

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

На правах рукописи
УДК 524.882



Третьякова Дарья Алексеевна

**Расширенные теории гравитации и возможности их
наблюдательной проверки в небесной механике и космологии**

Специальности: 01.03.01 – астрометрия и небесная механика,
01.04.02 – теоретическая физика

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук Алексеев С.О.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва — 2015

Работа выполнена на кафедре астрометрии, небесной механики и гравиметрии физического факультета МГУ

Научный руководитель:

Алексеев Станислав Олегович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела релятивистской астрофизики ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты:

- **Поляченко Евгений Валерьевич** доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института Астрономии РАН
- **Георгий Андреевич Алексеев**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Математического Института им. В.А. Стеклова РАН

Ведущая организация:

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

Защита состоится 19 ноября 2015 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга МГУ по адресу: 119992, г. Москва, Университетский пр-т., д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский пр-т., д. 27, Фундаментальная библиотека) и на сайте <http://www.sai.msu.ru/dissovet/2015.html>

Автореферат разослан 17 сентября 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

С.О. Алексеев



1. Введение

1.1. Актуальность темы

Общая теория относительности (ОТО) является стандартной теорией гравитации в задачах астрономии, астрофизики, космологии и фундаментальной физики. В связи с этим ОТО используется во многих важных прикладных вопросах, таких как навигация космических аппаратов и наземных объектов (с помощью систем спутниковой навигации¹), геодезия, обеспечение нужд точного времени и т. д. С момента своего первого экспериментального подтверждения в 1919 г. общая теория относительности Эйнштейна стала одним из основных инструментов теоретического изучения Вселенной на самых разных масштабах. Возникло множество направлений исследования на границе между астрономией, космологией и теоретической физикой, развитие которых привело научное сообщество к идее построения новой — расширенной теории гравитации.

С точки зрения теоретической физики аргументом в пользу создания обобщенной теории гравитации является невозможность непосредственного квантования ОТО и полного описания ее на языке современной теории поля. Со стороны астрономии это необходимость объяснения таких феноменов, как ускоренное расширение Вселенной и наличие так называемой «темной материи». Другой проблемой ОТО является возникновение сингулярностей — точек пространства или моментов времени, когда величины, описывающие свойства пространства–времени, становятся бесконечными. В настоящее время предложено множество теорий гравитации, обобщающих ОТО, однако возможности их экспериментальной проверки в наземных экспериментах в настоящее время весьма ограничены из-за малости предсказываемых ими эффектов. Существенных результатов можно достичь, используя методы астрономии и космологии. Эти разделы науки изучают огромные масштабы и экстремальные состояния вещества, где больше вероятность проявления новых эффектов. Точность измерения параметров движения небесных тел и космических

¹В системе спутниковой навигации GPS для вычисления координат приемника используются поправки, вычисляемые в рамках ОТО.

аппаратов в небесной механике и астрометрии очень высока и продолжает расти. Это позволяет использовать методы данных наук в попытках экспериментальной проверки расширенных теорий гравитации.

Так как любая обобщенная теория гравитации должна соответствовать наблюдениям и включать в себя ОТО как предельный случай, она, с необходимостью, должна содержать в себе решения типа черная дыра и, в то же время, корректно описывать эволюцию Вселенной на космологических масштабах. Метрика Шварцшильда используется в астрономии для описания сферически-симметричного распределения вещества, а в пределе слабого поля описывает и Солнечную систему (если массой планет по сравнению с массой Солнца можно пренебречь). Следовательно, чтобы судить об адекватности теорий гравитации можно рассмотреть их структуру в низкоэнергетическом приближении путем нахождения аналогов решения Шварцшильда и дальнейшего их исследования на наличие отклонений от ОТО и соответствие наблюдениям. Перспективы обнаружения таких отклонений стимулируют проведение новых гравитационных исследований и, в особенности, экспериментов космического базирования [1].

Аналогично можно действовать и в космологии. Исследование космологических моделей в рамках расширенных теорий гравитации позволяет судить о соответствии теории наблюдаемой картине мира. Дополнительно такое исследование потенциально может дать естественное объяснение таким феноменам как темная материя и темная энергия. Заметим, что на больших пространственных масштабах, таких, как, например, галактические и космологические, ОТО еще не подвергалась серьезным экспериментальными проверкам [1]. Существует мнение, что явления темной материи и темной энергии сигнализируют о несостоятельности ОТО на этих масштабах. Эта возможность стимулирует исследования расширенных теорий гравитации.

