}$ [28], т. е. черная дыра в центре галактики M87 более массивна и расположена значительно дальше по сравнению с Галактическим Центром, однако размеры их теней близки (ситуация в некотором смысле похожа на то, что угловые размеры Солнца и Луны, видимые с Земли, весьма близки).

Таким образом, если для теоретика черная дыра — это определенная метрика, которая является вакуумным решением уравнений Эйнштейна с определенными свойствами, то для наблюдателя, как показано в работе [27], черная дыра — это темное пятно или, иными словами, тень, по размерам и форме которой можно определить такие ее параметры, как спин и позици-

онный угол, характеризующий положение удаленного наблюдателя. Говоря более точно, по наблюдениям распределения ярких структур в окрестности черной дыры воспроизводятся форма и размер тени, поскольку при астрономических наблюдениях трудно различить темную область и область с тусклым распределением светимости.

В работе [29] получены выражения для определения размера тени черной дыры типа Рейснера–Нордстрема, и, хотя возникновение существенного электрического заряда в астрофизических условиях маловероятно, в скалярно-тензорных теориях типа Хорндески возникают решения типа Рейснера–Нордстрема, в которых параметр, соответствующий заряду, отражает взаимодействие скалярной и тензорной компонент поля и априорных ограничений на значение этого параметра нет. Кроме того, в теории гравитации с дополнительными измерениями появляются решения типа Рейснера–Нордстрема с приливным зарядом. В работах [30, 31] получены аналитические выражения для размера тени черной дыры типа Рейснера–Нордстрема с приливным зарядом (который может характеризовать дополнительные измерения). На основе наблюдений можно определить ограничения на величину приливного заряда и существование дополнительных пространственных измерений, которые могут влиять на размер тени.

Две группы астрономов проводят наблюдения в инфракрасном диапазоне ярких звезд вблизи Галактического Центра с помощью крупнейших телескопов, оснащенных адаптивной оптикой. Одна группа во главе с Андреа Гец (США) использует два телескопа Кека диаметром 10 м, находящихся на Гавайях, другая группа под руководством Райнера Генцеля (Германия) использует четыре телескопа VLT диаметром 8 м, построенных на высокогорном плато в Чили (в последние годы вступил в строй интерферометр GRAVITY, состоящий из телескопов VLT). Руководитель группы GRAVITY — Франк Эйзенхауэр. Результаты этих групп (Кек и VLT–GRAVITY) являются не противоречащими друг другу, а взаимодополняющими. Наблюдения показали, что звезды движутся по орбитам, близким к эллиптическим, таким образом, можно сделать вывод, что движения этих звезд достаточно хорошо согласуются с потенциалом точечной массы около 4 млн солнечных масс. Галактический Центр находится на расстоянии примерно 8 кпк от Солнца (наиболее точные на настоящий день измерения этого расстояния $R_0 = (8178 \pm 13_{\text{stat}} \pm 22_{\text{syst}})$ пк приведены в работе [25]). Одним из наиболее интересных объектов для оценки гравитационного потенциала в центре Галактики является звезда S2. Орбита этой звезды имеет эксцентриситет $e = 0,88$, период обращения $T = 16$ лет, ожидаемая видимая релятивистская прецессия ее орбиты составляет около $0,83 \mu\text{as}$ в предположении, что объемные распределения масс, такие как звездное скопление или темная материя вблизи центра Галактики, не оказывают существенного влияния на релятивистскую прецессию ее орбиты. Этот эффект подобен орбитальной

