

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Авдеев Никита Алексеевич

Инфляция в теориях модифицированной гравитации

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

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

Научный руководитель — *Попов Сергей Борисович*
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты — *Вернов Сергей Юрьевич,*
доктор физико-математических наук,
НИИЯФ МГУ, Лаборатория аналитических вычислений в физике высоких энергий, ведущий научный сотрудник

Сушков Сергей Владимирович,
доктор физико-математических наук,
доцент, КФУ, Институт физики,
Отделение физики, кафедра теории относительности и гравитации,
заведующий кафедрой

Арбузова Елена Владимировна,
доктор физико-математических наук,
доцент, Университет «Дубна», кафедра высшей математики, профессор,
НГУ, физический факультет, лаборатория космологии и элементарных частиц, старший научный сотрудник

Защита состоится 20 июня 2024 года в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: NAAvdeev1995@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2994>

Автореферат разослан 25 апреля 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А.И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. На данный момент в физике существует ряд проблем, которые возможно решить в рамках общей теории относительности (ОТО), только введя новую материю обладающую достаточно специфическими свойствами [1; 2]. Одной из этих проблем является эффект тёмной материи, проявляющийся на галактических масштабах в кривых вращения галактики[3; 4], отличающихся от предсказанных, гравитационном линзировании на галактиках[5], столкновении двух меньших скоплений галактик в скоплении Пули[6]. Другим важным нерешённым вопросом является ускоренное расширение Вселенной (эффект тёмной энергии), наблюдаемое с помощью сверхновых типа Ia[7; 8]. Ещё одной важной открытой проблемой является наличие экспоненциально быстрого расширения Вселенной в первые мгновения своей жизни, которое также называется космологической инфляцией[9–18]. Одним из направлений исследований, решающих эти проблемы, является поиск модификаций ОТО, согласующихся со всеми имеющимися наблюдательными данными.

На сегодняшний день в мире существует множество различных теорий гравитации: это и векторно-тензорные[19], и биметрические[20], и $f(R)$ -теории[21], и скалярно-тензорные[22] и многие другие. Особенно интересными для рассмотрения являются последние. Скалярно-тензорные теории представляют из себя теории, где к тензорному, добавляется дополнительное скалярное поле. Подобные теории относительно просты в изучении их проявлений. Огромным преимуществом данных теорий является тот факт, что многие не скалярно-тензорные модели, например $f(R)$ -гравитация, могут быть переписаны в скалярно-тензорном виде[21]. Поэтому изучение скалярно-тензорных моделей позволяет также изучать и другие теории.

Довольно широким классом скалярно-тензорных теорий является теория Хорндески[23]. Это теория с уравнениями поля второго порядка, в которой отсутствуют неустойчивости Остроградского. Изучение этой теории и её частных случаев бурно происходит в последнее десятилетие как в качестве инфляционных моделей [24–29], так и в качестве моделей модифицированной гравитации, объясняющих эффекты тёмной материи[30; 31] и тёмной энергии[24; 32–34].

Проведение всевозможных тестов (например тесты в Солнечной системе[35], двойных пульсарах[24; 32], гравитационно-волновой тест[34] и другие) теории Хорндески с использованием наблюдательных данных является важнейшей задачей поиска жизнеспособной модели. На данный момент уже было проведено множество проверок теории Хорндески и её частных случаев, как кандидата на роль модели, объясняющей явления темной материи и тёмной энергии, в том числе и автором данной

работы [24]. Помимо этого, подобный класс теорий широко исследовался с точки зрения кандидата на роль инфляционной теории[26—28; 36—40], в том числе были проведены тесты с использованием данных WMAP/PLANCK/VICER[26; 41; 42].

Инфляция является одним из самых успешных сценариев, объясняющих физику ранней Вселенной[9—18]. В рамках данной теории предполагается, что в первые мгновения существования Вселенной она экспоненциально быстро расширилась в e^N раз (параметр N также называется числом е-фолдов). Популярность инфляции связана в основном с тем, что с её помощью становится возможно объяснить ряд наблюдательных феноменов, таких как, однородность, изотропность и пространственная плоскостность[27; 43]. Также она позволяет объяснить образование галактик из начальных квантовых возмущений, которые впоследствии были усилены за счет гравитационной неустойчивости.

И хотя успешность данной идеи в целом стала понятна достаточно давно, поиск конкретной теории, описывающей инфляцию, всё ещё остаётся очень важной актуальной проблемой. Самые простые модели такие как скалярно-тензорная теория с минимально связанным массивным скалярным полем уже исключены результатами экспериментов WMAP/PLANCK, VICER1,2 и Keck Array[44].

Миссия WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) - космическая миссия, стартовавшая 30 июня 2001 года[45]. В рамках данной миссии был запущен прибор, состоящий из набора микроволновых радиометров размером в 1,4 x 1,6 метров, работающий на 5 частотных диапазонах от 22 до 90 ГГц. Целью данного эксперимента являлось составление карты звёздного неба на нескольких длинах волн в диапазоне от 3,2 мм до 13мм. Одним из результатов данного эксперимента стало построение карты анизотропии температуры реликтового излучения.

