

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



**Богуш Игорь Андреевич**

**Ультракомпактные объекты в скалярно-тензорных  
теориях гравитации, мотивированных теорией струн**

Специальность 1.3.3. — «Теоретическая физика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

**Научный руководитель** – **Гальцов Дмитрий Владимирович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты** – **Бронников Кирилл Александрович**,  
доктор физико-математических наук,  
Центр гравитации и фундаментальной  
метеорологии ФГБУ «ВНИИМС»,  
главный научный сотрудник

**Катанаев Михаил Орионович**,  
доктор физико-математических наук,  
ФГБУН «Математический институт  
имени В. А. Стеклова РАН»,  
ведущий научный сотрудник

**Ахмедов Эмиль Тофик оглы**,  
доктор физико-математических наук,  
доцент,  
ФГАОУ ВО «МФТИ», кафедра теоретической  
физики,  
заведующий

Защита диссертации состоится 22 декабря 2022 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета МГУ.011.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 2, физический факультет, физическая ауд. им. Р.В. Хохлова.

E-mail: ff.dissovet@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/508695500/>

Автореферат разослан «    » ноября 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

П. А. Поляков

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Общая теория относительности (ОТО) [1; 2] уже более века является отправной точкой в фундаментальных исследованиях по гравитации. Проверке ОТО были посвящены многочисленные наблюдения и эксперименты [3]. Экспериментальные подтверждения ОТО можно разделить на две группы: эксперименты в земных или околоземных условиях, а также наблюдения за ближним и дальним космосом. Наиболее значимыми эффектами, которые подтверждают правильность ОТО являются: гравитационное замедление времени, задержка сигнала (эффект Шапиро), гравитационное красное смещение, гравитационное отклонение света, геодезическая прецессия и прецессия перигелия, увлечение инерциальных систем вращающимися телами. Кроме того, наблюдения за бинарными системами косвенно подтверждают существование гравитационных волн. Апофеозом стала прямая регистрация гравитационных волн наземными средствами [4]. С недавнего времени, научному сообществу стало доступно и прямое наблюдение за ультракомпактными объектами (УКО) с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой [5; 6]. Последние два типа наблюдений позволяют приблизиться к разгадке самых смелых предсказаний ОТО – существование черных дыр и гравитационных волн.

Несмотря на большой массив данных, подтверждающих ОТО, существует и ряд нерешенных проблем: построение теории квантовой гравитации, проблемы причинности и сингулярностей, проблемы кривых вращения галактик и ускоренного расширения Вселенной, приводящие к концепциям темной материи и темной энергии, и др. Кроме того, экспериментальное обнаружение бозона Хиггса актуализирует вопрос поиска теории великого объединения взаимодействий, включающей гравитацию, а также выяснение существования фундаментальных скалярных полей.

В поиске альтернатив общей теории относительности возникли скалярно-тензорные теории гравитации [7–10]. Особую популярность получили подходы, основанные на теории суперструн, включающей модели супергравитации и теории Калуцы-Клейна. Со скалярно-тензорными теориями также связаны теории с неминимальной связью [11] и теории с кручением [12; 13]. В зависимости от способа перехода к низкоэнергетическому пределу и редукции к низшим размерностям, а также выбора типа струн и способа усечения этих теорий, можно получить целую плеяду эффективных теорий, бозонный сектор которых включает некоторый набор скалярных и векторных полей.

**Целью** данной работы является исследование моделей эйнштейновской гравитации с набором скалярных и абелевых векторных полей, мотивированных теорией струн, исследование ультракомпактных объектов, существующих в таких моделях, а также обобщение и развитие

математического аппарата и инструментов как на случай рассматриваемых моделей, так и выходящих за их рамки.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Сгенерировать ряд новых решений для изучаемых моделей, а именно: сингулярные дионные решения с параметром Ньюмена-Унти-Тамбурино (НУТ) без вращения и скалярными волосами в модели Эйнштейна-Максвелла с дилатоном и  $\alpha = \sqrt{3}$  (КК ЭМД), вращающиеся обобщения и аналоги решения ФЯНВ в скалярно-тензорной теории, заряженные сингулярные Фишер-браны, а также различные деформированные альтернативы.
2. Изучить физические свойства сгенерированных решений, в том числе движение частиц вдоль геодезических, построить классификацию решений по наличию горизонтов событий и сингулярностей в ЭМД, для Фишер-бран изучить поведение пробного скалярного поля в окрестности сингулярности.
3. Обобщить формулу Смарра на максимально широкий класс рассматриваемых моделей с помощью подхода Комара-Томиматсу.
4. Изучить решения Богомольного-Прасада-Соммерфельда (БПС) среди сгенерированных Фишер-бран, а также построить методологию получения ограничений на БПС-состояния в ЭМД с произвольной дилатонной константой.
5. Построить релятивистские изображения и тени УКО для сгенерированных вращающихся решений в ЭМС и провести их анализ в контексте данных, полученных с помощью Event Horizon Telescope (ЕНТ).
6. Получить условия интегрируемости для генерации конформного тензора Киллинга (КТК) из редуцируемых КТК на слое расслоенного пространства, показать их связь с фотонными поверхностями (ФП), и построить общие формулы контура тени исходя из связи ФП и послойно-редуцируемых КТК.