прецессии Меркурия при его движении вокруг Солнца. Как показано в работе [32], анализ траектории звезды S2 может быть использован для оценки спина черной дыры и параметров звездного скопления, а также концентрации темной материи в Галактическом Центре. Несмотря на большие усилия, прогресс в решении проблем темной материи (dark matter) и темной энергии (dark energy) очень медленный, поэтому в последние годы были предложены различные альтернативные теории гравитации. В этих теориях феномены темной материи и темной энергии объясняются отличием теории гравитации от классической эйнштейновской. Некоторое время назад было предложено обобщение ОТО, в которой роль лагранжиана Гильберта–Эйнштейна R выполняет функция $f(R) = R^n$. В рамках этой теории при n , существенно отличном от 1, оказывается, возможно объяснить характер кривых вращения спиральных галактик и ускоряющееся расширение Вселенной, однако по данным движения планет в Солнечной системе [33] и данным движения звезды в окрестности Галактического Центра [34] следует заключить, что $n \approx 1$ (таким образом, такая теория гравитации должна быть весьма близка к ОТО). Анализ свойств траектории движения звезды S2 позволяет получать ограничения на параметры альтернативных теорий гравитации, таких как теория R^n -гравитации или потенциал Юкавы, поскольку многие варианты альтернативных теорий гравитации имеют потенциал Юкавы в качестве предела в случае слабого гравитационного поля. В работе [35] нами получены ограничения на параметры потенциала Юкавы, исходя из данных наблюдений траектории движения звезды S2. Таким образом, черная дыра является природной лабораторией для проверки ОТО и других теорий гравитации в сильных гравитационных полях. Как показано в наших работах, параметры этих теорий могут быть эффективно ограничены наблюдениями Галактического Центра. Мы рассмотрели некоторые альтернативные теории гравитации, где их параметры ограничены с помощью таких наблюдений, в частности теорию массивной гравитации (где гравитон имеет ненулевую массу). Этот вариант альтернативной теории обусловлен тем, что, с одной стороны, наблюдается значительная активность в этой области и в последние годы теоретики продемонстрировали возможность создания такой теории без духов, с другой стороны, в последнее время коллаборация LIGO–Virgo в работе [1], в которой обсуждалось открытие гравитационных волн от сливающихся двух черных дыр, представила верхний предел массы гравитона: $m_g < 1,2 \cdot 10^{-22}$ эВ (ограничения на массу гравитона обсуждались и в ряде последующих работ этой коллаборации, в частности, в результате обработки данных события GW170104 коллаборация LIGO–Virgo существенно улучшила оценку массы гравитона: $m_g < 7,7 \cdot 10^{-23}$ эВ [36]). Таким образом, авторы пришли к выводу, что данные их наблюдений не свидетельствуют о значительном отклонении от классической ОТО. В работе [37] мы показали, что на основе данных наблюдений траектории звезды S2 можно получить оценку массы гравитона, такую

как $m_g < 2,9 \cdot 10^{-21}$ эВ. Недавно группа американских астрономов, используя предложенный в нашей работе подход и данные собственных наблюдений звезды S2 на телескопах Keck, улучшили нашу оценку и получили верхнюю оценку массы гравитона $m_g < 1,6 \cdot 10^{-21}$ эВ [38]. Тем самым показано, что анализ траекторий ярких звезд позволяет оценить массу гравитона с сопоставимой точностью по сравнению с подходом, используемым в гравитационно-волновых наблюдениях, и оценки, полученные с помощью этих двух подходов, непротиворечивы. Поэтому такой анализ позволяет использовать наблюдения ярких звезд вблизи центра Галактики как весьма полезный метод для получения ограничений на фундаментальный закон гравитации. В работе [2] мы показали, что в будущем оценки массы гравитона, полученные с помощью анализа свойств траекторий ярких звезд, будут лучше, чем текущие оценки коллаборации LIGO–Virgo. В недавней статье коллаборации GRAVITY [39] обсуждаются предложенные нами подходы для оценки параметров альтернативных теорий гравитации с помощью наблюдений ярких звезд в окрестности Галактического Центра. В работе [3] получены строгие ограничения на значение приливного заряда в метрике Рейснера–Нордстрема, основанные на имеющихся данных наблюдений траектории звезды S2, а также приведены перспективы улучшения оценок приливного заряда (тем самым ограничения на существование дополнительного пространственного измерения в модели Рэндалл–Сундрума) с использованием данных наблюдений телескопов Keck, интерферометра GRAVITY, использующего телескопы VLT, а также гигантских телескопов следующего поколения, таких как Европейский предельно большой телескоп (E-ELT) с диаметром зеркала 39 м (который сооружается в настоящее время в Чили) и американо-китайско-японский телескоп TMT с диаметром зеркала 30 м, который будет построен на Гавайях. В работе [4] показано, что с использованием оценок размера теней вокруг сверхмассивной черной дыры в Галактическом Центре (и/или в центре галактики M87) можно получить ограничения на параметры различных альтернативных теорий гравитации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что важнейшей частицей в теории гравитации является гравитон и в ОТО он безмассовый. В последнее время обсуждаются теории гравитации, в которых гравитон может быть массивным, и рассматриваются различные способы оценки его массы. Так, в первой публикации международной коллаборации LIGO–Virgo говорилось об открытии гравитационных волн (за что ведущие ученые этой коллаборации получили Нобелевскую премию по физике в 2017 г.), а также сообщалось о получении ограничения на массу гравитона на уровне $1,2 \cdot 10^{-22}$ эВ. В работе [37] показано, что данные наблюдений движения яркой звезды S2 в окрестности Галактического