Поэтому поиск в рамках расширенных теорий гравитации различных типов решений и последующее их исследование методами астрономии, космологии и небесной механики, а также сравнение свойств решений с наблюдательными данными позволяет судить об адекватности различ-

ных моделей и теорий гравитации. Кроме того, в ближайшем будущем станут возможны наблюдения регионов в непосредственной близости от горизонта предполагаемой сверхмассивной черной дыры в центре нашей галактики, что позволит проверить предсказания различных теорий гравитации в режиме больших масс и сильной кривизны пространства, что делает исследование предсказаний этих теорий актуальным.

1.2. Цель исследования и постановка задачи

Цель данной диссертации — исследовать адекватность обобщенных теорий гравитации, рассматривая свойства решений типа черная дыра, доступные для регистрации методами современной наблюдательной астрономии и небесной механики, а также космологические решения расширенных теорий гравитации. Для реализации данной цели были получены аналитические и численные решения расширенных теорий гравитации и проведено сравнение свойств полученных решений с наблюдательными данными. В качестве основного метода проверки локальных сферически симметричных решений используется геометрия пространства–времени таких решений: характеристики орбит пробных тел в поле тяготения объекта, свойства гравитационного потенциала и отклонения от закона тяготения Ньютона. После расчета эти характеристики можно сравнивать с наблюдаемой картиной движения небесных объектов и аккреции вещества в космосе, а также с данными экспериментов по проверке закона Ньютона. Для космологических решений критерием адекватности является соответствие результатов модели ΛCDM^2 , а также устранение некоторых противоречий, характерных для космологии в ОТО.

В диссертации с помощью комбинации в исследовании методов космологии и небесной механики изучены свойства расширенных теорий гравитации на различных масштабах и с использованием различных наборов данных. Такой подход к исследованию расширенных теорий позволяет проводить более разностороннее исследование, искать возможные

² ΛCDM — эмпирическая космологическая модель, наилучшим образом описывающая сегодняшние наблюдательные данные. В этой модели пространственно–плоская Вселенная заполнена, помимо обычной барионной материи, тёмной энергией (описываемой космологической постоянной Λ в уравнениях Эйнштейна) и холодной (не релятивистской) тёмной материей.

наблюдательные проявления таких теорий и сравнивать их предсказываемые величины с наблюдательными данными, тем самым подвергая эти теории экспериментальной проверке.

1.3. Научная новизна и практическая значимость

Все полученные в данной работе результаты являются новыми, оригинальными и достоверными, что подтверждается корректностью используемых аналитических и численных методов, а также согласием с результатами других исследований. На момент публикации обсуждаемые результаты были получены впервые в мире.

В диссертации впервые исследовано движение пробных частиц в поле тяготения объекта для решения типа «черная дыра» с новым параметром — приливным зарядом q , предложенного в работе Дадича и др. [2], и являющегося обобщением метрики Рейсснера-Нордстрема:

$$ds^2 = \Delta(r)c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{\Delta(r)} - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2), \quad (1.1)$$

$$\Delta(r) = 1 + \frac{\mu}{r} + \frac{q}{r^2}, \quad (1.2)$$

$$\mu = -r_g,$$

где $r_g = 2GM/c^2$, величина M имеет смысл массы, q — новый параметр. Для черной дыры Рейсснера–Нордстрема $q = \frac{Q^2 G}{4\pi\epsilon_0 c^4}$ (здесь ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, Q^2 — соответствует электрическому заряду черной дыры) и, соответственно, в ОТО $q > 0$. Для метрики Дадича и др. q имеет геометрическую природу (так называемый «приливной заряд») и может принимать произвольные значения. Впервые были исследованы орбиты пробных тел для отрицательных значений параметра $q < 0$. Показано, что данное решение не противоречит наблюдательным данным и не предсказывает появления каких-либо принципиально новых эффектов. Это говорит об адекватности рассмотренной модели и о том, что ее можно применять на астрономических масштабах при рассмотрении аккреции и движения небесных объектов в астрономии. Получено ограничение на значение приливного заряда: $|q| \ll M_{\odot}^2 G^2 / c^4$.