14 мая 2009 года была запущена космическая миссия PLANCK[46]. На космическом корабле установлены два прибора: низкочастотный прибор (LFI) и высокочастотный прибор (HFI). Оба прибора могут определять как общую интенсивность, так и поляризацию фотонов и вместе покрывают частотный диапазон почти 830 ГГц (от 30 до 857 ГГц). Данная миссия позволила улучшить данные анизотропии температуры реликтового излучения полученные миссией WMAP, а также дополнить их измерениями поляризации реликтового излучения, гравитационного линзирования реликтового излучения, а также эффекта Сакса-Вольфа. Миссия завершила свою работу 23 октября 2013 года.

VICER[47] - это серия наземных экспериментов (VICER1, VICER2, Keck Array и будущий VICER3), целью которой является измерение поляризации реликтового излучения, в частности В - моды. Поляризацию реликтового излучения традиционно разделяют на две компоненты: Е - и В - моды. Е - мода отвечает за градиентную часть тензора поляризации,

В - мода - за вихревую, по аналогии с электромагнитным полем. Особенно интересной представляется именно В - мода, поскольку в её генерации участвуют тензорные и не участвуют скалярные возмущения, а именно поиск первичных тензорных возмущений представляет особый интерес[43]. ВИСЕР 1 проводил наблюдения поляризации на частотах 100 и 150 ГГц в период с 2006 по 2008, ВИСЕР 2 проводил наблюдения поляризации на частоте 150 ГГц в период с 2010 по 2012. Keck Array - проводил наблюдения на 5 поляриметрах в 2011 и 2012 годах на частоте 150 ГГц и в 2013-2018 на частотах 150 ГГц и 95 ГГц. ВИСЕР3 - грядущий эксперимент. В рамках данных экспериментов удалось оценить важнейшие характеристики спектра первичных возмущений, такие как: амплитуду мощности скалярных возмущений, отношение амплитуд тензорных и скалярных возмущений, спектральный индекс скалярных возмущений[47; 48].

Текущие наблюдения этих характеристик показывают, что в случае минимальной связи только асимптотически плоский потенциал скалярного поля удовлетворяет всем наблюдениям. Добавив неминимальную связь возможно создать жизнеспособную модель с более крутым потенциалом, например, модель Хиггса[49]. Платой за это является большое значение безразмерной константы неминимальной связи.

Ещё одной жизнеспособной моделью является модель Старобинского[9; 50], использующая квадратичные поправки к эйнштейновской гравитации. Данную модель можно переписать в скалярно-тензорном виде, в таком виде также требуется, чтобы константа неминимальной связи была велика[51].

Всё это мотивирует искать другие возможности для описания инфляции. Одной из таких возможностей является добавление к минимально связанному скалярному полю неминимальной кинетической связи ($\frac{1}{2}[g^{\mu\nu} - \kappa G^{\mu\nu}]\phi_{,\mu}\phi_{,\nu}$, при $\kappa = 0$ - минимальная связь). Такая модификация по-прежнему даёт уравнения поля второго порядка и не приводит к неустойчивостям. Космологическая динамика в такой теории оказывается богаче и интереснее, чем в случае просто минимально связанного скалярного поля, в частности в рамках такой теории возможна инфляция даже без потенциала[27; 28]. Подобная теория входит в подкласс теорий Хорндески[27; 28; 36—40].

Однако помимо проверки в условиях ранней Вселенной было бы полезно исследовать класс теорий Хорндески на масштабах современной Вселенной. Подобные тесты помогут лучше понять возможности теорий и их пределы в объяснении современных явлений, что может способствовать построению единой теории гравитации, объединяющей раннюю и современную Вселенную. Также изучение свойств моделей в условиях современной Вселенной может помочь в изучении поведения теории во время инфляционной стадии.

Так класс теорий Хорндески также исследуют на предмет возможности описания физики современной Вселенной, то есть изучается возможность объяснения явлений тёмной материи (изменение физики на масштабах галактики) и тёмной энергии (изменение физики на масштабах скоплений галактик). Но помимо успешного описания указанных явлений теория также должна корректно работать и на остальных масштабах гравитационного поля.

Исторически одной из первых проверок теорий гравитации были различные проверки на масштабах Солнечной системы - в режиме слабого гравитационного поля. Для работы на этом масштабе гравитации К. Уиллом и К. Нордтведтом был разработан параметризованный постньютоновский (ППН) формализм [52–54]. При данном подходе метрика теории гравитации представляется в виде обобщенной ППН метрики, включающей ППН параметры и потенциалы [55]. Различия модифицированной гравитации от ОТО заключаются в 10 ППН параметрах ($\gamma, \beta, \xi, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$). ППН формализм позволяет проводить тесты различных теорий гравитации в Солнечной системе, сравнивая предсказания теории гравитации относительно ППН параметров с их экспериментально измеренными значениями. Так очень распространенным тестом является сравнение предсказаний теорий гравитации для значений параметров γ и β с их экспериментальными ограничениями [32; 56; 57].