Центра крупнейшими телескопами Keck и VLT (GRAVITY) позволяют с сопоставимой точностью ограничить массу гравитона, а именно на уровне $2,9 \cdot 10^{-21}$ эВ. В работе [2] показано, что дальнейшие точные наблюдения траекторий движения ярких звезд позволят улучшить текущую оценку массы гравитона, полученную на основе анализа гравитационно-волнового сигнала коллаборации LIGO–Virgo. В настоящее время эти предсказания подтверждаются результатами наблюдений группы GRAVITY, работающей на крупнейших европейских телескопах в Чили, и используются наши подходы для оценки параметров альтернативных теорий гравитации при обработке данных последних наблюдений движения ярких звезд группами Keck и VLT (GRAVITY). В 2019 г. оценки массы гравитона [37] наряду с оценками коллаборации LIGO–Virgo включены в раздел (в котором приводятся оценки массы гравитона) ежегодного обзора по физике частиц, подготовленного Particle Data Group [40].

Благодарности. Автор приносит благодарность организационному комитету конференции, посвященной 110-летию Н. Н. Боголюбова, за приглашение принять в ней участие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab.). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 061102.
2. *Zakharov A. F., Jovanović P., Borka D., Borka Jovanović V. Constraining the Range of Yukawa Gravity Interaction from S2 Star Orbits III: Improvement Expectations for Graviton Mass Bounds // J. Cosm. Astropart. Phys.* 2018. Iss. 04. P. 050.
3. *Zakharov A. F. Constraints on Tidal Charge of the Supermassive Black Hole at the Galactic Center with Trajectories of Bright Stars // Eur. Phys. J. C.* 2018. V. 78. P. 689.
4. *Zakharov A. F. Tests of Gravity Theories with Galactic Center Observations // Intern. J. Mod. Phys. D.* 2019. V. 28. P. 1941003.
5. *Dicke R. H., Peebles P. J. E., Roll P. G., Wilkinson D. T. Cosmic Black-Body Radiation // Astrophys. J.* 1965. V. 142. P. 414.
6. *Penzias A. A., Wilson R. W. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s // Astrophys. J.* 1965. V. 142. P. 419.
7. *Шамонов Т. А. Методика измерений эффективной температуры радиоизлучения с низкой эффективной температурой // ПТЭ.* 1957. № 1. С. 83.
8. *Peebles P. J. E., Page L. A., Jr., Partridge R. B. Finding the Big Bang.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009.
9. *Peebles P. J. E. Physical Cosmology.* Princeton: Princeton Univ. Press, 1971.
10. *Peebles P. J. E. Principles of Physical Cosmology.* Princeton: Princeton Univ. Press, 1993.