Впервые получено решение, описывающее эволюцию Вселенной, в тео-

рии Бранса–Дикке с космологической постоянной Λ для плоской Вселенной для отрицательных значений параметра теории ω . Данная теория отличается от ОТО наличием дополнительного скалярного поля ϕ , которое физически проявляется как изменение в пространстве или времени гравитационной постоянной:

$$S = \frac{c^4}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} \left[\phi(R + 2\Lambda) - \frac{\omega}{\phi} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi \right]. \quad (1.3)$$

Космологическая постоянная введена для учета ускоренного расширения Вселенной. Аналитически рассчитан космологический сценарий, при котором масштабный фактор не обращается в ноль при рассмотрении эволюции назад во времени — возникает «отскок» масштабного фактора, все функции при этом остаются регулярными (в отличие от классического сценария в ОТО). Такой сценарий не предполагает наличия у Вселенной в прошлом состояния с бесконечной плотностью и температурой, предлагая решение одной из проблем современной космологии: проблемы начальной космологической сингулярности. Из требования согласованности с современными представлениями о нуклеосинтезе в ранней Вселенной предложено ограничение на значение параметра теории: $|\omega| > 10^{40}$ — существенно более строгое, чем современное экспериментальное ограничение по данным эксперимента Кассини–Гюйгенс [3]. Таким образом, показано, что теория Бранса–Дикке с Λ -членом хорошо описывает имеющиеся на сегодняшний момент наблюдательные данные, а также потенциально может решить проблему начальной космологической сингулярности.

В диссертации впервые численно исследованы сферически симметричные решения, в модели Бранса–Дикке с потенциалом скалярного поля, предложенной Элизалде и др. в работе [4].

$$S = \frac{c^4}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} e^{\alpha\phi} \left[\mathcal{R} - \omega \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V_0 e^{\phi/\phi_0} \right].$$

Здесь α — константа, произвольный параметр модели. В отличие от описанной выше модели, в этом случае расширение Вселенной учтено с помощью потенциала скалярного поля. Показано, что для значений пара-

метров $\omega < 0$, $22.7 \lesssim \phi_0 \lesssim 25$ в теории возможно существование регулярного решения типа «кротовая нора», которое может претендовать на описание реальных астрономических объектов. Структура решения на больших масштабах соответствует пространству де Ситтера, описывая расширяющуюся Вселенную, тогда как на малых масштабах структура решения соответствует кротовой норе. Также показано, что численное решение может соответствовать решению Шварцшильда (т.е. наблюдательным данным). Таким образом, показано, что модель может применяться как на астрономических, так и на космологических масштабах. Таким образом, получены новые ограничения на параметры модели и впервые исследованы возможности ее экспериментального обнаружения методами астрономии и небесной механики.

Впервые получена поправка к гравитационному потенциалу для решения Агнезе и Ла Камера [5], описывающего кротовую нору в теории Бранса–Дикке, и исследованы возможности ее наблюдательного обнаружения в наземных экспериментах по проверке закона Ньютона и в смещении частоты сигнала космических аппаратов.

1.4. Положения, выносимые на защиту

- 1) Показано, что картина движения пробных частиц в поле тяготения (картина геодезических линий) для решения типа «черная дыра» в модели Рэндал–Сандрума с одной браной, предложенного в работе Дадича и др. [2], не отличается (с наблюдательной точки зрения) от ОТО для астрономических масс. Показано, что данное решение не противоречит наблюдательным данным и не предсказывает появления каких-либо принципиально новых эффектов при выполнении ограничения на значение приливного заряда $|q| \ll M_{\odot}^2 G^2 / c^4$. Сделан вывод о том, что модель можно применять на астрономических масштабах при рассмотрении аккреции и движения объектов в небесной механике (публикации № 1,6,8,9).
- 2) Получено решение в модели Бранса–Дикке с космологической постоянной для плоской Вселенной для отрицательных значений па-

раметра теории ω . Составлен космологический сценарий, в ходе которого масштабный фактор не обращается в нуль при рассмотрении эволюции назад во времени — возникает «отскок» масштабного фактора, все функции при этом остаются регулярными. Такое поведение исключает наличие у Вселенной в прошлом начальной космологической сингулярности. Получено ограничение на значение параметра теории: $|\omega| > 10^{40}$ — существенно более строгое, чем современное экспериментальное ограничение. Таким образом, показано, что теория Бранса–Дикке с Λ -членом хорошо описывает имеющиеся на сегодняшний момент наблюдательные данные и может не содержать начальной космологической сингулярности (публикации № 2,4,5).

