



На правах рукописи

Скворцова Милена Васильевна

ЭФФЕКТЫ СКАЛЯРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЯХ  
ГРАВИТАЦИИ И КОСМОЛОГИИ

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Учебно-научном институте гравитации и космологии Российского университета дружбы народов.

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. Бронников Кирилл Александрович, главный научный сотрудник Центра гравитации и фундаментальной метрологии ФГУП "ВНИИМС".

Официальные оппоненты:

д. ф.-м. н. Сушков Сергей Владимирович, заведующий кафедрой теории относительности и гравитации Института физики ФГАОУ ВПО "Казанский (Приволжский) федеральный университет";

д. ф.-м. н. Вернов Сергей Юрьевич, старший научный сотрудник отдела теоретической физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобелевца ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова».

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ".

Защита состоится " 8 " октября 2015 г. в \_\_\_\_\_ час. на заседании диссертационного совета Д 212.203.34 в Российском университете дружбы народов по адресу: 117923, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в УНИБЦ РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

к.ф.-м.н., доцент



В.А. Попова

# Эффекты скалярных полей в обобщенных моделях гравитации и космологии

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Необходимость изучения эффектов скалярных полей в различных моделях гравитации и космологии мотивирована несколькими причинами. С одной стороны, одной из центральных задач теоретической физики является построение объединенной теории всех известных фундаментальных физических взаимодействий (электромагнитного, слабого, сильного и гравитационного). Скалярные поля входят как неотъемлемая составная часть в большинство моделей, реализующих попытки такого объединения, прежде всего - в многомерные модели. При редукции многомерной теории к четырем наблюдаемым измерениям пространства-времени компоненты метрического тензора, отвечающие дополнительным измерениям, проявляются как скалярные поля с различными свойствами. Недавнее открытие бозона Хиггса подтверждает реальность существования скалярных полей в природе.

С другой стороны, скалярные поля используются в большинстве моделей, направленных на решение известной проблемы тёмной энергии в космологии (так называемые квинтэссенция, к-эссенция, фантомные скалярные поля и т.д.). Важной задачей является исследование влияния тёмной энергии на свойства астрофизических систем с сильными гравитационными полями, таких как нейтронные звёзды, чёрные дыры и (гипотетические) кротовые норы, изучение свойств которых может привести к новым наблюдательным тестам современных теорий. Условия существования и свойства кротовых нор, в том числе в присутствии магнитных полей, рассматриваются в данной диссертации. Одним из важных предсказаний большинства моделей объединения взаимодействий является переменность ряда фундаментальных физических констант (ФФК) - прежде всего, гравитационной постоянной  $G$ , скорости света  $c$ , постоянной Планка  $h$ , фундаментального заряда  $e$ , постоянной тонкой структуры  $\alpha$ , масс основных стабильных частиц — протона

( $m_p$ ) и электрона ( $m_e$ ) и их отношения  $\mu = m_p/m_e$  - в космологических масштабах времени и расстояний. Однако до настоящего времени с помощью экспериментов и наблюдений не выявлена переменность каких-либо ФФК, за одним исключением: проведенный в последние годы анализ спектров поглощения удаленных квазаров привел к выводу о временных и пространственных вариациях  $\alpha$ . Объяснению этого явления посвящен ряд теоретических работ последних трех лет. В данной диссертации вариации  $\alpha$  объясняются поведением эффективного скалярного поля многомерного происхождения.

Одна из принципиальных проблем физики черных дыр (ЧД) – существование сингулярности кривизны под горизонтом событий в известных решениях Шварцшильда, Райснера-Нордстрёма, Керра и других решениях ОТО и их аналогах в других метрических теориях гравитации. Для полного понимания геометрии и физики ЧД весьма желательно устранение сингулярностей, которое обычно связывается с надеждами на квантование гравитации. Однако большой интерес представляют и попытки построения моделей несингулярных ЧД в рамках классической теории гравитации, и в литературе описаны различные классы таких объектов. Один из таких классов сферически-симметричных, конфигураций, названный «черными вселенными», представляет, по-видимому, особый интерес, так как объединяет свойства кротовых нор (отсутствие центра и регулярный минимум площади координатных сфер), ЧД (горизонт Киллинга, разделяющий статическую и нестатическую области пространства-времени) и несингулярных космологических моделей (в нестатической области при больших временах достигается деситтеровский режим изотропного расширения). Материальным источником гравитации в ранее описанных моделях было фантомное скалярное поле. Возможность существования подобных полей в природе совместима с результатами современных космологических наблюдений, согласно которым ускоренное расширение нашей Вселенной может быть обусловлено доминирующей плотностью «темной энергии» с отношением давления к плотности меньше  $-1$ . В диссертации получены соответствующие модели с включением глобального магнитного поля.

## Степень разработанности темы

Условия существования кротовых нор в ОТО достаточно хорошо известны [?], тогда как в важнейших обобщениях ОТО - скалярно-тензорных теориях (СТТ) и  $f(R)$ -теориях — подобная ясность пока не достигнута, и появляются статьи с взаимно противоречивыми высказываниями по этому поводу. Например, в работе [?] утверждалось существование кротовых нор в СТТ Бранса-Дикке в интервале значений константы связи  $\omega$  между 0 и  $-3/2$ , что противоречит некоторым известным результатам. Подобные вопросы требуют дополнительных исследований.

Возможная переменность некоторых ФФК в космологических масштабах времени и расстояний обсуждается начиная с 30-х годов прошлого века, с работ Эддингтона и Дирака. Астрофизические наблюдения последнего времени свидетельствуют о временных и пространственных вариациях  $\alpha$ . Появились и теоретические работы, объясняющие такие вариации с помощью представлений об объединении взаимодействий, однако, в основном в таких работах вводятся скалярные поля с потенциалами, задаваемыми ad hoc. Более естественным подходом представляется получение подобных моделей из динамики дополнительных измерений пространства-времени. Достоинством таких моделей является единый подход к вариациям различных ФФК и естественное происхождение соответствующих потенциалов.

Среди различных видов несингулярных космологических моделей, обсуждаемых в литературе, представляют значительный интерес модели с так называемым световым большим взрывом, в которых расширение вселенной начинается не с сингулярности, а с горизонта Киллинга [?]. Во многих таких моделях По другую сторону от горизонта находится статическая область, аналогичная внешней области черной дыры. Условия возникновения "черных вселенных" и их свойства исследованы пока недостаточно, в частности, должны быть рассмотрены вопросы, связанные с их возможной глобальной причинной структурой и проявлениям в них крупномасштабных магнитных полей.

