

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Дядина Полина Игоревна

**Астрофизические следствия скалярно-тензорных
моделей и теорий с высшими поправками по кривизне**

Специальность 01.03.02 — «Астрофизика и звездная астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель — *Алексеев Станислав Олегович*
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты — *Алексеев Георгий Андреевич,*
доктор физико-математических наук,
МИАН, отдел механики,
ведущий научный сотрудник

Копейкин Сергей Михайлович,
доктор физико-математических наук,
профессор, Университет Миссури, ка-
федра физики и астрономии, профессор

Арбузова Елена Владимировна,
кандидат физико-математических на-
ук, доцент, Университет «Дубна»,
кафедра высшей математики, доцент,
НГУ, лаборатория космологии и эле-
ментарных частиц, старший научный
сотрудник

Защита состоится 12 декабря 2019 года в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: guldur.anwo@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС “Истина”: <http://istina.msu.ru/dissertations/243129975/>

Автореферат разослан 5 ноября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических
наук

М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. На данный момент общепринятой теорией гравитации является общая теория относительности (ОТО). Она успешно описывает явления в широком диапазоне пространственно-временных масштабов и гравитационных режимов. ОТО вместе со Стандартной моделью физики частиц представляют два основных столпа современной физики [1].

С ростом качества и количества астрономических наблюдений были открыты явления, которые пока не получили полного объяснения в рамках этих двух подходов. В конце XX века по наблюдениям сверхновых типа Ia было обнаружено, что наша Вселенная ускоренно расширяется [2–5], однако природа этого явления до сих пор неясна. Другая важная проблема современной физики наблюдается на масштабах галактик [6; 7]. Несовпадение ожидаемых кривых вращения галактик с наблюдаемыми, данные по гравитационному линзированию на далеких галактиках, данные по столкновению галактик в скоплении Пули наводят на мысль, что помимо известной материи галактики заполняет еще и темная материя - невидимая субстанция, которая проявляется только в гравитационном взаимодействии. Другие же исследователи не спешат искать новый вид частиц и предполагают, что эти наблюдения свидетельствуют о необходимости модификации ОТО. Существует два подхода к объяснению этих явлений: с одной стороны, можно вводить новые неизвестные частицы, а с другой - можно пытаться изменить теорию гравитации. В последнее время многие физики прибегают ко второму подходу, вследствие чего количество модифицированных теорий гравитации растет с каждым годом. Одним из наиболее распространенных подходов к созданию модифицированной теории гравитации является расширение ОТО с помощью поправок высших порядков по кривизне и дополнительных степеней свободы. Помимо этого, перспективным способом модификации ОТО является добавление скалярного поля. В данной работе нами будут рассмотрены наиболее перспективные скалярно-тензорные теории гравитации (теория Хорндески, теория Бранса-Дикке), модели, имеющие скалярно-тензорное представление (гибридная метрическая-Палатини $f(R)$ -гравитация) и теории с высшими поправками по кривизне (модель Гаусса-Бонне).

Любая теория должна проходить тщательные экспериментальные проверки, и теории гравитации не исключение. Причем гравитационные модели должны согласовываться с наблюдательными данными, полученными от астрофизических объектов с различными гравитационными режимами (от слабого поля Солнечной системы до сильного поля черных дыр). В пределе слабого поля самым эффективным инструментом для проверки теорий гравитации является параметризованный постньютоновский формализм (ППН). Он был разработан К. Уиллом и К. Нордтведтом [8–11].

ППН формализм создавался как инструмент для сравнения разных теорий гравитации между собой и с экспериментом [11]. Постньютоновский (ПН) предел достигается в пределе малых скоростей и асимптотически плоского пространственно-временного фона [12].