- 3) Показано, что в модели Бранса–Дикке с потенциалом скалярного поля, предложенной Элизалде и др. в работе [4] для значений параметров $\omega < 0$, $22.7 \lesssim \phi_0 \lesssim 25$ возможно существование регулярного решения типа «кротовая нора», способного описывать реальные астрономические объекты. Решение получено численно, показано, что оно может соответствовать решению Шварцшильда (т.е. наблюдательным данным). Структура решения на больших масштабах соответствует пространству де Ситтера, тогда как на малых масштабах структура решения соответствует кротовой норе. Показано, что геометрия пространства–времени полученного решения может существенно отличаться от геометрии Шварцшильда: $\Delta_{num}/\Delta_{schw} \approx 1.471$ для значения параметра $\phi_0 = 23.5$. Показано, что условие положительно определенной кинетической энергии скалярного поля $3\alpha^2/2 + \omega > 0$, предложенное Элизаде и др. не согласуется с имеющимися астрономическими данными $|\omega|/\alpha^2 > 10^5$ для $\omega < 0$. Получена поправка к закону Ньютона для решения Агнеше и Ла Камера и показано, что существующей экспериментальной точности недостаточно для обнаружения этой поправки с учетом ограничения на нее, следующего из данных для ППН-параметра: максимальная величина поправки оказывается как минимум на 6 порядков ниже точности экспериментов. Сделан вывод о том, что рассмот-

ренная модель может применяться как на астрономических, так и на космологических масштабах и соответствовать наблюдательным данным астрономии и небесной механики (публикация № 3).

1.5 Публикации по теме диссертации

- 1) Алексеев С.О., Стародубцева Д.А. Черные дыры в моделях с некомпактными дополнительными измерениями // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2010. — Т. 138, № 4. — С. 652–658.
- 2) Non-singular Brans-Dicke- Λ Cosmology / Tretyakova D., Shatskiy A., Novikov I., Alexeyev S. // Physical Review D. — 2012. — Vol. 85, no. 12. — P. 124059–1–124059–7.
- 3) Tretyakova D. and Latosh B. and Alexeyev S. . Wormholes and naked singularities in Brans-Dicke cosmology // Classical and Quantum Gravity (принята к печати). — 2015.
- 4) И. Д. Новиков, А. А. Шацкий, С. О. Алексеев, Д. А. Третьякова. Идеи Я.Б. Зельдовича и современная космология Бранса—Дикке // Успехи физических наук. — 2014. — Т. 184, № 4. — С. 379–386.
- 5) Non-singular Brans-Dicke-Lambda Cosmology / Alexeyev S., Tretyakova D., Shatskiy A., Novikov I. // Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossman Meeting on General Relativity. — Vol. 2. — 2014. — P. 1605–1607.
- 6) S. Alexeyev, D. Starodubceva. Black holes in $N > 4$ gravity // PoS (QFTHEP2010). — 2010. — P. 071.
- 7) Алексеев С.О., Памятных Е.А., Урсулов А.В., Третьякова Д.А., Ранну К.А. Введение в общую теорию относительности, ее современное развитие и приложения. — Издательство Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н.Ельцина Екатеринбург, РФ, 2015.

- 8) S. Alexeyev, D. Tretyakova. Black Holes: Evolution, Theory and Thermodynamics: Primordial Black Holes in Higher Order Curvature Gravity and Beyond. — Nova Publishers, New York, USA, 2012. — P. 21.
- 9) S. Alexeyev, D. Tretyakova, B. Latosh. Advances in General Relativity Research: Geodesic Analysis in Multidimensional Gravity Models. — Nova Publishers, New York, USA, 2015.
- 10) Alexeyev S.O. Tretyakova D.A. Melkoserov D. Echeistov V.A. Latosh B.N. Coupling Functions and Quantum Corrections in Gauss-Bonnet Gravity. — Nova Publishers, New York, USA, 2015.

1.6. Апробация результатов

Результаты данной работы неоднократно докладывались на семинарах по гравитации и космологии имени А.Л. Зельманова и семинарах отдела релятивистской астрофизики в ГАИШ МГУ, а также на студенческих и международных конференциях:

- «Зимняя физическая школа УрФУ», Екатеринбург, февраль 2014;
- «QUARKS-2012 17th International Seminar on High Energy Physics June», Ярославль, 2012;
- «The XIXth International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory», Голицино, 2010;
- «16th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2010», Коломна, 2010;
- «Физика Космоса», Екатеринбург, февраль 2009.