## Цель и задачи диссертации

Целью настоящей работы является теоретическое исследование ряда эффектов скалярных полей, включая возможные локальные проявления темной энергии и переменность фундаментальных физических констант в скалярно-тензорных и многомерной теориях гравитации. Соответствующие конкретные задачи:

1. Анализ противоречий в выводах работ различных авторов о существовании кротовонорных вакуумных решений в заведомо нефантомном интервале параметров теории Бранса-Дикке, в других СТТ, а также соответствующих решений  $F(R)$ -теории.
2. Поиск наиболее общих критериев существования глобальных кротовонорных вакуумных конфигураций в теории Бранса-Дикке, в обобщенной скалярно-тензорной теории гравитации и в  $F(R)$ -теориях с помощью сопоставления картин Эйнштейна и Йордана.
3. Обобщение известных регулярных решений ОТО в виде кротовых нор и черных вселенных с фантомными скалярными полями на возможное присутствие электрического или магнитного поля. Получение и анализ точных решений. Классификация получаемых геометрий по числу горизонтов Киллинга и характеру асимптотического поведения, исследование глобальной причинной структуры конфигураций с помощью диаграмм Картера-Пенроуза, построение карты решений в параметрическом пространстве "шварцшильдовская масса - заряд".
4. Построение космологических моделей в рамках многомерной теории гравитации, нелинейной по кривизне, для объяснения наблюдаемой переменности постоянной тонкой структуры. Анализ пространственных возмущений эффективного скалярного поля и метрики на временном интервале, близком к современной эпохе.

## Научная новизна

В диссертации получены следующие новые результаты:

1. Впервые установлено, что в скалярно-тензорных и  $f(R)$ -теориях гравитации вакуумные статические сферически-симметричные решения могут описывать кротовые норы либо если скалярное поле носит фантомный характер, либо если в некоторой части пространства-времени эффективная гравитационная постоянная отрицательна.
2. Доказано существование горловин в вакуумных статических сферически-симметричных решениях теории Бранса-Дикке при всех значениях константы связи  $\omega > -3/2$ , при которых не существует кротовых нор как глобальных конфигураций.
3. Получены точные статические сферически-симметричные решения ОТО с источниками гравитации в виде фантомного скалярного и электромагнитного полей. Дана классификация решений по числу и характеру горизонтов Киллинга и по виду асимптотического поведения. Все полученные решения регулярны и делятся на 10 классов, из которых шесть описывают кротовые норы и черные дыры с различными пространственным асимптотическим поведением. Другие четыре класса описывают так называемые чёрные вселенные, которые сочетают в себе свойства несингулярных космологических моделей, черных дыр и кротовых нор и в принципе пригодны для описания нашей Вселенной. Построены диаграммы Картера-Пенроуза для полученных решений с числом горизонтов от одного до четырех, а также карта решений в плоскости параметров  $m$  (масса) и  $q$  (электрический или магнитный заряд). Дана численная оценка минимального размера черной Вселенной, описываемой метрикой Кантовского-Сакса, при котором еще может быть справедливым максвелловское описание электромагнитного поля.
4. В рамках нелинейной по кривизне многомерной теории гравитации построены два варианта изотропных космологических моделей, приближенно описывающих современную ускоренно расширяющуюся Вселенную.

щуюся вселенную. Показано, что длинноволновые возмущения эффективного скалярного поля и метрического тензора изотропных моделей в состоянии объяснить наблюдаемые крупномасштабные пространственно-временные вариации постоянной тонкой структуры  $\alpha$  (так называемый “австралийский диполь”) в согласии с остальными данными космологических наблюдений.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Работа носит теоретический характер. Выяснение условий появления горловин и кротовых нор как глобальных объектов в скалярно-тензорных и  $f(R)$ -теориях гравитации полезны для общего понимания и оценки возможной реалистичности этих весьма интересных конфигураций искривленного пространства-времени. Построение новых решений типа регулярных чёрных дыр и черных вселенных существенно пополняет наши знания о разнообразии геометрических и причинных структур объектов, возможных в теории гравитации, и о типах космологических моделей, претендующих на описание нашей Вселенной. Полученные модели могут использоваться в качестве фона для анализа, с одной стороны, устойчивости статических областей этих сложных конфигураций и, с другой стороны, космологических возмущений их эволюционирующих областей для последующего сравнения с наблюдениями. Полученные космологические модели с переменностью постоянной тонкой структуры  $\alpha$  выявляют новые возможности объяснения космологических наблюдательных данных в рамках многомерных теорий гравитации.

Практическая значимость работы состоит в возможном включении некоторых ее результатов в университетские специальные курсы по теории гравитации и космологии.

### **Методология и методы исследования**

В процессе работы использованы современные методы аналитического и численного решения и исследования систем нелинейных дифференциальных уравнений, методы дифференциальной геометрии, компьютерные методы аналитических и численных расчетов. В частности, исполь-



зован метод обратной задачи при получении новых решений в виде кротовых нор и черных вселенных с магнитным полем. Наряду с редукцией дополнительных измерений, для получения космологических моделей нелинейной многомерной теории гравитации использовано предложенное Бронниковым и Рубиным весьма реалистичное приближение медленных (по сравнению с планковскими масштабами) изменений, существенно облегчающее решение поставленной задачи. Для объяснения пространственных вариаций  $\alpha$  применен метод возмущений на фоне однородной изотропной космологической модели.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Сформулированы необходимые условия существования кротовых нор как глобальных регулярных конфигураций с двумя плоскими асимптотиками, применимые к скалярно-тензорным и  $f(R)$ -теориям.
2. Доказана ошибочность заключений некоторых исследователей о существовании решений в виде кротовых нор в нефантомном интервале скалярных полей в теориях Бранса-Дикке, обобщенной скалярно-тензорной теории (СТТ) и  $f(R)$ -теории, в силу появления голых сингулярностей или неплоских асимптотических областей.
3. Доказано существование горловин в вакуумных статических сферически-симметричных решениях теории Бранса-Дикке при всех значениях константы связи  $\omega > -3/2$  (в нефантомном интервале). Этот результат представляет собой качественное отличие теории Бранса-Дикке от ОТО, в которую эта теория переходит в пределе  $\omega \rightarrow \infty$ .
4. В рамках ОТО с источниками гравитации в виде фантомного скалярного и электромагнитного полей, получены 10 классов регулярных статических сферически симметричных решений. Шесть из них представляют собой кротовые норы и черные дыры с различными пространственным асимптотическим поведением. Другие четыре класса — так называемые чёрные вселенные с различным числом горизонтов, которые сочетают в себе свойства несингулярных космологических моделей, черных дыр и кротовых нор и в принципе

пригодны для описания нашей Вселенной. Построены соответствующие диаграммы Картера-Пенроуза и карта решений в плоскости параметров  $m$  (масса) и  $q$  (электрический или магнитный заряд). Дана численная оценка минимального размера черной Вселенной, совместимого с максвелловским описанием электромагнитного поля.