Открытие двойной системы, содержащей пульсар, PSR B1913 + 16 Р. Халсом и Дж. Тейлором [13] предоставило новую возможность для высокоточных проверок ОТО и расширенных моделей гравитации. В таких системах гравитационное поле гораздо сильнее, чем в Солнечной системе. Более того, высокая стабильность прихода импульсов позволяет извлекать информацию о динамике орбитального движения с точностью, на которой проявляются тонкие релятивистские эффекты [14—16], в том числе и излучение гравитационных волн [17; 18]. Наблюдаемое изменение орбитального периода такой системы стало первым экспериментальным доказательством (хоть и косвенным) о существовании гравитационного излучения [19]. С каждым годом точность наблюдений по изменению орбитального периода различных двойных систем с пульсаром только растет. Все это делает такие системы незаменимыми природными лабораториями по проверке теорий гравитации и по изучению характера гравитационного излучения в различных моделях [20].

Черные дыры - объекты с самым сильным гравитационным режимом, известные на данный момент. Гравитационное притяжение их настолько велико, что покинуть черные дыры не могут даже движущиеся со скоростью света объекты, в том числе и фотоны. Тем не менее утверждение, что черная дыра только поглощает материю и ничего не излучает, не всегда справедливо. Квантовая механика предсказывает существование туннельного эффекта, который заключается в том, что частица может преодолеть потенциальный барьер, даже если ее полная энергия меньше величины барьера. Учет эффекта туннелирования при рассмотрении черной дыры приводит к тому, что черная дыра не только поглощает материю, но и непрерывно излучает частицы, расходуя при этом свою энергию. Данный процесс называется излучением Хокинга [21]. Для черных дыр звездных масс эффекты испарения будут пренебрежимо малы, а характерные времена жизни превышают время жизни Вселенной [22]. Однако в ранней Вселенной в результате гравитационного коллапса сверхплотной материи в момент начального расширения Вселенной могли возникнуть первичные черные дыры [23; 24]. Такие объекты могут иметь произвольно малые массы, а чем меньше масса черной дыры, тем больше будут проявляться эффекты испарения Хокинга, тем быстрее такая черная дыра будет испаряться. ОТО предсказывает, что время жизни черных дыр с массой $\sim 10^{14}$ г равно времени жизни нашей Вселенной (13,8 миллиардов лет) [25]. Такие объекты должны испаряться в настоящий момент. Согласно некоторым моделям испарения черных дыр, финальная стадия этого процесса может сопровождаться выбросом частиц высокой энергии, в том

числе гамма-излучением [26—28]. Такие события должны быть довольно редкими, и, с другой стороны, существует множество более простых объяснений для большинства гамма-всплесков. Тем не менее, первичные черные дыры на последней стадии испарения служат дополнительными кандидатами для предшественников гамма-всплесков. Различные теории гравитации предсказывают разные скорости испарения черных дыр и, следовательно, разные начальные массы объектов, которые полностью испарятся за время жизни Вселенной. Такие предсказания могут быть проверены с помощью количества наблюдаемых гамма-всплесков, а также максимального расстояния, на котором наблюдается гамма-всплеск [29; 30].

Целью работы является разносторонняя проверка частных случаев теории Хорндески (теория Хорндески без учета эффектов экранирования, массивная теория Бранса-Дикке, гибридная $f(R)$ -гравитация, модель Гаусса-Бонне) и наложение ограничений на параметры этих моделей, в различных гравитационных режимах: слабополево в Солнечной системе, в двойных системах с пульсаром, в сильном поле черной дыры.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- получить аналитическое выражение изменения орбитального периода двойных систем с пульсаром в теории Хорндески без учета эффектов экранирования и ограничить параметры теории, используя наблюдательные данные систем PSR J0737-3039 и PSR J1738+0333;
- применить полученные ограничения к частным случаям теории Хорндески (к массивной теории Бранса-Дикке и гибридной $f(R)$ -гравитации) и найти ограничения на параметры этих моделей;
- получить выражения для постньютоновских параметров β , ξ , ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 , α_1 , α_2 , α_3 в гибридной $f(R)$ -гравитации и на основании экспериментальных значений этих параметров ограничить фоновое значение скалярного поля;
- найти начальную массу черной дыры, которая полностью испарится за время жизни Вселенной, в модели Гаусса-Бонне, сравнить с аналогичной величиной для черной дыры Шварцшильда и определить, возможно ли по наблюдениям гамма-всплесков отличить финальные стадии испарения этих двух черных дыр.