Результаты работы также вошли в учебник «Введение в общую теорию относительности, ее современное развитие и приложения», публикуемый в издательстве Уральского Федерального Университета (УрФУ) [6], материалы которого используются автором в работе со студентами УрФУ.

1.7. Структура и объем диссертации

Диссертация подразделяется на Введение, четыре Главы, Заключение, Благодарности и Библиографию. Общий объем диссертации 118 страниц, включая 14 рисунков, 2 таблицы и 122 ссылки.

1.8. Содержание работы

В **Главе 1** дается анализ целей и задач диссертации, приводится список опубликованных работ и апробация результатов, а также положения, выносимые автором на защиту.

В **Главе 2** дается общий обзор расширенных моделей гравитации, рассмотренных в данной диссертации: модели «мира на бране» и теория Бранса–Дикке. Описаны известные на сегодняшний день классические космологические и астрономические решения уравнений поля, описывающие геометрию астрономических объектов или Вселенной в целом: решения Шварцшильда и Рейсснера–Нордстрема для черной дыры, кротовые норы и голые (не укрытые горизонтом) сингулярности. В главе также рассмотрены аналоги перечисленных классических решений, возникающих в расширенных теориях гравитации, которые претендуют на описание реальных астрономических объектов и нуждаются в наблюдательной проверке. Изложены основные способы экспериментальной и наблюдательной проверки релевантности этих решений методами небесной механики и астрометрии – по движению пробных тел в поле тяготения объекта и модификации закона Ньютона.

Глава 3 посвящена изучению орбит (картины геодезических линий) в поле тяготения гипотетического объекта, описываемого решением типа «черная дыра» Дадича и др. [2] для модели Рэндал–Сандрума (многомерная модель с одним большим дополнительным измерением). Такое исследование позволяет судить об адекватности модели Рэндал–Сандрума с помощью методов небесной механики и наблюдательных данных по аккреции вещества и движению небесных объектов. Метрика решения имеет вид (1.1), q – новый параметр. Для черной дыры Рейсснера–Нордстрема $q = \frac{Q^2 G}{4\pi\epsilon_0 c^4}$ (здесь ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость ва-

куума, Q^2 — соответствует электрическому заряду черной дыры) и, соответственно, знак параметра q может быть только положительным. В решении Дадича и др. q — так называемый «приливной заряд» (вклад дополнительных измерений в геометрию), новый параметр решения. Он может принимать как положительные так и отрицательные значения. Данной метрике может соответствовать новый тип черных дыр, соответствующий $q < 0$ (такая возможность отсутствует в классической ОТО). Решение при $q < 0$ имеет один горизонт:

$$r_h = \frac{-\mu + \sqrt{\mu^2 - 4q}}{2},$$

меньшую температуру и большую энтропию по сравнению со шварцшильдовским случаем.

Для произвольной формы геодезической для метрики (1.1) показано, что уравнение содержит только те же типы орбит, что и в классическом случае, несмотря на то, что приливной заряд качественно меняет уравнения. Рассмотрены круговые и радиальные орбиты, сделаны оценки характеристических параметров движения частиц в поле черной дыры. Для радиальных орбит координатное время достижения горизонта пробной частицей оказывается бесконечным, как и в Шварцшильдовом случае, а наличие приливного заряда приводит лишь к количественным изменениям: увеличению начального расстояния r_i радиальной орбиты:

$$r_i = \frac{-\mu + \sqrt{\mu^2 - 4q(1 - E^2)}}{2(1 - E^2)}$$

(здесь $E = \tilde{E}/mc^2$, \tilde{E} — энергия пробной частицы, m — ее масса), и изменению выражения для собственного времени (форма выражения оказывается сложной и судить о том, увеличивается оно или уменьшается, в общем случае не представляется возможным). Для круговых орбит меняются выражения для обратных радиусов $u = 1/r$ последних стабильной u_{isco} и нестабильной u_c циркулярной орбиты, увеличивается значение

квадрата углового момента L :

$$\left(\frac{L}{mc}\right)^2 = \frac{-\mu - 2qu_c}{u_c(2 + 3\mu u_c + 4qu_c^2)}, \quad (1.4)$$

$$\frac{-3\mu + \sqrt{9\mu^2 - 32q}}{4} < r_c < \infty, \quad (1.5)$$

$$8q^2 u_{isco}^3 + 9\mu q u_{isco}^2 + 3\mu^2 u_{isco} + \mu = 0. \quad (1.6)$$

Напрямую получить значение u_{isco} из последнего уравнения в общем случае не представляется возможным. Из требования отсутствия существенной модификации орбит (1.6) на масштабах масс порядка Солнечной получено ограничение на значение приливного заряда $|q| \ll M_\odot^2 G^2 / c^4$.