5. В рамках нелинейной по кривизне многомерной теории гравитации построены два варианта изотропных космологических моделей, приближенно описывающих современную ускоренно расширяющуюся вселенную. Рассмотрены длинноволновые возмущения изотропных моделей, и с их помощью дано объяснение наблюдаемых крупномасштабных пространственных вариаций постоянной тонкой структуры (так называемый “австралийский диполь”).

### **Достоверность и апробация полученных результатов**

Обоснованность и достоверность полученных результатов следует из надежности использованных методов исследования, многократно испытанных в работах большого числа известных авторов. Кроме того, полученные решения и выводы проверены совпадениями с ранее известными решениями и выводами в предельных и частных случаях.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Учебно-научного института гравитации и космологии РУДН и следующих конференциях: международная конференция "Современные проблемы гравитации, космологии и релятивистской астрофизики RUDN-10, Москва, 28 июня - 3 июля 2010 г.; международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Москва, МИФИ, 12-16 ноября 2012 г.; международный научный семинар «Нелинейные поля и релятивистские статистические системы в теории гравитации и космологии», Казань, КФУ, 21–26 октября 2013 г.; 15-я Российская гравитационная конференция - международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике, Казань, 30 июня – 5 июля 2014 г.; XLVIII Всероссийская конференция по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники посвященная 100-летию профессора Терлецкого Я. П., Москва, РУДН,

15-18 мая 2012 г.; II Всероссийская конференция по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники, Москва, РУДН, 14-17 мая 2013 г.; L Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, Москва, РУДН, 13-16 мая 2014 г.

### **Личный вклад автора**

Автором самостоятельно проделаны все необходимые расчеты в процессе работы над темой диссертации, построены все диаграммы и карта решений уравнений гравитации, скалярного и электромагнитного полей на плоскости параметров задачи. Необходимо также отметить активное участие автора в обсуждении постановки каждой из решаемых задач и полученных результатов.

### **Публикации**

По материалам диссертационной работы имеется 11 публикаций, в том числе 4 в журналах из списка рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы. Общий объем составляет 97 страниц, включая 8 рисунков, 1 таблицы и библиографии из 97 наименований.

### **Основное содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, кратко описано текущее состояние исследований по теме диссертации, сформулирована цель работы и определены направления исследования, представлены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит в значительной степени методологический характер. Она посвящена точному выяснению условий существования кротовых нор в некоторых теориях гравитации, обобщающих ОТО. Проводится анализ вакуумных решений, заявленных в литературе как реше-

ния с кротовой норой, при значениях параметров, при которых, в силу известных общих теорем, кротовых нор быть не должно. Так, например, известно, что в теории Бранса-Дикке статические сферически-симметричные решения в виде кротовых нор имеют место во всём так называемом фантомном интервале значений константы связи  $\omega$  а именно при  $\omega < -3/2$  [?]. Подобное ограничение существует и в классе  $f(R)$ -теорий гравитации.

В некоторых статьях, однако, заявлено о существовании кротовых нор в заведомо “нефантомном” интервале теории Бранса-Дикке:

- с параметром  $\omega$  в интервале значений  $(-3/2, -4/3)$  [?],
- в ещё большем нефантомном интервале значений, включающем  $\omega = 0$  [?];

а также в  $f(R)$ -теории гравитации, которая эквивалентна частному случаю теории Бранса-Дикке с  $\omega = 0$  и ненулевым потенциалом скалярного поля [?].

С другой стороны, в [?] сделано утверждение о существовании вакуумных решений с КН в теории Бранса-Дикке при  $\omega < -2$ , но ничего не сказано о выпадающем из рассмотрения интервале  $-2 \leq \omega < -3/2$ .

В начале главы воспроизводится определение понятий кротовой норы и горловины и приведена теорема Бронникова-Старобинского о несуществовании статических кротовых нор с материальным источником, удовлетворяющим световому энергетическому условию, в классе теорий гравитации, допускающих конформное преобразование к теориям с лагранжианом типа ОТО. Так, при известном конформном преобразовании лагранжиан СТТ, соответствующий физической формулировке теории, (картине Йордана) переходит в лагранжиан типа ОТО с минимально связанным с гравитацией скалярным полем (картина Эйнштейна). Минимальная связь подразумевает, что полный лагранжиан системы сводится к сумме лагранжианов составляющих ее полей. Это конформное преобразование при условии положительности, гладкости и конечности значений функции неминимальной связи во всей области ее определения (включая ее возможные предельные значения) переводит плоскую пространственную асимптотику решения в картине Йордана в плоскую

асимптотику в картине Эйнштейна, а горизонт в горизонт. Следовательно, если кротовая нора существует в одной картине, она существует и в другой. Анализ указанных решений строится на очевидном противоречии выводов, сделанных авторами цитированных статей, тому факту, что в картине Эйнштейна отсутствует экзотическая материя, нарушающая световое энергетическое условие.

В процессе анализа сформулирован общий вывод о том, что в скалярно-тензорных и  $f(R)$ -теориях гравитации вакуумные статические сферически-симметричные решения могут описывать кротовые норы либо если скалярное поле носит фантомный характер, либо если в некоторой части пространства-времени эффективная гравитационная постоянная отрицательна. Кроме того, исследовано поведение вакуумных статических сферически-симметричных решений теории Бранса-Дикке в удобной параметризации [?] при тех значениях константы связи  $\omega$ , при которых не существует кротовых нор как глобальных конфигураций, и доказано существование горловин при всех  $\omega > -3/2$ , даже сколь угодно больших.