Другим тестом теорий гравитации является проверка с помощью наблюдательных данных, полученных от двойных систем с радиопульсаром. Первая такая система PSR B1913 + 16 была открыта Р. Халсом и Дж. Тейлором[58]. В подобных системах гравитационное поле сильнее, чем в Солнечной системе. Поэтому ряд тонких гравитационных эффектов проявляется сильнее, что как раз и позволяет провести тест теории, сравнивая её предсказаний с реальными наблюдательными данными[59]. Другим существенным аспектом, показывающим значимость подобного теста, является важность проверки теории гравитации в разных гравитационно-полевых условиях, например: в слабом поле - в Солнечной системе, более сильном - в двойных системах с радиопульсаром, ещё более сильном - при слиянии чёрных дыр.

Радиопульсар (в дальнейшем будем называть данный объект просто “пульсар”) - это быстровращающаяся нейтронная звезда, обладающая сильным магнитным полем. Такая звезда периодически излучает электромагнитные волны в радиоволновом диапазоне. Высокая стабильность прихода этих импульсов позволяет с высокой точностью определять параметры, описывающие орбитальную динамику, благодаря чему и становятся заметны тонкие гравитационные эффекты. Для работы с теориями гравитации в таких системах Дамуром и Дюриэль был разработан параметризованный посткеплеровский (ППК) формализм[60; 61] (подробнее о его структуре будет сказано в Главе III). Изначальной целью его создания

было получение полной информации об орбитальной динамике из пульсарного тайминга теоретически независимым способом. С каждым годом наблюдательных данных, полученных от двойных систем с пульсаром, становится всё больше, поэтому растёт точность определения параметров орбиты и, как следствие, увеличивается точность тестов теорий гравитации.

В данной диссертации проводится проверка гибридной $f(R)$ гравитации, являющихся частным случаем теории Хорндески с использованием наблюдательных данных двойных систем с пульсаром. Тут стоит напомнить, что важной особенностью теории Хорндески является тот факт, что $f(R)$ -модели могут быть сведены к её частным случаям.

Сами по себе $f(R)$ -модели представляют собой один из самых простых с идеологической точки зрения способов модификации гравитации. В этом классе моделей гравитации действие Эйнштейна-Гильберта обобщается заменой скалярной кривизны R на функцию от скалярной кривизны $f(R)$. Множество $f(R)$ -моделей разбивается на два больших подкласса: метрические и Палатини. Отличие между ними заключается в получении уравнений поля: в первых предполагается связь метрики и аффинной связности, во вторых - метрический тензор и аффинная связность считаются независимыми. Серьезным недостатком метрического подхода является невозможность одновременно описывать ускоренное расширение Вселенной и проходить тесты в Солнечной системе без подключения дополнительных экранирующих механизмов[62—64]. В случае Палатини моделей серьезной проблемой являются трудности с описанием эволюции Вселенной и возникновением крупномасштабной структуры[65]. Гибридная метрическая-Палатини $f(R)$ -гравитация является моделью, полученной путём объединения этих двух подходов. Как результат эта модель лишена недостатков обоих подходов и сочетает их преимущества. Данная модель прошла тесты в солнечной системе[55], в двойных пульсарах[24; 32], в ней получены решения типа чёрная дыра и кротовая нора[66; 67], были получены уравнения состояния нейтронных звёзд[68], было описано современное ускоренное расширение Вселенной[69; 70]. Она также является частным случаем теории Хорндески[24].

Целью данной работы является исследование теорий модифицированной гравитации в качестве кандидатов на объяснение космологической инфляции. В частности проводится исследование теорий в рамках гравитации, работающей в условиях ранней, а также современной Вселенной.

В процессе достижения данной цели в рамках данной работы были решены следующие **задачи**:

- проведен анализ инфляционных режимов частного случая теории Хорндески с неминимальным кинетическим членом: были установлены области начальных данных для скалярного поля и его первой производной, приводящие к конечной инфляции с числом e -фолдов

- $N > 50 - 70$ в случае $V = V_0\phi^{1.5}$ и $\kappa < 0$. Также впервые были получены аналитические выражения для числа е-фолдов для случая без потенциала. Полученные результаты были опубликованы в [27].
- был рассмотрен спектр начальных возмущений в рамках данной модели с $V = V_0\phi^\alpha$ с $\kappa > 0$ и проведено сравнение предсказаний теории с последними результатами экспериментов WMAP/PLANCK/BICEP и др. Полученные результаты были опубликованы в [26].
 - были получены аналитические выражения для посткеплеровских параметров $\dot{\omega}$, \dot{P}_b , r , s в рамках маломассивного случая гибридной $f(R)$ -гравитации для случая орбит с ненулевым эксцентриситетом. Также были ограничены свободные параметры теории.
 - было показано, что в сравнении с квазикруговым случаем, ограничение на фоновое значение скалярного поля из данных двойных систем с пульсаром получается точнее в случае орбит с ненулевым эксцентриситетом

Научная новизна:

- впервые было показано, что теория с неминимальной кинетической связью с $\kappa > 0$ и степенным потенциалом $V = V_0\phi^\alpha$ не удовлетворяет современным наблюдательным ограничениям
- впервые были получены аналитические выражения для начальных значений H и $\dot{\phi}$, приводящие к инфляции более чем в N е-фолдов в случае $\kappa < 0$ и $V = 0$. Также были численно получены аналогичные области начальных значений ϕ , $\dot{\phi}$ в случае $V = V_0|\phi|^{1.5}$.
- впервые были получены аналитические выражения для посткеплеровских параметров $\dot{\omega}$, \dot{P}_b , r , s для орбит с ненулевым эксцентриситетом в гибридной $f(R)$ -гравитации в приближении лёгкого скалярного поля.
- впервые проведён полный тест гибридной $f(R)$ -гравитации на двойных системах с пульсаром и показано, что точность ограничений на фоновое значение скалярного поля в случае орбит с ненулевым эксцентриситетом выше, чем в квазикруговом.

Теоретическая и практическая значимость. В данной работе был рассмотрен класс теорий Хорндески, который активно исследуется сейчас в контексте теорий гравитации, описывающих физику как современной вселенной, так и ранней. Любая теория должна согласовываться с наблюдениями. В данной диссертации было показано, что теория с неминимальной положительной кинетической связью и степенным потенциалом не может удовлетворять современным наблюдательным данным в объяснении инфляции. Подобные результаты очень важны, поскольку на разработку таких теорий тратится время научного сообщества, поэтому очень важно своевременно отсеивать подобные модели. Ещё одним

результатом данной работы является исследование случая теории с отрицательной неминимальной кинетической связью на предмет получения сценариев адекватной конечной инфляции. Также важным результатом работы является тот факт, что некоторые частные случаи теории Хорндески, такие как гибридная $f(R)$ - гравитация, которая является кандидатом на роль теории, объясняющей современное ускоренное расширение Вселенной или же космологическую инфляцию, успешно проходят проверку на двойных системах с пульсаром. Подобное тестирование дополняет и расширяет, уже имеющийся спектр проверок подобных теорий гравитации.

Объект и предмет исследования. В диссертации рассматриваются частные случаи теории Хорндески на роль модели описывающей инфляцию, в частности изучаются их наблюдаемые астрофизические проявления: предсказания относительно неоднородности спектра первичных возмущений, орбитальной динамики в двойных системах с пульсаром.

Методология и методы исследования. Основой методологической базой диссертации являются работы российских и зарубежных авторов, посвященные проверке теорий гравитации на различных астрофизических наблюдательных данных. В рамках данной работы поставленные задачи были решены с использованием как общенаучных методов (дедукция, индукция, формализация, идеализация, анализ и др.), так и с помощью специальных, таких как: программирование на Python, численное решение систем дифференциальных уравнений, тензорных анализ, методы математического анализа, методы математической физики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Скалярно-тензорная теория с положительной неминимальной кинетической связью и произвольным степенным потенциалом не удовлетворяет современным наблюдательным данным WMAP/PLANCK/VICER.
2. Скалярно-тензорная теория с отрицательной неминимальной кинетической связью может порождать конечную инфляцию, за время которой Вселенная расширилась более чем в e^{60} раз, как в случае с нулевым потенциалом, так и в случае с потенциалом $V = V_0|\phi|^{3/2}$. Причём в первом случае к подобной инфляции приводит очень узкий диапазон начальных данных, тогда как во втором случае к подобной инфляции может приводить довольно большой диапазон начальных данных.
3. Максимально возможное значение фонового скалярного поля ϕ_0 в гибридной $f(R)$ - гравитации из данных двойных систем с пульсаром получается порядка 10^{-3} .
4. Ограничения на фоновое значение скалярного поля получаются лучше при проведении теста на двойных системах с пульсаром с ненулевым эксцентриситетом ($\phi_0 < 10^{-3}$), чем на квазикруговых системах ($\phi_0 < 1.3 \times 10^{-2}$).

5. Гибридная $f(R)$ - гравитация успешно объясняет наблюдательные данные, полученные от двойных систем с пульсаром для 4 ППК параметров $\dot{P}_b, \dot{\omega}, r, s$, в приближении маломассивного скалярного поля.

Достоверность работы обеспечивается использованием современных методов проверки теорий гравитации на реальных астрофизических данных. Полученные результаты отвечают современным представлениям об ограничениях, полученных для данных теорий гравитации.