### Научная новизна:

1. Впервые были получены и проанализированы новые решения: сингулярные дионные решения с параметром НУТ без вращения и скалярными волосами в КК ЭМД, вращающиеся обобщения и аналоги решения ФЯНВ в скалярно-тензорной теории, заряженные сингулярные Фишер-браны, а также различные альтернативы с параметром деформации.
2. Было впервые продемонстрировано существование трех физических ветвей решений в КК ЭМД, лишь одна из которых содержит регулярные решения. Экстремальный предел в двух других ветвях накладывает дополнительное ограничение на нулевой момент

- вращения. Кроме того, впервые была дана полная классификация невращающихся КК ЭМД дионов с параметром НУТ. Было впервые показано отсутствие замкнутых изотропных и времениподобных геодезических в окрестности струны Мизнера в невращающихся КК ЭМД дионах с НУТ.
3. Для новых сгенерированных сингулярных  $p$ -бран с произвольной дилатонной константой была впервые изучена возможность квантового “излечения” сингулярности, при которой не возникает проблемы самосопряженности волнового оператора.
  4. Впервые был модифицирован метод преобразований Клемана для получения вращающихся решений в модели Эйнштейна-Максвелла со скаляром с минимальной связью (ЭМС) с использованием вспомогательного поля Максвелла.
  5. Формула Смарра была впервые обобщена на рассматриваемую обобщенную модель с набором скалярных и абелевых векторных полей, и было продемонстрировано отсутствие скалярных вкладов в ней.
  6. Впервые была предложена методика получения ограничений на заряды стационарных БПС-решений исходя из вырожденности соответствующих операторов.
  7. Впервые были получены тени и релятивистские изображения новых точных вращающихся решений в ЭМС и дан сравнительный анализ с наблюдениями ЕНТ.
  8. Впервые получены условия интегрируемости для генерации КТК из редуцируемых КТК на слое расслоенного пространства, показана связь с ФП и построены общие формулы контура тени УКО с КТК.

**Практическая значимость** работы состоит в теоретическом изучении моделей, связанных с теориями-претендентами на роль новой фундаментальной теории гравитации, проявления которых могут быть обнаружены в рамках проектов “Event Horizon Telescope” и гравитационно-волновых экспериментов (LIGO, VIRGO, а также планируемых, например, LISA). Кроме того, в работе развиваются некоторые методологические проблемы теории гравитации.

**Методология и методы исследования.** В работе использовались апробированные аналитические методы дифференциальной геометрии, топологии, абстрактной и линейной алгебры, численные методы исследования. В ходе работы был создан ряд новых алгоритмов для систем символьной компьютерной алгебры. Были использованы методы дифференциальной геометрии для исследования внутренних пространств нелинейных сигма-моделей и генерации новых решений. В численных исследованиях геодезических были использованы схемы Рунге-Кутты 4-го порядка, переложенные