**Вторая глава** посвящена получению и исследованию сферически-симметричных решений уравнений ОТО с источниками в виде электромагнитного поля и фантомного скалярного поля с ненулевым потенциалом. Ранее полученные [?, ?] аналогичные решения без электромагнитного поля описывают кротовые норы с плоскими и антидеситтеровскими асимптотиками, а также черные вселенные. Здесь, также принимая существование фантомного скалярного поля как рабочую гипотезу, мы включаем и электромагнитное в качестве источника гравитации. В рассматриваемой симметрии допустимы лишь радиальное (кулоновское) электрическое и радиальное магнитное (монопольное) поля. Следует подчеркнуть, что в системах типа кротовых нор и чёрных вселенных нет необходимости предполагать существование магнитных зарядов (монополь); в обоих случаях монопольное магнитное поле может существовать без источника благодаря специфической геометрии пространства-времени. В случае с кротовыми норами такая геометрия прекрасно согласуется с идеей Уилера “заряда без заряда” [?]: электрические или магнитные силовые линии попросту пронизывают кротовую нору. В случае же черной вселенной ситуация различна с различных сторон по обе стороны

горизонта Киллинга: в статической области наблюдатель видит черную дыру с электрическим или магнитным зарядом; в космологической области — однородное первичное электрическое или магнитное поле. Для определенности рассматривается магнитное поле, так как для этого есть определенные наблюдательные основания. В самом деле, современные наблюдения свидетельствуют о возможном существовании глобального магнитного поля напряженностью до  $10^{-15}$  Гс, вызывающим корреляцию ориентаций далеких друг от друга источников [?]. Рядом авторов отмечается возможная первичная природа такого магнитного поля.

Другим наблюдательным основанием для рассмотрения подобных моделей являются имеющиеся указания на пространственную анизотропию Вселенной, а именно, так называемый “австралийский диполь” в распределении малых вариаций постоянной тонкой структуры  $\alpha$  на небесной сфере [?] (см. далее содержание главы 3)) и согласующаяся с этими наблюдениями анизотропия дипольного типа в распределении темной энергии [?]. Все это делает актуальными космологические модели, содержащие выделенные направления, подобные космологии Кантовского-Сакса, фигурирующей в моделях черных вселенных. В разделе 2.2 приводятся основные уравнения и наблюдения общего характера. В разделе 2.3 проводится интегрирование уравнений поля с использованием метода обратной задачи: вместо задания потенциала скалярного поля  $V(\phi)$  выбирается конкретный вид одной из метрических функций, а именно — сферического радиуса  $r$  как функции квазиглобальной координаты  $u$  (т.е. координаты, отвечающей “калибровке”  $g_{tt}g_{uu} = -1$ ). Функция  $r(u)$  выбирается в простейшем виде, совместимом с присутствием фантомного скалярного поля,  $r(u) = \sqrt{u^2 + b^2} = b\sqrt{x^2 + 1}$ , где  $x = u/b$ ,  $b > 0$  — произвольная постоянная (масштаб длины). Метрика имеет общий вид

$$ds^2 = A(u)dt^2 - \frac{du^2}{A(u)} - r^2(u)d\Omega^2, \quad (1)$$

где  $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$  — линейный элемент на единичной сфере. Интегрирование уравнений приводит к нахождению метрической функции  $A(u)$ , скалярного поля  $\phi$  и потенциала  $V(\phi)$ ; магнитное поле, характеризуемое компонентой  $F_{23}$  тензора Максвелла, имеет напряженность  $\vec{B}$  такую, что  $\vec{B}^2 = F_{23}F^{23} = q^2/r^4$  (напомним, что в рассматриваемых

геометриях это не означает существования магнитных монополей). Наибольший интерес представляет поведение функции  $A(u)$  (или, эквивалентно,  $B(u) = A(u)/r^2$ , регулярные нули которой отвечают горизонтам Киллинга.

Разделы 2.4 и 2.5 посвящены обсуждению полученных решений. Все они регулярны, а их классификация решений по числу и характеру горизонтов Киллинга и по виду асимптотического поведения (асимптотики Минковского, де Ситтера и анти-де Ситтера) выявляет 10 классов, из которых шесть описывают кротовые норы и регулярные черные дыры с различными асимптотиками, а другие четыре описывают чёрные вселенные. Различные типы асимптотически плоских при  $x \rightarrow \infty$  регулярных конфигураций с неотрицательной Шварцшильдской массой перечислены в таблице.

Таблица 1: Типы асимптотически плоских решений с  $m > 0$

Тип конфигурации, асимптотики ( $x \rightarrow +\infty$ ) – ( $x \rightarrow -\infty$ )	Горизонты: число, порядок $n$ , [последовательность R- и T-областей]
М - М кротовая нора	ни одного горизонта [R]
М - М экстремальная черная дыра	1 гор., $n = 2$ [RR]
М - М черная дыра	2 гор., $n = 1$ [RTR]
М - dS черная вселенная	1 гор., $n = 1$ [TR]
М - dS черная вселенная	2 гор., $n = 2$ и $n = 1$ [TTR]
М - dS черная вселенная	2 гор., $n = 1$ и $n = 2$ [TRR]
М - dS черная вселенная	3 гор., $n = 1$ , [TRTR]
М - AdS черная дыра	2 гор., $n = 1$ [RTR]
М - AdS экстремальная черная дыра	1 гор., $n = 2$ [RR]
М - AdS кротовая нора	горизонтов нет [R]

Построены диаграммы Картера-Пенроуза для полученных решений с числом горизонтов от одного до четырех (см. пример графиков функции  $B(x)$  и диаграмм для черных вселенных с тремя горизонтами, на рис. 1), а также карта решений в плоскости параметров  $m$  (шварцшильдская масса) и  $q$  (рис. 2).