Апробация работы. Результаты данной диссертации были апробированы на международных конференциях:

1. Avdeev N.A., Dyadina P.I. "Testing of hybrid metric-Palatini $f(R)$ -gravity in eccentric binary pulsars". 4-я Международная зимняя школа-семинар по гравитации и космологии "Петровские чтения-2018 Казань, Россия, 26 ноября - 1 декабря 2018.
2. Avdeev N.A. "Testing of the scalar-tensor theory with a nonlinear kinetic term on the new results of WMAP/PLANCK ". Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2022 секция "Физика" 11-22 апреля 2022 (Москва, Россия), Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 11 апреля - 22 мая 2022.
3. Avdeev N.A., Toporensky A.V. "Inflation in the scalar tensor theory of gravity with a non-minimal kinetic coupling". International Conference on Quantum Field Theory, High- Energy Physics, and Cosmology, Дубна, Россия, 18-21 июля 2022.
4. Avdeev N.A., Toporensky A.V. "Inflation in the scalar-tensor theory of gravity with a non-minimal kinetic coupling ". An Inaugural Conference on Current Status of Cosmology, Delhi, Индия, 17-19 октября 2022.

Личный вклад. Автор принимал активное участие в постановке задачи диссертации. Большая часть математических расчетов была проделана автором самостоятельно. В работе 1 автором были получены аналитические выражения для 4 ППК параметров $\dot{\omega}, \dot{P}_b, r, s$ в гибридной $f(R)$ - гравитации для случая орбит с ненулевым эксцентриситетом. Были получены ограничения на фоновое значение скалярного поля ϕ_0 с использованием данных двойных систем с пульсаром PSR J0737-3039 и PSR J1903+0327. В работе 2 автором были получены аналитические выражения для начальных значений параметра Хаббла H и производной скалярного поля $\dot{\phi}$, приводящие к инфляции более чем в N ефолдов, в скалярно-тензорной теории с неминимальной кинетической связью с $\kappa < 0$ и нулевым потенциалом $V = 0$. Также были оценены численные значения для этих параметров, приводящие к инфляции более чем в 60 ефолдов. Помимо этого в данной работе автором численно были получены области начальных данных, приводящие к разным типам инфляции в случае с $V = V_0|\phi|^{3/2}$. В

работе 3 автором было исследовано асимптотическое поведение тензорно-скалярного отношения и спектрального индекса для подкласса теории Хорндески с неминимальной кинетической связью с $\kappa > 0$ и произвольным степенным потенциалом $V = V_0\phi^\alpha$. Также было проведено сравнение с последними на данный момент наблюдательными ограничениями на данные параметры, полученными из экспериментов WMAP/PLANK и VICEP. В работе 4 автором были просуммированы результаты работ 2 и 3, показаны результирующие ограничения накладываемые на скалярно-тензорную теорию с неминимальным кинетическим членом и степенным потенциалом.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет **100** страниц текста с **16** рисунками и **4** таблицами. Список литературы содержит **101** наименования.

Во **Введении** обсуждается актуальность работы и личный вклад автора, описывается достоверность результатов, их апробация, практическая значимость и методы, использованные для их достижения, сделан обзор литературы по теме диссертации, публикаций автора, а также выписаны решаемые задачи и выносимые на защиту положения.

В **Главе 1** обсуждается теория Хорндески, а также разбираются её частные случаи, рассматриваемые далее в работе. В данной главе также приводятся уравнения поля для данных моделей, которые далее будут использованы. Также разобран переход гибридной $f(R)$ - гравитации к скалярно-тензорной форме.

В **Главе 2** приводится описание скалярно-тензорной теории с неминимальной положительной кинетической связью и степенным потенциалом. Вводятся основные понятия используемые для описания инфляции. Приводится подробный вывод аналитических выражений для параметров спектра первичных возмущений для данной теории. Также проводится анализ асимптотического поведения данных выражений и сравнение предсказаний теории с результатами экспериментов WMAP/PLANK & VICEP.

В **Главе 3** проводится анализ существования адекватных сценариев в случае теории с отрицательной неминимальной кинетической связью. Причем для нулевого потенциала подобный анализ был проведён аналитически: были получены начальные значения для параметра Хаббла и производной скалярного поля по времени, приводящие к инфляции более чем в N ефолдов. А для случая с потенциалом $V = V_0\phi^{1.5}$ подобный анализ был проведён численно, с помощью метода Рунге-Кутты 4 порядка, реализованный на языке программирования Python. Описано получение областей начальных данных, приводящих к адекватной конечной инфляции.

В **Главе 4** было показано получение производной орбитального периода для частного случая теории Хорндески без механизмов экранирования и гибридной $f(R)$ - гравитации на данных двойных систем с пульсаром в случае квазикруговых орбит. Также в конце данной главы была получена производная орбитального периода в случае орбит с ненулевым эксцентриситетом в приближении маломассивного скалярного поля.

В **Главе 5** проводится проверка гибридной $f(R)$ - гравитации на данных двойных систем с пульсаром в случае орбит с ненулевым эксцентриситетом, получено ограничение на фоновое значение скалярного поля в приближении малой массы скалярного поля. Проведено сравнение результатов для орбит с ненулевым эксцентриситетом и квазикруговых орбит.