Научная новизна:

- Впервые получены ограничения на частный случай теории Хорндески без учета эффектов экранирования из наблюдательных данных двойных систем с пульсаром.
- Впервые получены ограничения на массу скалярного поля гибридной $f(R)$ -гравитации в ее скалярно-тензорном представлении.

- Впервые получено аналитическое выражение для ППН параметра β в гибридной $f(R)$ -гравитации и показано, что восемь постньютоновских параметров ξ , ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 , α_1 , α_2 , α_3 тождественно равны нулю.
- Впервые с помощью метода комплексных траекторий была найдена начальная масса черной дыры Гаусса-Бонне, которая полностью испарится за время жизни Вселенной.

Теоретическая и практическая значимость. В данной работе нами были рассмотрены теории, являющиеся перспективными кандидатами для объяснения ускоренного расширения Вселенной (теория Хорндески без учета эффектов экранирования, массивная теория Бранса-Дикке, гибридная $f(R)$ -гравитация), а также модель Гаусса-Бонне, которая представляет собой низкоэнергетический предел теории струн, на основании которой возможно будет построена квантовая теория гравитации. Любая успешная теория должна удовлетворять экспериментам в широком диапазоне масштабов и гравитационных режимов. Этой работой мы дополнили имеющийся спектр проверок рассматриваемых моделей и показали, что представленные здесь частные случаи теории Хорндески не противоречат наблюдениям в широком диапазоне гравитационных режимов.

Объект и предмет исследования. В диссертационной работе изучаются модифицированные теории гравитации и их возможные проявления в астрофизических системах: в Солнечной системе, в двойных системах с пульсаром, в черных дырах.

Методология и методы исследования. Теоретико-методологической базой диссертации являются работы зарубежных и российских авторов, посвященные исследованию модифицированных теорий гравитации, а также проверке этих моделей на различных астрофизических объектах.

Для решения поставленных задач были использованы общенаучные (анализ, формализация, идеализация, индукция, дедукция) и специальные (программирование в среде Matlab, методы тензорного исчисления, методы математического анализа) методы. Ряд методов был реализован с помощью математических компьютерных пакетов программы Maple.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Помимо квадрупольного гравитационного излучения, совпадающего с общей теорией относительности (с точностью до величины эффективной гравитационной постоянной), подкласс теории Хорндески с массивным скалярным полем (без учета экранирования) предсказывает наличие скалярного монопольного, дипольного, квадрупольного и диполь-октупольного излучений.
2. Масса скалярного поля гибридной $f(R)$ -гравитации не превышает 2×10^{-19} эВ.

3. Наличие легкого скалярного поля в гибридной $f(R)$ -гравитации не противоречит наблюдательным данным для всех 10 постньютоновских параметров.
4. Начальная масса черной дыры Гаусса-Бонне, которая испарится за время жизни Вселенной, по порядку величины совпадает с предсказаниями общей теории относительности.

Достоверность и Апробация работы. Результаты работы являются обоснованными и достоверными, они были доложены на всероссийских и международной конференциях, а также семинарах:

1. Post-Newtonian limit of hybrid $f(R)$ -gravity. **P.I. Dyadina**, S.P. Labazova, S.O. Alexeyev. The first LARES 2 and fourth LARES International Science Workshop in conjunction with The second International GRM Workshop, Рим, Италия, 1-5 июля 2019
2. Гравитационное излучение от двойных систем с пульсаром в теории Хорндески (без учета эффектов экранирования). **П.И. Дядина**. Семинар по гравитации и космологии им. А.Л. Зельманова, ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 16 января 2019
3. Manifestations of Horndesky Theory in Binary Systems with Pulsars. N.A. Avdeev, **P.I. Dyadina**, S.O. Alexeyev. QUARKS-2018 20th International Seminar on High Energy Physics, Валдай, Россия, 27 мая - 2 июня 2018
4. Post-Newtonian limit of hybrid $f(R)$ -gravity. **P.I. Dyadina**, S.P. Labazova. QUARKS-2018 20th International Seminar on High Energy Physics, Валдай, Россия, 27 мая - 2 июня 2018
5. Ограничения скалярно-тензорной теории Хорндески из двойных пульсаров (Стендовый). Н.А. Авдеев, **П.И. Дядина**, С.О. Алексеев. Всероссийская астрономическая конференция - 2017 «Астрономия: познание без границ», Ялта, Крым, Россия, 17-22 сентября 2017
6. Постньютоновский предел гибридной $f(R)$ - гравитации (Стендовый). **П.И. Дядина**, С.П. Лабазова, , С.О. Алексеев. Всероссийская астрономическая конференция - 2017 «Астрономия: познание без границ», Ялта, Крым, Россия, 17-22 сентября 2017
7. The post-Newtonian limit of hybrid $f(R)$ -gravity. **П.И. Дядина**, С.П. Лабазова, С.О. Алексеев. 17th JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, Иркутская область, пос. Большие коты, Россия, 13-20 июля 2017
8. Постньютоновский предел гибридной гравитации. С.П. Лабазова, **П.И. Дядина**. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017», МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 10-14 апреля 2017
9. Verification of $f(R)$ -gravity in double binary system PSR J0737-3039 (Стендовый). **P.I. Dyadina**, S.O. Alexeyev, S. Capozziello, M. De

Laurentis. Всеволновая астрономия. Шкловский-100, Москва, Россия, 20-22 июня 2016

10. Verification of $f(R)$ -gravity in binary pulsars. **P.I. Dyadina**, S.O. Alexeyev, S. Capozziello, M. De Laurentis. 19th International Seminar on High Energy Physics “QUARKS-2016”, Санкт-Петербург, Россия, 29 мая - 4 июня 2016
11. Test of $f(R)$ -gravity in double binary system PSR J0737-3039 (Стендовый). **P.I. Dyadina**, M. De Laurentis, S.O. Alexeyev, S. Capozziello. Relativistic Geodesy: Foundations and Applications, Physikzentrum Bad Honnef, Bad Honnef, Германия, 13-19 марта 2016
12. Tests of $f(R)$ -gravity in binary pulsars. **P.I. Dyadina**, S. Capozziello, M. De Laurentis, S.O. Alexeyev, K.A.Rannu. Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (MG14), Рим, Италия, 13-18 июля 2015
13. Strong-field tests of $f(R)$ -gravity in binary pulsars. **P.I. Dyadina**, S.O. Alexeyev, K.A. Rannu, M. De Laurentis, S. Capozziello. 9th Alexander Friedmann International Seminar, Санкт-Петербург, Россия, 22-26 июня 2015

Личный вклад. Автор участвовала в постановке задачи диссертационной работы. Автором были проведены большинство математических расчетов и сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными. В Главе 2 автором было получено аналитическое выражение изменения орбитального периода в теории Хорндески без учета эффектов экранирования и наложены ограничения на параметры модели на основании данных двойных систем с пульсаром PSR J1738+0333, PSR J0737-3039. В Главе 3 автором получены постньютоновские метрики гибридной $f(R)$ -гравитации в приближении идеальной жидкости и в приближении системы точечных гравитирующих масс, найдено аналитическое выражение для ППН параметра β и явно показано, что параметры $\xi, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ тождественно равны нулю. На основании экспериментальных значений ППН параметров γ и β , полученных АМС “Мессенджер”, автором наложены ограничения на параметры гибридной $f(R)$ -гравитации. В Главе 4 автором наложены ограничения на параметры гибридной $f(R)$ -гравитации на основании данных изменения орбитального периода систем PSR J1738+0333 и PSR J0737-3039 и на параметры теории Бранса-Дикке на основании данных систем PSR J1738+0333, PSR J0737-3039 и PSR J1012+5307. Автором было произведено сравнение метода, использованного в работе [31] для получения изменения орбитального периода в массивной теории Бранса-Дикке, с методом, реализованным в Главе 2. В Главе 5 автором была получена температура черной дыры Гаусса-Бонне методом комплексных траекторий и найдена начальная масса черной дыры Гаусса-Бонне, которая полностью испарится за время жизни