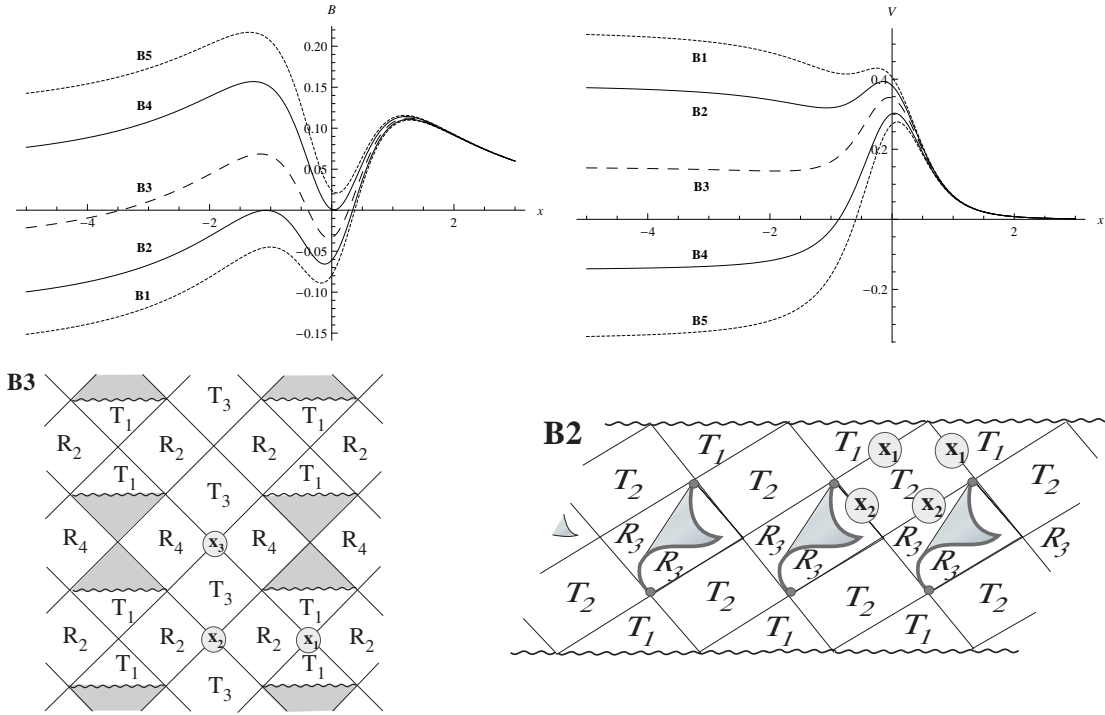


Рис. 1: График функции  $B(x)$  (вверху, слева) и потенциала  $V(x)$  (вверху, справа) для асимметричной конфигурации при значениях параметров, близких к критическим:  $m = 0.725$  и  $q = 0.821, 0.8242, 0.829, 0.835, 0.839$  для кривых B1–B5, соответственно. На соответствующих диаграммах Картера-Пенроуза литерами R и T обозначены R- и T-области, соответственно, индексы при R и T нумеруют слева направо интервалы, на которых функция  $B(x)$  сохраняет знак вдоль оси  $x$ . в свою очередь, символы  $x_n$  нумеруют горизонты (нули функции  $B(x)$ ), также слева направо:  $x_1 < x_2 < \dots$ . Диаграмма, соответствующая решению B3, занимает всю плоскость за исключением серых треугольников. Диаграмма для кривой B2 не может быть изображена на плоскости, поскольку имеет перекрывающиеся области, как показано на рисунке область  $R_3$ , изображенная под отогнутым листом имеет плоскую пространственную бесконечность ( $x \rightarrow \infty$ ) справа, в то время как область  $R_3$ , изображенная в виде отогнутого листа, имеет таковую слева.

В разделе 2.5 даны численные оценки напряженности первичного магнитного поля в разные эпохи космологической эволюции. В частности, получена численная оценка минимального размера черной Вселенной, описываемой метрикой Кантовского-Сакса, при котором еще может быть справедливым максвелловское описание электромагнитного поля. Согласно оценке Амбьорна и Олесена [?], при напряженности магнитного поля  $B \gtrsim 10^{24}$  Гс возникает нестабильность электрослабого взаимо-



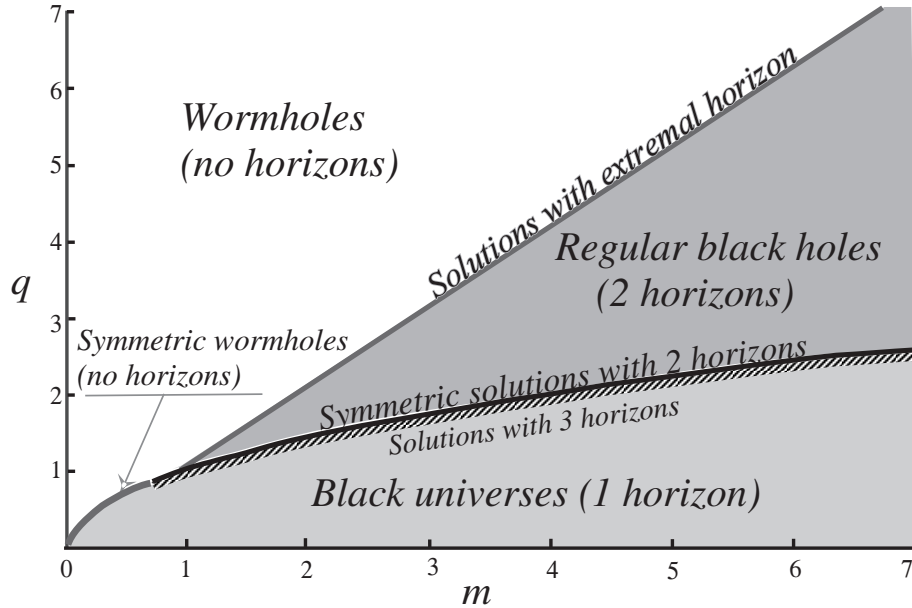


Рис. 2: Карта асимптотически плоских решений с массой  $m > 0$ . Симметричные решения с двумя горизонтами образуют линию (сепаратрису), ниже которой располагается весьма узкая, но конечной ширины полоса, соответствующая решениям с тремя горизонтами. Еще ниже расположена линия решений с простым и двойным горизонтами (типа В2) и далее область черных вселенных с одним горизонтом.

действия в модели Вайнберга-Салама, связанная с появлением тахионных мод. Принимая  $|\vec{B}| \sim 10^{-18}$  Гс в качестве современного значения напряженности глобального магнитного поля Вселенной, получаем, что его максимально возможная напряженность соответствует минимальному радиусу  $r \approx 10^7$  см = 100 км — такую величину мы можем принять как параметр модели  $b = \min r(u)$ .

**Третья глава** посвящена исследованию двух видов изотропных космологических моделей многомерной нелинейной по кривизне теории гравитации и их длинноволновых неоднородных возмущений. Цель исследования — объяснение пространственно-временной переменности постоянной тонкой структуры  $\alpha$  в соответствии с наблюдательными данными 2010–2013 годов [?]. Для построения и анализа моделей используется развитая в [?] методика перехода от широкого класса многомерных теорий гравитации с высшими производными к эйнштейновской теории с эффективными скалярными полями в приближении медленных (по сравнению с планковскими масштабами) изменений. Эта методика ранее успешно

применялась для единого описания фазы ранней инфляции и современного ускоренного расширения Вселенной [?]; она также приводит к возможному объяснению происхождения поля Хиггса и намечает пути решения других физических и космологических проблем [?, ?, ?].