Сделан вывод, что присутствие приливного заряда q качественно меняет уравнения геодезических, однако на уровне астрономических масс наличие ненулевого приливного заряда q не будет приводить к типичным и форму орбит значительных изменений при выполнении условия $|q| \ll M_\odot^2 G^2 / c^4$. С учетом этого ограничения модель может описывать наблюдаемую картину аккреции вещества и движения небесных объектов и не содержит принципиально новых эффектов и существенных отклонений от наблюдательных данных. Проведено сравнение результата с более поздней работой Захарова [7], учитывающей данные наблюдений объекта SgrA в центре галактики и показано, что ограничение $|q| \ll M_\odot^2 G^2 / c^4$ находится в согласии с результатами Захарова.

В **главе 4** исследована космологическая эволюция (решение уравнений Эйнштейна–Фридмана) в теории Бранса–Дикке с космологической постоянной Λ (в своей стандартной версии теория Бранса–Дикке не приводит к ускоренно расширяющейся Вселенной, чем и обосновано введение Λ). Действие теории записывается в виде:

$$S = \frac{c^4}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} \left[\phi(R + 2\Lambda) - \frac{\omega}{\phi} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + 16\pi L_{matter} \right]. \quad (1.7)$$

Здесь ω — параметр теории БД; $\phi(t)$ — скалярное поле; Λ — космологическая постоянная. Космологическую постоянную можно рассматривать как эффективный учет вклада потенциала скалярного поля, так как

форма потенциала в общем случае не известна. В рассмотрении принимается отрицательный параметр теории Бранса–Дикке $\omega < 0$ и полагается, что минимальное значение масштабного фактора $a(t)$ может оставаться больше нуля $a_{min} > 0$ на всем протяжении эволюции Вселенной во времени. Уравнения Фрийдмана записаны для плоской Вселенной (поздние стадии эволюции), а в качестве граничных условий выбраны современные наблюдаемые значения постоянной Хаббла и ее производной по времени (параметра замедления расширения).

При решении уравнений поля, описывающих эволюцию Вселенной, используется подход, разработанный в [8]. Однако, авторы работы [8] рассматривали только положительные значения ω , поэтому полученное решение представляет собой новую, не описанную в их работе ветвь.

Предложен космологический сценарий, в котором масштабный фактор, в отличие от стандартной Λ CDM–модели, не обращается в нуль при эволюции назад во времени — возникает «отскок» от минимального значения a_{min} масштабного фактора, все функции при этом остаются регулярными. Таким образом, в рассмотренной модели у Вселенной в прошлом отсутствует состояние с бесконечной плотностью и температурой, что является решением одной из проблем современной космологии: проблемы начальной космологической сингулярности. Из требования согласованности с представлениями о нуклеосинтезе в ранней Вселенной получено ограничение на значение параметра теории ω , существенно более строгое, чем современное экспериментальное ограничение: $|\omega| > 10^{40}$, $\omega < 0$. Условие, порождающее данное ограничение состоит в том, чтобы в ходе своей эволюции на ранних стадиях Вселенная была достаточно плотной (а, значит, достаточно «горячей»), чтобы шли процессы нуклеосинтеза. При этом отскок сохраняется при $\omega < \infty$.

Модель, приводящая к отскоку получена для «холодной Вселенной» (заполненной пылеподобной материей без давления) и заведомо неприменима в «горячей Вселенной». Поэтому в области отскока полученные результаты имеют качественный характер и должны быть использованы с целью получения начальных значений всех функций перед переходом Вселенной в горячую фазу (при расчете эволюции назад во времени).

Показано, что решения для горячей и холодной Вселенной могут быть гладко сшиты друг с другом на некотором интервале космологического времени, то есть решение может быть согласовано с решением для горячей Вселенной.