на архитектуру графических процессоров с технологией CUDA. Для исследование БПС-решений использовался формализм спиноров Киллинга.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Дано обобщение метода генерации решений Клемана на случай теории ЭМС, если рассматривать поле Максвелла как вспомогательное. На основе этого построены и исследованы новые вращающиеся решения в скалярно-тензорной теории. Показано, что их тени могут служить хорошими имитаторами черной дыры Керра и решения не могут быть отсеяны полученными результатами из наблюдений ЕНТ.
2. Сгенерированные решения с первичными скалярными волосами и НУТ-зарядом в теории ЭМД и произвольной зарядовой матрицей. Показано что в общем случае являются голыми сингулярностями. Среди обнаруженных трех независимых ветвей для решений с вырожденной зарядовой матрицей, лишь одна ветвь содержит регулярные черные дыры. Показано, что голые сингулярности, которые находятся параметрически близко к экстремальным невращающимся черным дырам в ЭМД, обладают стабильными замкнутыми фотонными орбитами.
3. Построены и исследованы сингулярные  $p$ -браны, генетически связанные с решением Фишера. Показано, что в отдельных случаях сингулярности могут быть ненаблюдаемы в квантовой теории.
4. Дан вывод термодинамической формулы Смарра для теории с набором скалярных и абелевых векторных полей. Показано, что в формулу не входят скалярные заряды.
5. Показано, что решения теории ЭМД с произвольной дилатонной константой и “ложной суперсимметрией” обладают статическим спинором Киллинга, если выполнены условия вырожденности алгебраических однородных уравнений на данный спинор, которые представляются в виде условий на физические поля и асимптотические физические заряды, включая массу, НУТ, электрический и магнитный заряды и скалярный заряд. Предложена методика получения подобных условий, которая может применяться и в рамках других теорий.
6. Показано, что нетривиальный конформный тензор Киллинга в пространстве может быть сгенерирован из тривиальных конформных тензоров Киллинга в слоях с помощью подходящего расслоения, если выполнены определенные условия интегрируемости.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных методов анализа и согласием с результатами других авторов в частных случаях. Практически все полученные результаты были

опубликованы в ведущих мировых и российских научных журналах и многократно докладывались на международных и российских конференциях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на 14 конференциях/симпозиумах:

1. “Генерация нового заряженного решения с вращением в теории Эйнштейна-Максвелла с дилатоном с помощью сигма-модели”. Ломоносов-2018, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 9-13 апреля 2018.
2. “p-Branes with singular horizons”. Strings, Cosmology, and Gravity Student Conference 2019, Max-Planck-Institut für Physik, г. Мюнхен, Германия, 1-3 апреля 2019 (постер).
3. “Гипербраны со скалярными волосами”. Ломоносовские чтения - 2019, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 15-24 апреля 2019.
4. “Получение новых вращающихся решений в скалярно-тензорной теории гравитации с минимальной связью”. Ломоносов-2019, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 8-12 апреля 2019.
5. “Rotating Fisher-Janis-Newman-Winicour spacetime”. BRICS Association on Gravity, Astrophysics and Cosmology, Казанский Федеральный Университет, г. Казань, Россия, 29 августа - 3 сентября 2019.
6. “Smarr formulas for EMD stationary spacetimes with line singularities”, Gravitational Waves, Black Holes and Fundamental Physics, IFPU, Miramare campus, г. Триест, Италия, 13-16 январь 2020 (постер).
7. “Kaluza-Klein dyons: regular and singular”, The 14th International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC14), National Central University, Чжунли, Тайвань, 17-21 августа 2020 (дистанционно).
8. “Формула Смарра для стационарных решений с сингулярностями на полярной оси в модели ЭМД”. Ломоносов-2020, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 10-27 ноября 2020 (дистанционно).
9. “Моделирование и анализ теней гравитирующих ультракомпактных объектов”. Ломоносов-2021, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 12-23 апреля 2021 (дистанционно).
10. “Квантовая трактовка сингулярностей в решениях для бран со скалярными волосами”. Ломоносовские чтения - 2021, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 21-28 апреля 2021.
11. “Killing tensors and photon surfaces in foliated spacetimes”. 16th Marcel Grossmann Meetings (on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation, and Relativistic Field Theories), University of Rome and ICRANet, г. Рим, Италия, 5-10 июля 2021 (дистанционно).

12. “Einstein-Maxwell-Dilaton-Axion mass formulas for black hole systems with struts and strings”. 16th Marcel Grossmann Meetings (on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation, and Relativistic Field Theories), University of Rome and ICRANet, г. Рим, Италия, 5-10 июля 2021 (приглашенное участие, дистанционно).
13. “Послойно-редуцируемые конформные тензора Киллинга и их связь с фотонными поверхностями и тенями черных дыр”. Ломоносов-2022, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 11-22 апреля 2022 (дистанционно).
14. “Particle shadows of black holes and new characteristic surfaces”. International Conference on Quantum Field Theory, High-energy Physics, and Cosmology, г. Дубна, Россия, 18-21 июля 2022.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных работах [A1–A15], 5 из которых в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science, Scopus и рекомендованных ВАК [A1–A5], 1 – в прочих журналах [A6], 9 – в тезисах докладов [A7–A15]. Еще два препринта [A16; A17] приняты к публикации в журнале из списка WoS и Scopus. Два материала конференции [A14; A15] приняты к публикации в научном журнале из списка WoS, и 2 статьи в журналах WoS/Scopus написаны не по теме диссертации.