Вселенной. Основные выводы из проведенных исследований были сделаны автором самостоятельно. Тексты двух из трех основных статей [32; 33] были полностью написаны автором.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 3 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **Dyadina, P.I., Avdeev N., Alexeyev S.** Horndeski gravity without screening in binary pulsars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — Т. 483, № 1. — С. 947–963. — Импакт-фактор: 5.231.
2. **Alexeyev S., Rannu K., Dyadina, P.I., Latosh B., Turyshev S.** Observational Limits on Gauss–Bonnet and Randall–Sundrum Gravities // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 2015. — Т. 147, № 6. — С. 1120–1127. — Импакт-фактор: 1.119.
3. **Дядина, П.И., Лабазова С., Алексеев С.** Постньютоновский предел гибридной $f(R)$ -гравитации // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 2019. — Т. 156, № 5. — С. 905–917. — Импакт-фактор: 1.119.

а также 4 — в сборниках, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus:

4. **Avdeev N., Dyadina, P.I., Alexeyev S.** Manifestations of Horndeski theory in binary systems with pulsars // EPJ Web of Conferences. Vol. 191. — 2018. — P. 07011.
5. **Dyadina, P.I., Labazova S.** The post-Newtonian limit of hybrid $f(R)$ -gravity // EPJ Web of Conferences. Vol. 191. — 2018. — P. 07009.
6. **Dyadina, P.I., Alexeyev S., Capozziello S., De Laurentis M., Rannu K.** Strong-field tests of $f(R)$ -gravity in binary pulsars // International Journal of Modern Physics Conference Series. Vol. 41. — 2016. — P. 1660131–1.
7. **Dyadina, P.I., Alexeyev S., De Laurentis M., Capozziello S.** Verification of $f(R)$ -gravity in binary pulsars // EPJ Web of Conferences. Vol. 125. — 2016. — P. 03005.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет **112** страниц текста с **8** рисунками и **3** таблицами. Список литературы содержит **174** наименования.

Во **Введении** представлена актуальность темы, степень ее разработанности, цели и задачи, объект и предмет исследования, научная

новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, дается обзор литературы.

В **Главе 1** приведен обзор результатов, полученных в более ранних работах различных авторов, в том числе, обсуждается теория гравитации Хорндески, ее действие и уравнения поля, рассмотрен постньютоновский предел этой модели и показан вывод уравнений движения в двойной системе. Помимо этого, приводится краткий обзор частных случаев теории Хорндески: массивной теории Бранса-Дикке и гибридной $f(R)$ -гравитации. Обсуждается применение параметризованного постньютоновского формализма к теориям гравитации с массивными полями. В качестве примера рассматривается использование ППН формализма для гибридной $f(R)$ -гравитации. А также обсуждается модель Гаусса-Бонне и основные достижения, полученные в рамках этой модели в контексте черных дыр. Кроме того, приведен метод комплексных траекторий, используемый для получения температуры черной дыры.

В **Главе 2** представлен общий метод получения изменения орбитального периода двойной системы с пульсаром и его применение к подклассу теории Хорндески без учета эффектов экранирования. На основании данных двойных систем с пульсаром PSR J1738+0333, PSR J0737-3039 получены ограничения на параметры теории Хорндески.

В **Главе 3** показан метод получения постньютоновских параметров $\beta, \xi, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ в гибридной $f(R)$ -гравитации, а также накладываются ограничения на фоновое значение скалярного поля в этой теории на основании экспериментальных данных ППН параметров γ и β , полученных АМС “Мессенджер”.