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

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях, 4 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. *Авдеев Н., Дядина П., Лабазова С.* Проверка гибридной метрической-Палатини $f(R)$ -гравитации в двойных системах с пульсаром // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 2020. — Т. 131, № 6. — 537–547/ Переводная версия: Avdeev, N.A. and Dyadina, P.I. and Labazova, S.P. Test of Hybrid Metric-Palatini $f(R)$ –Gravity in Binary Pulsars // J. Exp. Theor. Phys. 131, 537–547 (2020). — J. Exp. Theor. Phys. Web of Science JIF2022=1,100, личный вклад - не менее 85%, 0,8125 печатных листа.
2. *Avdeev N., Toporensky A.* On Viability of Inflation in Nonminimal Kinetic Coupling Theory. // Gravitation and Cosmology. — 2021. — Т. 27, № 5. — С. 269–274. — Gravit. Cosmol. Web of Science JIF2022=0,900, личный вклад - не менее 90%, 0,375 печатных листа.
3. *Avdeev N., Toporensky A.* Ruling Out Inflation Driven by a Power Law Potential: Kinetic Coupling Does Not Help. // Gravitation and Cosmology. — 2022. — Т. 28, № 5. — С. 416–419. — Gravit. Cosmol. Web of Science JIF2022=0,900, личный вклад - не менее 90%, 0,25 печатных листа.
4. *Avdeev N., Toporensky A.* Inflation in Scalar-Tensor Theory with Nonminimal Kinetic Coupling // Письма в ЭЧАЯ / PEPAN Letters. — 2023. — Т. 20. — С. 486–489. — Phys. Part. Nuclei Lett. Web of Science JIF2022=0,500, личный вклад - не менее 90%, 0,25 печатных листа.

Список литературы

1. *Feng J. L.* Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2010. — Т. 48, № 1. — С. 495–545.
2. *Li M., Li X., Wang S. e. a.* Dark energy: A brief review // Frontiers of Physics. — 2013. — Т. 8, № 6. — С. 828–846.
3. *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. — Т. 6, № 239. — С. 249–287.
4. *Zwicky F.* Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // Helvetica Physica Acta. — 1933. — Т. 6. — С. 110–127.
5. *Vegetti S., Koopmans L. V. E., al. et.* Inference of the cold dark matter substructure mass function at $z = 0.2$ using strong gravitational lenses // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Т. 442, № 3. — С. 2017–2035.
6. *Markevitch M., Gonzalez A. H., al. et.* Direct Constraints on the Dark Matter Self-Interaction Cross Section from the Merging Galaxy Cluster 1E 0657–56 // The Astrophysical Journal. — 2004. — Т. 606, № 2. — С. 819–824.
7. *Adam G. Riess e. a.* Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // The Astrophysical Journal. — 1998. — Т. 116, № 3. — С. 1009–1038.
8. *Adam G. Riess e. a.* Type Ia Supernova Discoveries at $z > 1$ from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution* // The Astrophysical Journal. — 2004. — Т. 607, № 2. — С. 665–687.
9. *Starobinsky A.* A new type of isotropic cosmological models without singularity // Physics Letters B. — 1980. — Март. — Т. 91, № 1. — С. 99–102.
10. *Starobinsky A.* Dynamics of phase transition in the new inflationary universe scenario and generation of perturbations // Physics Letters B. — 1982. — Ноябрь. — Т. 117, № 3/4. — С. 175–178. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982PhLB..117..175S>.
11. *Guth A. H., Weinberg E. J.* Cosmological consequences of a first-order phase transition in the // Physical Review D. — 1981. — Февр. — Т. 23, № 4. — С. 876–885.

12. *Linde A.* A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems // *Physics Letters B.* — 1982. — Февр. — Т. 108, № 6. — С. 389–393. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982PhLB..108..389L>.
13. *Albrecht A., Steinhardt P. J.* Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking // *Physical Review Letters.* — 1982. — Апр. — Т. 48, № 17. — С. 1220–1223.
14. *Linde A. D.* Particle physics and inflationary cosmology. — 1990. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990ppic.book.....L>.
15. *Liddle A. R., Lyth D. H.* Cosmological Inflation and Large-Scale Structure. — 2000. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000cils.book.....L>.
16. *Baumann D.* TASI Lectures on Inflation // arXiv e-prints. — 2009. — Июль. — arXiv:0907.5424. — arXiv: 0907.5424 [hep-th]. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009arXiv0907.5424B>.
17. *Mukhanov V., Chibisov G.* Quantum fluctuations and a nonsingular universe // *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters.* — 1981. — Май. — Т. 33. — С. 532. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981JETPL..33..532M>.
18. *Hawking S.* The development of irregularities in a single bubble inflationary universe // *Physics Letters B.* — 1982. — Центр. — Т. 115, № 4. — С. 295–297. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982PhLB..115..295H>.
19. *Rampei Kimura e. a.* Extended vector-tensor theories // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.* — 2017. — Т. 2017, № 1. — С. 002.
20. *Hassan S., Rosen R.* Bimetric gravity from ghost-free massive gravity. // *Journal of High Energy Physics.* — 2012. — Т. 2012, № 126.
21. *De Felice A., Tsujikawa S.* f(R) Theories // *Living Reviews in Relativity.* — 2010. — Т. 13, № 3.
22. *Langlois D. e. a.* Mimetic gravity as DHOST theories // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.* — 2019. — Т. 2019, № 2. — С. 036.
23. *Horndeski G. W.* Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space // *International Journal of Theoretical Physics.* — 1974. — Sept. — Vol. 10, no. 6. — P. 363–384.
24. *Dyadina P. I., Avdeev N. A., Alexeyev S. O.* Horndeski gravity without screening in binary pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2018. — Ноябрь. — Т. 483, № 1. — С. 947–963.