Накопленные к настоящему времени данные экспериментов и наблюдений не свидетельствуют об уверенном обнаружении каких-либо вариаций ФФК, имеются лишь различные ограничения на возможную величину таких вариаций см., напр., обзор [?] и приведенные там ссылки. Такие ограничения, естественно, приводят к появлению условий на параметры различных теоретических моделей (в первую очередь космологических), предсказывающих вариации ФФК. Единственное известное исключение из этой общей ситуации связано с постоянной тонкой структуры  $\alpha$ , о временных и пространственных вариациях которой свидетельствует анализ многочисленных спектров поглощения удаленных квазаров [?]. Распределение вариаций по небесной сфере носит дипольный характер (так называемый «австралийский диполь»). Направление оси диполя на небесной сфере — склонение  $-61 \pm 9$  градусов и прямое восхождение  $17,3 \pm 0,6$  часа. Отклонения наблюдаемых значений  $\alpha$  от ее измеренного на Земле современного значения  $\alpha_0$  описываются формулой

$$\delta\alpha/\alpha_0 = (1,10 \pm 0,25) \times 10^{-6} \cos\psi, \quad (2)$$

где  $\psi$  — угол между осью диполя и направлением измерения и  $r$  — расстояние от Солнечной системы, измеряемое в миллиардах световых лет. Достоверность этого результата оценена авторами [?] как  $4,1\sigma$ . В пересчете на  $\dot{\alpha}/\alpha_0$  амплитуда изменений имеет порядок  $10^{-15}$  в год. В последующие годы появился ряд теоретических исследований, направленных на объяснение «австралийского диполя».

С другой стороны, из лабораторных экспериментов известно [?, ?], что в современную эпоху возможный темп изменений константы  $\alpha$  ограничен уровнем  $10^{-17}$  в год. Это ограничение с определенной уверенностью можно экстраполировать в прошлое приблизительно на 2 миллиарда лет, опираясь на анализ так называемого явления Окло — естественного ядерного реактора, функционировавшего примерно  $2 \times 10^9$  лет назад в области Окло (Габон, Африка) [?, ?].

Очевидно, задачей теории является объяснение как относительно

больших вариаций величины  $\alpha$  в космологических масштабах, так и ее практического постоянства на Земле в последние 2 миллиарда лет.

В большинстве попыток теоретического описания временных и пространственных вариаций величины  $\alpha$  используются скалярные поля, вводимые в теорию *ad hoc* [?, ?, ?, ?, ?, ?, ?]. В наших работах, включая данную, реализуется, по-видимому, более последовательный подход, в котором эффективные скалярные поля в наблюдаемом пространстве возникают из компонент метрики дополнительных измерений. Эти поля взаимодействуют с электромагнитным полем, что и обуславливает переменность электромагнитной константы связи — постоянной тонкой структуры  $\alpha$ .

Отправным пунктом исследования является достаточно общая нелинейная по кривизне теория гравитации с действием

$$S = \frac{1}{2} m_D^{D-2} \int \sqrt{|^D g|} d^D x (L_g + L_m),$$

$$L_g = F(R) + c_1 R^{AB} R_{AB} + c_2 \mathcal{K}, \quad (3)$$

где  $F(R)$  — некоторая гладкая функция  $D$ -мерной скалярной кривизны  $R$ ,  $\mathcal{K} = R^{ABCD} R_{ABCD}$  — скаляр Кречмана,  $c_1$  и  $c_2$  — константы,  $L_m$  — лагранжиан материи и  $^D g = |\det(g_{MN})|$ .

$(D = 4 + d_1)$ -мерная метрика предполагается в виде

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + e^{2\beta(x)} b_{ab} dx^a dx^b \quad (4)$$

где  $b_{ab}$  не зависят от координат  $x^\mu$  наблюдаемого пространства-времени.

Для построения космологических моделей предпринимаются следующие шаги:

(а) предполагается медленное изменение всех величин в планковском масштабе, т.е. все производные по координатам считаются малыми, и отбрасываются величины, содержащие суперпозицию более двух операторов дифференцирования;

(б) проводится редукция теории к 4 измерениям; теория принимает вид, характерный для скалярно-тензорной теории в картине Йордана;

(в) с помощью стандартного конформного отображения осуществляется переход от картины Йордана к картине Эйнштейна, в которой скалярные поля минимально связаны с кривизной, что упрощает исследование их динамики.

Далее проводится сравнительный анализ двух вариантов моделей с различным видом функции  $D$ -мерной скалярной кривизны  $F(R)$  в действии (??):

Модель 1 с  $F(R) = -2\Lambda + R^2$ , где  $\Lambda$  —  $D$ -мерная космологическая постоянная, и

Модель 2, в которой  $F(R) = R^2$ .

Обе модели анализируются в двух физических картинах, Йордана и Эйнштейна.

В разделе 3.1 излагаются постановка задачи и основные положения теории. В разделах 3.2 и 3.3 сопоставляется поведение космологического и внутреннего масштабных факторов дополнительных измерений в модели 1. Показано, что модель 1 способна описывать наблюдаемую ускоренно расширяющуюся Вселенной только в картине Эйнштейна. В картине Йордана эволюция масштабного фактора заканчивается Большим разрывом, а параметр уравнения состояния материи  $w$  оказывается значительно меньше  $-1$ , что противоречит наблюдениям.

В разделах 3.4 и 3.5 показано, что модель 2 пригодна для описания современной Вселенной в обеих конформных картинах. Однако в картине Йордана предсказываются вариации гравитационной постоянной  $G$  по тому же закону, по которому меняется  $\alpha$ . Величина вариаций  $G$  укладывается в наблюдаемые на сегодняшний день ограничения.

В разделе 3.6 рассматриваются свойства моделей 1 и 2 в присутствии длинноволновых возмущений скалярного поля и метрики с одним выделенным направлением. Малые вариации постоянной тонкой структуры  $\alpha$  вдоль оси “Австралийского диполя” выражаются линейной зависимостью от одной из пространственных координат. Требование нулевой вариации  $\alpha$  в настоящий момент в точке наблюдения  $x = 0$  выполняется за счет выбора начальных данных в уравнениях для возмущений. В силу конформной инвариантности электромагнитного поля выражения для вариаций постоянной тонкой структуры в конформных картинах Эйнштейна и Йордана имеют аналогичный вид. Однако в картине Йордана, как уже отмечалось, вариации того же порядка, что и  $\alpha$ , будет испытывать и гравитационная постоянная  $G$ . Это обстоятельство в дальнейшем может послужить решению вопроса о том, какая из конформных картин соответствует наблюдениям.