В **Главе 4** обсуждаются две модели, которые являются частными случаями теории Хорндески: массивная теория Бранса-Дикке и гибридная $f(R)$ -гравитация. На основании метода, изложенного в Главе 2, были получены ограничения на параметры этих теорий (в случае гибридной $f(R)$ -гравитации на основании данных систем PSR J1738+0333 и PSR J0737-3039; в случае массивной теории Бранса-Дикке на основании данных систем PSR J1738+0333, PSR J0737-3039 и PSR J1012+5307). Было произведено сравнение метода, использованного в работе Дж. Алсинга и соавторов [31] для получения изменения орбитального периода в массивной теории Бранса-Дикке, с методом, изложенным в Главе 2, и показано, что последний дает более точный результат.

В **Главе 5** метод комплексных траекторий применяется к черной дыре Гаусса-Бонне. Помимо этого, найдена начальная масса черной дыры в рассматриваемой модели, которая испарится за время жизни Вселенной. Полученный результат сравнивается с аналогичной величиной для черной дыры Шварцшильда и обсуждается возможность экспериментального обнаружения разницы этих двух величин.

В **Заключении** излагаются итоги выполненного исследования, выводы, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы, а также приводятся **Благодарности**.

Основные выводы

Данная работа посвящена проверке частных случаев теории Хорндески (теория Хорндески без учета эффектов экранирования, массивная теория Бранса-Дикке, гибридная $f(R)$ -гравитация, модель Гаусса-Бонне) на астрофизических объектах с различными гравитационными режимами: в слабом поле Солнечной системы, в двойных системах с пульсаром, в сильном поле черной дыры.

Впервые нами рассмотрен подкласс теории Хорндески без экранирующих механизмов в сильном поле двойных систем с пульсаром, и найдено выражение для изменения орбитального периода $\dot{P}_b^{th}$ в рамках рассматриваемой модели в квазикруговом приближении. Мы показали, что орбитальный период двойной системы будет изменяться как из-за тензорного, так и из-за скалярного излучения. Впервые в итоговом выражении для скалярного излучения нами учитывался вклад ПН поправок к дипольному члену и диполь-октупольного члена. Также мы нашли ограничения на комбинацию параметров теории Хорндески как из данных системы двух нейтронных звезд (PSR J0737-3039), так и из смешанной двойной системы с пульсаром (PSR J1738-0333).

В контексте двойных систем с пульсаром нами были рассмотрены отдельно теории, являющиеся частным случаем теории Хорндески: гибридная $f(R)$ -гравитация и массивная теория Бранса-Дикке. Мы показали, что ограничения, найденные для подкласса теории Хорндески без экранирующих механизмов, верны также и для частных случаев этой модели.

Гибридная $f(R)$ -гравитация рассмотрена нами как в слабом поле Солнечной системы, так и в более сильном поле двойных систем с пульсаром. К модели мы применили параметризованный постньютоновский формализм, получили постньютоновскую метрику как в приближении системы точечных гравитирующих масс, так и в приближении идеальной жидкости. Нами было показано явно, что в гибридной $f(R)$ -гравитации легкое скалярное поле не противоречит экспериментальным данным не только на основании параметра γ , но и на основании всех остальных ППН параметров постньютоновского формализма, причем восемь из них $\xi, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ тождественно равны нулю. Рассмотрение же гибридной $f(R)$ -гравитации в рамках двойных систем с пульсаром позволило нам впервые наложить ограничение на массу скалярного поля в этой модели.

На примере массивной теории Бранса-Дикке нами была показана важность учета неравенства $\partial_r \psi \neq -\partial_0 \psi$. Мы произвели сравнение подхода работы Дж. Алсинга и соавторов [31] с методом, изложенным в данной работе, и показали, что последний является более точным и полным.