25. *Matsumoto J., Sushkov S. V.* Cosmology with nonminimal kinetic coupling and a Higgs-like potential // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2015. — Ноябрь. — Т. 2015, № 11. — С. 047–047.
26. *Avdeev N. A., Toporensky A. V.* Ruling Out Inflation Driven by a Power Law Potential: Kinetic Coupling Does Not Help // Gravitation and Cosmology. — 2022. — Ноябрь. — Т. 28, № 4. — С. 416–419.
27. *Avdeev N., Toporensky A.* On Viability of Inflation in Nonminimal Kinetic Coupling Theory // Gravitation and Cosmology. — 2021. — Июль. — Т. 27, № 3. — С. 269–274.
28. *Sushkov S. V.* Realistic cosmological scenario with nonminimal kinetic coupling // Physical Review D. — 2012. — Июнь. — Т. 85, № 12. — С. 123520.
29. *Rafkat G., Ruslan M., A. S. A., V. S. S., S. V. M.* Anisotropic cosmological models in Horndeski gravity // Physical Review D. — 2021. — Т. 103, № 10. — С. 104015.
30. *Jiaming S., Taishi K., Taotao Q.* Dark matter candidate induced by Horndeski theory: Dark matter halo and cosmological evolution // Physical Review D. — 2020. — Т. 101, № 2. — С. 024046.
31. *Alberto D.-T., Francisco F., Gustavo N.* Horndeski dark matter and beyond // Physical Review D. — 2018. — Т. 97, № 12. — С. 123524.
32. *Avdeev N. A., Dyadina P. I., Labazova S. P.* Test of Hybrid Metric-Palatini f(R)-Gravity in Binary Pulsars // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2020. — Октябрь. — Т. 131, № 4. — С. 537–547.
33. *Torres I., Fabris J. C., Piattella O. F.* Classical and quantum cosmology of Fab Four John theories // Physics Letters B. — 2019. — Ноябрь. — Т. 798. — С. 135003.
34. *Kase R., Tsujikawa S.* Dark energy in Horndeski theories after GW170817: A review // International Journal of Modern Physics D. — 2019. — Т. 28, № 5.
35. *Hohmann M.* Parametrized post-Newtonian limit of Horndeski’s gravity theory // Physical Review D. — 2015. — Т. 92, № 6. — С. 064019.
36. *Germani C., Kehagias A.* New Model of Inflation with Nonminimal Derivative Coupling of Standard Model Higgs Boson to Gravity // Physical Review Letters. — 2010. — Июль. — Т. 105, № 1. — С. 011302.
37. *Germani C., Kehagias A.* Cosmological perturbations in the new Higgs inflation // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2010. — Май. — Т. 2010, № 05. — С. 019–019.

38. *Germani C., Watanabe Y.* Addendum: UV-protected (natural) inflation: primordial fluctuations and non-gaussian features // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.* — 2011. — Июль. — Т. 2011, № 07. — A01—A01.
39. *Germani C., Kehagias A.* Ultraviolet-Protected Inflation // *Physical Review Letters.* — 2011. — Апр. — Т. 106, № 16. — С. 161302.
40. *Germani C., Watanabe Y., Wintergerst N.* Self-unitarization of New Higgs Inflation and compatibility with Planck and BICEP2 data // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.* — 2014. — Дек. — Т. 2014, № 12. — С. 009—009.
41. *Granda L., Jimenez D.* Slow-roll inflation in scalar-tensor models // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics.* — 2019. — Сент. — Т. 2019, № 09. — С. 007—007.
42. *Tsujikawa S.* Observational tests of inflation with a field derivative coupling to gravity // *Physical Review D.* — 2012. — Апр. — Т. 85, № 8. — С. 083518.
43. *Горбунов Д., Рубаков В.* Введение в теорию ранней вселенной. Космологические возмущения. — УРСС, 2010.
44. *Collaboration: P., Akrami Y., al et.* Planck 2018 results // *Astronomy Astrophysics.* — 2020. — Сент. — Т. 641. — A10.
45. *Oliveira-Costa e. de.* Significance of the largest scale CMB fluctuations in WMAP // *Physical Review D.* — 2004. — Т. 69, № 6. — С. 063516.
46. *Collaboration: P., Akrami Y., et.al.* Planck 2018 results VI. Cosmological parameters // *Astronomy & Astrophysics.* — 2021. — Т. 652, № C4.
47. *Yu P. C., Zeng L., Zhang C., Zhang S.* Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves using Observations through the 2018 Observing Season // *Physical Review Letters.* — 2021. — Окт. — Т. 127, № 15. — С. 151301.
48. *Ade P. A. R., (BICEP/Keck Collaboration) et al.* Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck Observations through the 2018 Observing Season // *Physical Review Letters.* — 2021. — Т. 127, № 15. — С. 151301.
49. *Bezrukov F., Shaposhnikov M.* The Standard Model Higgs boson as the inflaton // *Physics Letters B.* — 2008. — Т. 659, № 3. — С. 703—706.
50. *Koshelev A. S., Kumar K. S., Mazumdar A., Starobinsky A. A.* Non-Gaussianities and tensor-to-scalar ratio in non-local R²-like inflation // *Journal of High Energy Physics.* — 2020. — Июнь. — Т. 2020, № 6.
51. *Gorbunov D., Panin A.* Are R²- and Higgs-inflations really unlikely? // *Physics Letters B.* — 2015. — Т. 743. — С. 79—81.