11. К обсуждению книги С. Э. Хайкина «Механика» // УФН. 1950. Т. XL, вып. 3. С. 476.
12. *Graham L. R.* Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union. New York: Columbia Univ. Press, 1987.
13. *Wetter G. A.* Dialectic Materialism. A Historical and Systematic Survey of Philosophy in the Soviet Union. London: Routledge and Kegan Paul, 1958.
14. *Зельманов А. Л.* Космология // Большая сов. энцикл. 2-е изд. 1955. Т. 23. С. 109.
15. *Mayor M., Queloz D.* A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star // Nature. 1995. V. 378. P. 355.
16. *Wolszczan A., Frail D. A.* A Planetary System around the Millisecond Pulsar PSR 1257 + 12 // Nature. 1992. V. 355. P. 145.
17. *Struve O.* Proposal for a Project of High-Precision Stellar Radial Velocity Work // Observatory. 1952. V. 72. P. 199.
18. *Gibney E., Castelvocchi D.* Physics Nobel Goes to Exoplanet and Cosmology Pioneers // Nature. 2019. V. 574. P. 162.
19. *Захаров А. Ф.* Поиски экзопланет с помощью гравитационного микролинзирования // УФН. 2011. Т. 181. С. 114.
20. *Ingrosso G., Calchi Novati S., de Paolis F., Jetzer Ph., Nucita A. A., Zakharov A. F.* Pixel Lensing as a Way to Detect Extrasolar Planets in M31 // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2009. V. 399. P. 219.
21. *Perryman M.* The Exoplanet Handbook. Second ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2018.
22. *de Rham C., Deskins J. T., Tolley A. J., Zhou Sh.-Y.* Graviton Mass Bounds // Rev. Mod. Phys. 2017. V. 89. P. 025004.
23. *Владимиров Ю. С.* Между физикой и метафизикой. Кн. 3. Геометрическая парадигма: испытание временем. М.: Книж. дом «Либроком», 2011.
24. *Abuter R., Amorim A., Anugu N. et al. (GRAVITY Collab.).* Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole // Astron. Astrophys. Lett. 2018. V. 615. P. L15.
25. *Abuter R., Amorim A., Bauböck M. et al. (GRAVITY Collab.).* A Geometric Distance Measurement to the Galactic Center Black Hole with 0.3% Uncertainty // Astron. Astrophys. Lett. 2019. V. 625. P. L10.
26. *Do T., Hees A., Ghez A. et al.* Relativistic Redshift of the Star S0-2 Orbiting the Galactic Center Supermassive Black Hole // Science. 2019. V. 365. P. 664.
27. *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. P. 479.
28. *Akiyama K., Alberdi A., Alef W. et al. (The Event Horizon Telescope Collab.).* First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // Astrophys. J. Lett. 2019. V. 875. P. L1.
29. *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. P. 795.
30. *Zakharov A. F., De Paolis F., Ingrosso G., Nucita A. A.* Shadows as a Tool to Evaluate Black Hole Parameters and a Dimension of Spacetime // New Astron. Rev. 2012. V. 56. P. 64.

31. *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. P.062007.
32. *Zakharov A. F., Nucita A. A., De Paolis F., Ingrosso G.* Apoastron Shift Constraints on Dark Matter Distribution at the Galactic Center // *Phys. Rev. D.* 2007. V.76. P.062001.
33. *Zakharov A. F., Nucita A. A., De Paolis F., Ingrosso G.* Solar System Constraints on R^n Gravity // *Phys. Rev. D.* 2006. V.74. P.107101.
34. *Borka D., Jovanović P., Borka Jovanović V., Zakharov A. F.* Constraints on R^n Gravity from Precession of Orbits of S2-Like Stars // *Phys. Rev. D.* 2012. V.85. P.124004.
35. *Borka D., Jovanović P., Borka Jovanović V., Zakharov A. F.* Constraining the Range of Yukawa Gravity Interaction from S2 Star Orbits // *J. Cosm. Astropart. Phys.* 2013. Iss. 11. P.050.
36. *Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al.* GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2 // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P.221101.
37. *Zakharov A. F., Jovanović P., Borka D., Borka Jovanović V.* Constraining the Range of Yukawa Gravity Interaction from S2 Star Orbits II: Bounds on Graviton Mass // *J. Cosm. Astropart. Phys.* 2016. Iss. 5. P.045.
38. *Hees A., Do T., Ghez A. M. et al.* Testing General Relativity with Stellar Orbits around the Supermassive Black Hole in Our Galactic Center // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P.211101.
39. *Amorim A., Bauböck M., Benisty M. et al. (GRAVITY Collab.)* // *Month. Roy. Astron. Soc.* 2019. V.489. P.4606.
40. *Tanabashi M., Hagiwara K., Hikasa K. et al. (Particle Data Group).* Review of Particle Physics // *Phys. Rev. D.* 2018 and 2019 update. V.98. P.030001; <http://pdg.lbl.gov/2019/listings/rpp2019-list-graviton.pdf>.