Модель Гаусса-Бонне рассматривалась нами в контексте эффектов испарения черных дыр. В рамках исследования мы получили температуру черной дыры Гаусса-Бонне методом комплексных траекторий и нашли начальную массу черной дыры Гаусса-Бонне, которая полностью испарится за время жизни Вселенной. Нами было показано, что начальная масса черной дыры Гаусса-Бонне, которая испарится за время жизни Вселенной, по порядку величины совпадает с предсказаниями ОТО. Таким образом, мы показали, что современные наблюдения не позволяют отличить финальные стадии испарения черных дыр, сопровождающиеся гамма-всплесками, в этих двух моделях.

Все рассматриваемые в работе теории очень перспективны. Часть из них (теория Хорндески, гибридная $f(R)$ -гравитация и массивная теория Бранса-Дикке) являются кандидатами для объяснения ускоренного расширения Вселенной. Модель Гаусса-Бонне является низкоэнергетическим пределом теории струн, на основании которой возможно и будет построена теория квантовой гравитации. Основным итогом данной работы является то, что она дополняет имеющийся спектр проверок рассматриваемых моделей. На основании проделанной работы можно сделать вывод, что представленные здесь частные случаи теории Хорндески не противоречат наблюдениям в широком диапазоне гравитационных режимов: от слабого поля Солнечной системы до сильного поля черных дыр.

Рекомендацией к дальнейшей разработке темы может являться проверка общего случая теории Хорндески на рассмотренных в работе астрофизических объектах. Помимо этого, одним из возможных направлений исследований является проверка гравитации Хорндески с использованием всего набора посткеплеровских параметров [18; 34]. Кроме того, перспективой дальнейшей разработки темы может являться создание универсального аппарата для проверки теорий гравитации с массивными полями в пределе слабого поля (аналога оригинального ППН формализма для безмассовых моделей).

Список литературы

1. *Алексеев С. О., Памятных Е. А., Урсулов А. В., Третьякова Д. А., Латош Б. Н.* Общая теория относительности. Введение. Современное развитие и приложения. — Москва : Флинта, 2017. — 380 с.
2. *Riess A. G.* [et al.]. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astronomical Journal*. — 1999. — Vol. 116, no. 3. — P. 1009–1038.

3. *Riess A. G.* [et al.]. Type Ia Supernova Discoveries at $z > 1$ from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 607, no. 2. — P. 665—687.
4. *Perlmutter S.* [et al.]. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae // *Astrophysical Journal*. — 1999. — Vol. 517, no. 2. — P. 565—586.
5. *Spergel D. N.* [et al.]. Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2007. — Vol. 170, no. 2. — P. 377—408.
6. *Oort J. H.* The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems // *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*. — 1932. — Vol. 6, no. 238. — P. 249—287.
7. *Zwicky F.* Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // *Helvetica Physica Acta*. — 1933. — Vol. 6. — P. 110—127.
8. *Poisson E., Will C. M.* Gravity: Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic. — London : Cambridge University Press, 2014. — 780 p.
9. *Will C. M.* Theoretical Frameworks for Testing Relativistic Gravity. II. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, and the Nordtvedt Effect // *Astrophysical Journal*. — 1971. — Vol. 163. — P. 611—628.
10. *Will C. M., Nordtvedt K.* Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. I. Preferred-Frame Theories and an Extended PPN Formalism // *Astrophysical Journal*. — 1972. — Vol. 177. — P. 757—774.
11. *Will C. M.* Theory and Experiment in Gravitational Physics. — London : Cambridge University Press, 1993. — 380 p.
12. *Kopeikin S., Efroimsky M., Kaplan G.* Relativistic Celestial Mechanics of the Solar System. — Berlin : Wiley, 2011. — 894 p.
13. *Hulse R., Taylor J.* Discovery of a pulsar in a binary system // *Astrophysical Journal Letters*. — 1975. — Vol. 195, no. L51.
14. *Damour T., Deruelle N.* General relativistic celestial mechanics of binary systems. I. The post-Newtonian motion. // *Ann. Inst. Henri Poincaré A*. — 1985. — Vol. 43, no. 1. — P. 107—132.
15. *Damour T., Deruelle N.* General relativistic celestial mechanics of binary systems. II. The post-Newtonian timing formula // *Ann. Inst. Henri Poincaré A*. — 1986. — Vol. 44, no. 3. — P. 263—292.
16. *Копейкин С., Потапов В.* Релятивистское смещение периастра двойного пульсара во втором постньютоновском приближении общей теории относительности // *Астрономический журнал*. — 1994. — Т. 71, № 1. — С. 120.