52. *Poisson E., Will C. M.* Gravity Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic : Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic. — imusti. — С. 792.
53. *Will C. M.* Theoretical Frameworks for Testing Relativistic Gravity. II. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, and the Nordtvedt Effect // *The Astrophysical Journal*. — 1971. — Февр. — Т. 163. — С. 611.
54. *Will C. M., Kenneth J. N.* Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. I. Preferred-Frame Theories and an Extended PPN Formalism // *The Astrophysical Journal*. — 1972. — Ноябрь. — Т. 177. — С. 757.
55. *Dyadina P. I., Labazova S. P., Alexeyev S. O.* Post-Newtonian Limit of Hybrid Metric-Palatini $f(R)$ -Gravity // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2019. — Ноябрь. — Т. 129, № 5. — С. 838–848.
56. *Zhang X., Zhao W., Huang H., Cai Y.* Post-Newtonian parameters and cosmological constant of screened modified gravity // *Physical Review D*. — 2016. — Июнь. — Т. 93, № 12. — С. 124003.
57. *Barreira A., Brax P., Clesse S., Li B., Valageas P.* K-mouflage gravity models that pass Solar System and cosmological constraints // *Physical Review D*. — 2015. — Июнь. — Т. 91, № 12. — С. 123522.
58. *Hulse R. A., Taylor J. H.* Discovery of a pulsar in a binary system. // *apjl*. — 1975. — Янв. — Т. 195. — С. L51–L53. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1975ApJ...195L..51H>.
59. *Damour T., Taylor J. H.* Strong-field tests of relativistic gravity and binary pulsars // *Physical Review D*. — 1992. — Март. — Т. 45, № 6. — С. 1840–1868.
60. *Damour T., Deruelle N.* General relativistic celestial mechanics of binary systems. I. The post-Newtonian motion. // *Annales de L’Institut Henri Poincare Section (A) Physique Theorique*. — 1985. — Янв. — Т. 43, № 1. — С. 107–132. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985AIHPA..43..107D>.
61. *Damour T., Deruelle N.* General relativistic celestial mechanics of binary systems. II. The post-Newtonian timing formula. // *Annales de L’Institut Henri Poincare Section (A) Physique Theorique*. — 1986. — Янв. — Т. 44, № 3. — С. 263–292. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1986AIHPA..44..263D>.
62. *Olmo G. J.* Limit to general relativity in $f(R)$ theories of gravity // *Physical Review D*. — 2007. — Т. 75, № 2. — С. 023511.
63. *Hu W., Sawicki I.* Models of $f(R)$ cosmic acceleration that evade solar system tests // *Physical Review D*. — 2007. — Т. 76, № 6. — С. 064004.

64. *Odintsov S., Sáez-Chillón Gómez D., Sharov G.* Is exponential gravity a viable description for the whole cosmological history? // The European Physical Journal C. — 2017. — T. 77, № 862.
65. *Koivisto T., Kurki-Suonio H.* Cosmological perturbations in the Palatini formulation of modified gravity // Classical and Quantum Gravity. — 2006. — T. 23, № 2. — C. 023511.
66. *Capozziello S., Harko T., Koivisto T. S., Lobo F. S. N., Olmo G. J.* Wormholes supported by hybrid metric-Palatini gravity // Physical Review D. — 2012. — Дек. — T. 86, № 12. — C. 127504.
67. *Dănilă B., Harko T., Lobo F. S. N., Mak M. K.* Spherically symmetric static vacuum solutions in hybrid metric-Palatini gravity // Physical Review D. — 2019. — T. 99, № 6. — C. 064028.
68. *Danila B., Harko T., Lobo F. S. N., Mak M. K.* Hybrid metric-Palatini stars // Physical Review D. — 2017. — Февр. — T. 95, № 4. — C. 044031.
69. *Capozziello S., Harko T., Koivisto T., Lobo F., Olmo G.* Hybrid Metric-Palatini Gravity // Universe. — 2015. — Авг. — T. 1, № 2. — C. 199–238.
70. *Capozziello S., Harko T., Koivisto T. S., Lobo F. S., Olmo G. J.* Cosmology of hybrid metric-Palatini -gravity // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2013. — Апр. — T. 2013, № 04. — C. 011–011.