В Заключении сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Bronnikov K. A., Skvortsova M. V., Starobinsky A. A. Notes on wormhole existence in scalar-tensor and  $F(R)$  gravity // Gravitation and Cosmology. — 2010. — V. 16. — P. 216–222. — Доп. доступ: [arxiv.org/abs/1005.3262](http://arxiv.org/abs/1005.3262).
2. Bolokhov S. V., Bronnikov K. A., Skvortsova M. V. Magnetic black universes and wormholes with a phantom scalar // Classical and Quantum Gravity. — 2012. — V. 29. — No. 245006. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1208.4619](http://arXiv.org/abs/1208.4619).
3. Bronnikov K. A., Skvortsova M. V. Variations of  $\alpha$  and  $G$  from nonlinear multidimensional gravity // Gravitation and Cosmology. — 2013. — V. 19, 2. — P. 114–123. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1312.7721](http://arXiv.org/abs/1312.7721).
4. Bronnikov K. A., Skvortsova M. V. Cylindrically and axially symmetric wormholes. Throats in vacuum? // Gravitation and Cosmology. — 2014. — V. 20 — P. 171-175. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1404.5750](http://arXiv.org/abs/1404.5750).
5. Bronnikov K. A., Skvortsova M. V., Starobinsky A.A. Notes on wormhole existence in scalar-tensor and  $F(R)$  gravity // Тезисы докладов международной конференции “Современные проблемы гравитации, космологии и релятивистской астрофизики“, RUDN-10 (28 июня - 3 июля 2010 г.). — М.: РУДН, 2010. — С. 80.
6. Болохов С. В., Бронников К. А., Скворцова М. В. Кротовые норы и магнитные вселенные // Тезисы докладов международной сессии-конференции, Секции ЯФ ОФН РАН, «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, 12-16 ноября 2012 г.). — М.: МИФИ, 2012. — С. 40.

7. Болохов С. В., Бронников К. А., Скворцова М. В. Магнитные черные вселенные // Тезисы докладов XLVIII Всероссийской конференции по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники посвященная 100-летию профессора Терлецкого Я. П. (Москва, 15-18 мая 2012 г.). — М.: РУДН, 2012.
8. Bronnikov K. A., Skvortsova M. V. Variations of the fine structure constant and gravitational constant from nonlinear multidimensional gravity // Тезисы докладов II Всероссийской конференции по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники (Москва, 14-17 мая 2013 г.). — М.: РУДН, 2013.
9. Bronnikov K. A., Skvortsova M. V. Variations of the fine structure constant and the gravitational constant from nonlinear multidimensional gravity // Тезисы докладов международного научного семинара «Нелинейные поля и релятивистские статистические системы в теории гравитации и космологии» / Российская школа «Математическое и компьютерное моделирование фундаментальных объектов и явлений» (Казань, 21–26 октября 2013 г.). — К.: КФУ, 2013.
10. Bronnikov K. A., Skvortsova M. V. Cylindrically and axially symmetric wormholes. Throats in vacuum? // Тезисы докладов L Всероссийской конференции по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники (Москва, 13-16 мая 2014 г.). — М.: РУДН, 2014. — С. 14.
11. Bolokhov S. V., Bronnikov K. A., Skvortsova M.V. Magnetic black universes and wormholes with a phantom scalar // Тезисы докладов 15-ой Российской гравитационной конференции – Международной конференции по гравитации, космологии и астрофизике (Казань, 30 июня–5 июля 2014 г.). — К.: Фолиант, 2014. — С. 153-154.

## Список литературы

- [1] Hochberg D., Visser M. Geometric structure of the generic static traversable wormhole throat // Physical Review D. — 1997. — V. 56. — No. 4745. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/gr-qc/9704082](http://arXiv.org/abs/gr-qc/9704082).

- [2] Lobo F. S. N., Oliveira M. A. General class of vacuum Brans-Dicke wormholes // Physical Review D. — 2010. — V. 81. — No. 067501. . — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1001.0995](http://arXiv.org/abs/1001.0995).
- [3] Bronnikov K. A., Fabris J. C. Regular phantom black holes // Physical Review Letters. — 2006. — V. 96 — No. 251101. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/gr-qc/0511109](http://arXiv.org/abs/gr-qc/0511109).
- [4] Bronnikov K. A. Scalar vacuum structure in general relativity and alternative theories. Conformal continuations // Acta Physica Polonica B. — 2001. — V. 32. — No. 3571. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/gr-qc/0110125](http://arXiv.org/abs/gr-qc/0110125).
- [5] Bhattacharia A., Nigmatzyanov I., Izmailov R., Nandi K. K. Brans-Dicke Wormhole Revisited // Classical and Quantum Gravity. — 2009. — V. 26. — No. 235017. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/0910.1109](http://arXiv.org/abs/0910.1109).
- [6] Lobo F. S. N., Oliveira M. A. Wormhole geometries in  $f(R)$  modified theories of gravity // Physical Review D. — 2009. — V. 80. — No. 104012. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/0909.5539](http://arXiv.org/abs/0909.5539).
- [7] Bronnikov K. A., Melnikov V. N., Dehnen H. Regular black holes and black universes // General Relativity and Gravitation. — 2007. — V. 39. — No. 973. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/gr-qc/0611022](http://arXiv.org/abs/gr-qc/0611022).
- [8] Wheeler J. A. Geons // Physical Review. — 1955. — V. 97. — No. 511.
- [9] Poltis R., Stojkovic D. Can primordial magnetic fields seeded by electroweak strings cause an alignment of quasar axes on cosmological scales? // Physical Review Letters. — 2010. — V. 105. — No. 16301. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1004.2704](http://arXiv.org/abs/1004.2704).
- [10] Webb J. K. [et al.] Evidence for spatial variation of the fine structure constant // Physical Review Letters. — 2011. — V. 107. — No. 191101. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1008.3907](http://arXiv.org/abs/1008.3907).
- [11] Mariano A., Perivolaropoulos L. Is there correlation between Fine Structure and Dark Energy Cosmic Dipoles? // Physical Review D. — 2011. — V. 86. — No. 083517. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1206.4055](http://arXiv.org/abs/1206.4055).