Сделан вывод, что теория Бранса-Дикке с Λ -членом хорошо подходит для описания имеющихся на сегодняшний момент наблюдательных данных, и при этом может содержать решение проблемы космологической сингулярности в начальный момент существования Вселенной.

Глава 5 рассматривает космологическую модель типа Бранса-Дикке из работы Элизалде и др. [4]. В рамках данной модели аналитически и численно исследованы метрики, которые могут соответствовать реальным астрономическим объектам – кротовым норам. Наличие в модели решений, адекватно описывающих геометрию массивных компактных объектов необходимо для согласования модели с астрономическими наблюдениями. Ранее уже было упомянуто, что в своей стандартной версии теория Бранса-Дикке не приводит к ускоренно расширяющейся Вселенной, поэтому в космологии рассматриваются модели Бранса-Дикке с потенциалом скалярного поля или Λ -членом. В данной главе рассмотрен случай экспоненциального потенциала. Действие модели Элизалде и др. имеет вид

$$S = \frac{c^4}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} e^{\alpha\phi} \left[\mathcal{R} - \omega \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V_0 e^{\phi/\phi_0} \right].$$

Здесь α – константа, произвольный параметр модели. В данной модели фантомный³ режим космологического расширения может возникать при положительно определенной эффективной кинетической энергии скалярного поля, благодаря множителю $e^{\alpha\phi}$, введенному в модель вместо классического для теории Бранса-Дикке множителя ϕ . Зачастую в теориях со скалярным для обеспечения ускоренного расширения Вселенной требуется введение отрицательно определенной кинетической энергии скалярного поля, рассматриваемая модель потенциально может быть сво-

³Фантомное расширение соответствует ситуации, когда для параметра уравнения состояния темной энергии ϵ_{de} , равного отношению давления темной энергии к ее плотности, верно $\epsilon_{de} < -1$. Последние данные эксперимента WMAP позволяют считать более вероятной фантомную природу компонента, ответственного за ускоренное расширение Вселенной [9].

бодна от этого недостатка. Таким образом, модель Элизалде и др. из-за ее адекватности с позиции космологии и теоретической физики оказывается интересной для дальнейшего изучения методами небесной механики и проверки на астрономических масштабах.

Для проверки корректности модели необходимо удостовериться, что она содержит сферически симметричные решения, соответствующие наблюдательным данным. Это будет означать, что модель применима не только на космологических, но и на астрономических масштабах и находится в согласии с наблюдениями как космологии, так и астрометрии и небесной механики. На сегодняшний день предложено много космологических моделей в контексте теории Бранса–Дикке, поэтому вопрос их верификации оказывается актуальным.

В главе 5 определяются условия существования сферически-симметричных статичных решений, отличных от решения Шварцшильда. Получен предел слабого поля (описывающий большинство известных на сегодня движений, таких, например, как движение планет и спутников) в модели и показано, что он согласуется с результатом для классической формулировки теории Бранса–Дикке и с ОТО, ранее уже проверенных наблюдениями. Это также говорит об адекватности модели.

Для специфичных значений параметров модели получены два аналитических решения. Одно из них совпадает известным с решением Агнеше и Ла Камера [5], представляющим собой кротовую нору. Соответствующие значения параметров сохраняют член с потенциалом скалярного поля в действии, но эффективно убирают его из уравнений поля. Если принять, что потенциал играет роль космологической постоянной, можно заключить, что решение Агнеше и Ла Камера может представлять собой кротовую нору, вложенную в расширяющуюся вселенную, но не затронутую этим расширением. Это принципиальный результат, никак не связанный с малостью космологической постоянной. Поскольку для решения Агнеше и Ла Камера показано его соответствие наблюдательным данным на сегодняшнем уровне точности [10], наличие этого решения в модели говорит о возможности ее согласования с наблюдениями.

Второе решение получено в предположении, что метрика, которую мы

измеряем — Шварцшильдова. Соответствующее выражение для скалярного поля приводит к заключению, что эффективная гравитационная постоянная является убывающей функцией расстояния. Решение имеет ньютоновский предел (то есть движение можно описывать законом тяготения Ньютона) лишь в определенном интервале расстояний. Пространство асимптотически плоское, однако эффективная гравитационная постоянная исчезает на бесконечности, а не стремится к константе, как в классическом случае. Обсуждается вопрос наблюдаемости отклонений от ОТО в таком решении. Вывод состоит в том, что решение, по всей видимости, может соответствовать наблюдательным данным, так как метрика в точности соответствует метрике Шварцшильда.