17. *Копейкин С. М.* Уравнения движения протяженных тел в ОТО с учетом консервативных поправок и радиационного торможения // *Астрономический журнал*. — 1985. — Т. 62. — С. 889—904.
18. *Damour T., Taylor J. H.* Strong-field tests of relativistic gravity and binary pulsars // *Physical Review D*. — 1992. — Vol. 45, no. 6. — P. 1840.
19. *Damour T., Taylor J. H.* On the orbital period change of the binary pulsar PSR 1913 + 16 // *Astrophysical Journal*. — 1991. — Vol. 366. — P. 501—511.
20. *Pshirkov M., Tuntsov A., Postnov K.* Constraints on Massive-Graviton Dark Matter from Pulsar Timing and Precision Astrometry // *Physical Review Letters*. — 2008. — Vol. 101, no. 26. — P. 261101.
21. *Hawking S. W.* Particle creation by black holes // *Communications in Mathematical Physics*. — 1975. — Vol. 43, no. 3. — P. 199—220.
22. *Фролов В. П., Новиков И.* Физика черных дыр. — Наука, 1986. — 328 с.
23. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Релятивистская астрофизика. — Наука, 1967. — 656 с.
24. *Алексеев С. О., Сажин М. В., Хованская О. С.* Параметры ранней Вселенной и первичные черные дыры // *Письма в "Астрономический журнал" (Астрономия и космическая астрофизика)*. — 2002. — Т. 28, № 3. — С. 139—142.
25. *Carr B. J.* The Primordial black hole mass spectrum // *Astrophysical Journal*. — 1975. — Vol. 201. — P. 1—19.
26. *Alexeyev S., Barrau A., Boudoul G., Khovanskaya O., Sazhin M.* Black Hole Relics in String Gravity: Last Stages of Hawking Evaporation // *Classical and Quantum Gravity*. — 2002. — Vol. 19, no. 16. — P. 4431—4444.
27. *Алексеев С. О., Барро А., Будул Г., Сажин М. В., Хованская О. С.* Простейшая модель испарения черных дыр на последних стадиях // *Письма в "Астрономический журнал"*. — 2002. — Т. 28, № 7. — С. 163—166.
28. *MacGibbon J. H., Carr B. J.* Cosmic rays from primordial black holes // *Astrophysical Journal*. — 1991. — Vol. 371. — P. 447—469.
29. *Ukwatta T. N. [et al.].* Spectral Lags of Gamma-Ray Bursts from Primordial Black Hole (PBH) Evaporations // *AIP Conf.Proc.* — 2009. — Vol. 1133. — P. 440—442.
30. *Alexeyev S., Rannu K., Dyadina, P.I., Latosh B., Turyshev S.* Observational Limits on Gauss-Bonnet and Randall-Sundrum Gravities // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. — 2015. — Т. 147, № 6. — С. 1120—1127.

31. *Alsing J., Berti E., Will C. M., Zaglauer H.* Gravitational Radiation from Compact Binary Systems in the Massive Brans-Dicke Theory of Gravity // Physical Review D. — 2012. — Vol. 85, no. 6. — P. 064041.
32. *Dyadina, P.I., Avdeev N., Alexeyev S.* Horndeski gravity without screening in binary pulsars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — Т. 483, № 1. — С. 947—963.
33. *Дядина, П.И., Лабазова С., Алексеев С.* Постньютоновский предел гибридной $f(R)$ -гравитации // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 2019. — Т. 156, № 5. — С. 905—917.
34. *Kopeikin S. M.* Supplementary parameters in the parameterized post-Keplerian formalism // Astrophysical Journal. — 1994. — Vol. 434, no. 2. — P. L67—L70.