- [12] Ambjorn J., Olesen P. On electroweak magnetism // Nuclear Physics B. — 1989. — V. 315. — No. 606.
- [13] Bronnikov K. A., Rubin S. G. Self-stabilization of extra dimensions // Physical Review D. — 2006. — V. 73. — No. 124019.
- [14] Bronnikov K. A., Rubin S. G., Svadkovsky I. V. Multidimensional world, inflation and modern acceleration // Physical Review D. — 2010. — V. 81. — No. 084010.
- [15] Rubin S. G., Zinger A. S. The Universe formation by a space reduction cascade with random initial parameters // General Relativity and Gravitation. — 2012. — V. 44. — No. 2283. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1101.1274](http://arXiv.org/abs/1101.1274).
- [16] Bolokhov S. V., Bronnikov K. A., Rubin S. G. Extra dimensions as a source of the electroweak model // Physical Review D. — 2011. — V. 84. — No. 044015.
- [17] Bronnikov Kirill A., Rubin Sergey G. Black Holes, Cosmology and Extra Dimensions. — Singapore: World Scientific, 2012. — 444 p. — ISBN-13: 978-9814374200. — ISBN-10: 9814374202.
- [18] Uzan J.-P. Varying constants, gravitation and cosmology [Электронный ресурс] // Cornell University Library. — 2010. — URL: <http://arxiv.org/abs/1009.5514>.
- [19] Godun R. M. [et al.] Frequency ratio of two optical clock transitions in  $^{171}\text{Yb}^+$  and constraints on the time variation of fundamental constants [Электронный ресурс] // Cornell University Library. — 2014. — URL: <http://arxiv.org/abs/1407.0164>.
- [20] Rosenband T. [et al.] Observation of the  $1S_0 \rightarrow 3P_0$  clock transition in  $^{27}\text{Al}^+$  // Physical Review Letters. — 2007. — V. 98. — No. 220801.
- [21] Shlyakhter A. I. Direct test of the constancy of fundamental nuclear constants // Nature. — 1976. — V. 260. — No. 340.
- [22] Fujii Y. [et al.] The nuclear interaction at Oklo 2 billion years ago // Nuclear Physics B. — 2000. — V. 573. — P. 377 — 401.



- [23] Chiba T., Yamaguchi M. Runaway domain wall and space-time varying  $\alpha$  // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2011. — V. 1103. — No. 44. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1102.0105](http://arXiv.org/abs/1102.0105).
- [24] Olive K. A., Peloso M., Uzan J.-P. The wall of fundamental constants // Physical Review D. — 2011. — V. 83. — No. 043509. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1011.1504](http://arXiv.org/abs/1011.1504).
- [25] Olive K. A., Peloso M., Peterson A. J. Where are the walls? // Physical Review D. — 2011. — V. 86. — No. 043501. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1204.4391](http://arXiv.org/abs/1204.4391).
- [26] Barrow J. D., Lip S. Z. W. A generalized theory of varying alpha // Physical Review D. — 2012. — V. 85. — No. 023514.
- [27] Mariano A., Perivolaropoulos L. CMB maximum temperature asymmetry axis: alignment with other cosmic asymmetries // Physical Review D. — 2011. — V. 87. — No. 043511. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1211.5915](http://arXiv.org/abs/1211.5915).
- [28] Bamba K., Nojiri S., Odintsov S. D. Domain wall solution in  $F(R)$  gravity and variation of the fine structure constant // Physical Review D. — 2011. — V. 85. — No. 044012. — Доп. доступ: [arXiv.org/abs/1107.2538](http://arXiv.org/abs/1107.2538).

Аннотация

**Эффекты скалярных полей в обобщенных моделях гравитации и космологии**  
Исследованы свойства конфигураций со скалярными полями в ОТО и некоторых ее обобщениях. В частности, доказано существование горловин в решениях теории Бранса-Дикке при всех значениях константы связи  $\omega > -3/2$ , при которых кротовых нор как глобальных конфигураций не существует. Получены точные статические сферически-симметричные решения ОТО с источниками гравитации в виде фантомного скалярного и электромагнитного полей, дана их классификация по числу и характеру горизонтов Киллинга и по виду асимптотического поведения. Часть решений описывают кротовые норы, другая часть - регулярные черные дыры с числом горизонтов от одного до четырех, в частности, "чёрные вселенные" т.е. регулярные черные дыры с расширяющейся вселенной под горизонтом. Построены соответствующие диаграммы Картера-Пенроуза и карта решений в плоскости параметров масса - электрический или магнитный заряд. В рамках нелинейной по кривизне многомерной теории гравитации построены два варианта изотропных космологических моделей, приближенно описывающих современную ускоренно расширяющуюся вселенную. Показано, что длинноволновые возмущения эффективного скалярного поля и метрического тензора многомерного происхождения в этих моделях в состоянии объяснить наблюдаемые (согласно ряду публикаций) крупномасштабные пространственно-временные вариации постоянной тонкой структуры  $\alpha$  (так называемый "австралийский диполь") в согласии с остальными данными космологических наблюдений.

Abstract

**Effects of scalar fields in generalized models of gravitation and cosmology**

The properties of configurations with scalar fields are studied in the framework of general relativity and some of its generalizations. It has been shown, in particular, that throats exist in the Brans-Dicke theory at all values of the coupling constant  $\omega > -3/2$ , at which wormholes as global configurations do not exist. Exact static, spherically symmetric solutions of general relativity have been obtained with sources in the form of phantom scalar and electromagnetic fields. The solutions are classified by the number and nature of Killing horizons and the forms of asymptotic behavior. Some of the solutions describe wormholes, others - regular black holes with the number of horizons from one to four, in particular, "black universes" i.e., regular black holes with an expanding universe beyond the horizon. The corresponding Carter-Penrose diagrams are built as well as a map of solutions on the mass - electric (or magnetic) charge parameter plane. In the framework of a curvature-nonlinear multidimensional theory of gravity, two kinds of isotropic cosmological models have been built, which approximately describe the present-day Universe with its accelerated expansion. It has been shown that long-wave perturbations of the effective scalar field of multidimensional origin in these models can explain the observed (according to some publications) large-scale variations of the fine structure constant  $\alpha$  (the so-called "Australia dipole") in agreement with other cosmological observational data.