Получены поправки к ньютоновскому гравитационному потенциалу решения Агнеше и Ла Камера и исследованы возможности их экспериментального обнаружения в наземных экспериментах и в относительном сдвиге частоты сигнала спутниковой системы Галилео. Вывод состоит в том, что точность сегодняшних наблюдений и экспериментов оказывается на 6 порядков ниже требуемой для обнаружения влияния поправок. Таким образом дополнительно подтверждается соответствие решения Агнеше и Ла Камера наблюдениям.

Получены ограничения на параметры модели: $\omega < 0$, $22.7 \lesssim \phi_0 \lesssim 25$. Для данных значений параметров в модели численно показано существование регулярного решения типа «кротовая нора». Структура решения на больших масштабах соответствует пространству де Ситтера, тогда как на малых масштабах структура решения соответствует кротовой норе. Таким образом модель может применяться как на астрономических, так и на космологических масштабах. При этом показано, что геометрия пространства-времени полученного решения может существенно отличаться от геометрии Шварцшильда: $\Delta_{num}/\Delta_{schw} \approx 1.471$ для значения параметра $\phi_0 = 23.5$. Однако решение также может имитировать решение Шварцшильда. Сделан вывод о возможности согласования решения с наблюдениями, однако во избежание противоречий необходимо наложить более строгие ограничения на параметры модели.

Показано, что условие положительно определенной кинетической энер-

гии скалярного поля $3\alpha^2/2 + \omega > 0$, предложенное Элизаде и др. не согласуется с ограничением, наложенным на ППН-параметры модели $|\omega|/\alpha^2 > 10^5$. Таким образом, астрономические наблюдения свидетельствуют о том, что скалярное поле модели имеет отрицательно определенную кинетическую энергию.

Сделан вывод, что модель [4] может быть согласована с наблюдательными данными астрономии, космологии и небесной механики.

В **Заключении** сформулированы Положения диссертации, выносимые на защиту и выводы, а также Благодарности.

В диссертации показано, что с помощью комбинации в исследовании методов космологии и небесной механики можно судить о релевантности расширенных теорий гравитации на различных масштабах, с позиций различных подходов и с использованием различных наборов данных. Такой подход к исследованию расширенных теорий позволяет проводить более всестороннее исследование, искать возможные наблюдательные проявления таких теорий и сравнивать их предсказываемые величины с наблюдательными данными, тем самым подвергая эти теории экспериментальной проверке.

Список литературы

- [1] В.Г. Турышев. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований. *Успехи физических наук*, 179(1), 2009.
- [2] Naresh Dadhich, Roy Maartens, Philippos Papadopoulos, and Vahid Rezanian. Black holes on the brane. *Phys.Lett.*, B487:1–6, 2000.
- [3] B. Bertotti, L. Iess, and P. Tortora. A test of general relativity using radio links with the cassini spacecraft. *Nature*, 425:374, 2003.
- [4] Emilio Elizalde, Shin'ichi Nojiri, and Sergei D. Odintsov. Late-time cosmology in (phantom) scalar-tensor theory: Dark energy and the cosmic speed-up. *Phys.Rev.*, D70:043539, 2004.

- [5] A.G. Agnese and M. La Camera. Schwarzschild metrics, quasi-universes and wormholes. In B.G. Sidharth and M.V. Altaisky, editors, *Frontiers of Fundamental Physics 4*, pages 197–205. Springer US, 2001.
- [6] Алексеев С.О., Памятных Е.А., Урсулов А.В., Третьякова Д.А., Ранну К.А. *Введение в общую теорию относительности. Ее современное развитие и приложения*. Издательство Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н.Ельцина Екатеринбург, РФ, 2015.
- [7] Alexander F. Zakharov. Constraints on a charge in the Reissner-Nordström metric for the black hole at the Galactic Center. *Phys.Rev.*, D90(6):062007, 2014.
- [8] K. Uehara and C.W. Kim. Brans-Dicke cosmology with the cosmological constant. *Phys. Rev. D*, 26:2575, 1982.
- [9] G. Hinshaw et al. Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results. *Astrophys.J.Suppl.*, 208:19, 2013.
- [10] S.O. Alexeyev, K.A. Rannu, and D.V. Gareeva. Possible observational manifestations of wormholes in the brans-dicke theory. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 113:628–636, 2011.