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в международных и российских конференциях, в написании научных статей опубликованных в ведущих международных и российских журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science (WoS), РИНЦ (RSCI), в двух научно-исследовательских проектах, поддержанных грантами РФФИ, в научной и образовательной школе МГУ “Фундаментальные прикладные космические исследования”. Также, работа автора была поддержана фондом поддержки теоретической физики и математики “Базис”. Автор был удостоен победы в номинации молодого научного сотрудника года физического факультета МГУ за 2022 год. Вклад автора диссертации в основные научные статьи составляет: [A1] – 90%, [A2] – 75%, [A3] – 45%, [A4] – 50%, [A5] – 60%, [A6] – 90%. Во всех основных результатах диссертации вклад автора является основополагающим.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 245 страниц, включая 25 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 385 наименования.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной



литературы по изучаемой проблеме, формулируются цель и задачи, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** содержит краткое описание рассматриваемых моделей: Эйнштейна-Максвелла с дилатоном и аксионом (ЭМДА), Эйнштейна-Максвелла с антисимметричной формой и дилатоном (ЭАД), Эйнштейна-Максвелла со скаляром с минимальной связью (ЭМС), Эйнштейна-Максвелла с дилатоном, в том числе и получаемая из редукции Калуцы-Клейна (КК ЭМД). Также вводится обобщенная модель с набором  $n_v$  абелевых векторных полей  $F^I = dA^I$ ,  $I = 1, \dots, n_v$  и  $n_s$  скалярных полей  $\Phi^A$ ,  $A = 1, \dots, n_s$ , которая описывается действием вида

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4x \left[ \left( R - \frac{1}{2} f_{AB} \partial_\mu \Phi^A \partial^\mu \Phi^B - \frac{c}{4} K_{IJ} F_{\mu\nu}^I F^{J\mu\nu} \right) \sqrt{-g} - \frac{c}{4} H_{IJ} F_{\mu\nu}^I F_{\lambda\tau}^J \epsilon^{\mu\nu\lambda\tau} \right],$$

где  $R$  – скаляр Риччи, матрицы  $f_{AB}$ ,  $K_{IJ}$ ,  $H_{IJ}$  – симметричные матрицы с функциями от скалярных полей  $\Phi^A$ ,  $\epsilon_{0123} = -\epsilon^{0123} = 1$  – антисимметричная тензорная плотность,  $c$  – произвольная положительная константа. Матрица  $K_{IJ}$  положительно определена.

**Вторая глава** посвящена методам генерации решений в представленных моделях. Она содержит описание сигма-моделей для ЭМД, ЭМС, ЭАД при их редукции к стационарному сектору. Эффективное действие теорий в стационарном секторе сводится к трехмерной гравитирующей сигма-модели для  $n_\sigma = 2n_v + n_s + 2$  скаляров  $X^M = f, \chi, \Phi_a, v^I, u_I$ ,  $M = 1, \dots, n_\sigma$  и трехмерной метрике  $h_{ij}$ :

$$S = \int [\mathcal{R}(h) - \mathcal{G}_{MN}(X^L) \partial_i X^M \partial_j X^N h^{ij}] \sqrt{h} d^3x,$$

где  $\mathcal{G}_{MN}$  – метрика таргет-пространства,  $\mathcal{R}(h)$  – скаляр Риччи по трехмерной метрике. Рассматриваются скрытые симметрии и симметрии косетных представления для соответствующих моделей, которые содержат преобразования Харрисона и Элерса. Существование таких скрытых симметрий обеспечивается векторами Киллинга таргет-пространства, которые могут быть проинтегрированы до конечных преобразований. Рассматривается их косетное представление для КК ЭМД.

Далее, вводятся преобразования Клемана, которые были изначально разработаны для модели Эйнштейна-Максвелла. Тем не менее, в работе показано, что такие преобразования могут быть обобщены на случай теорий со скалярными полями, а для теории без полей Максвелла (например, ЭМС), они могут вводиться как вспомогательные. Сами преобразования Клемана из себя представляют последовательное применение преобразований таргет-пространства и координат пространства-времени.

Вводятся преобразования Эриша-Гюрсеса для ЭМС, с помощью которых можно разделить электровакуумный и скалярный вклады. Также, вводится метод генерации высших скалярных мультиполей для ЭМС, основанный на том факте, что уравнение скалярного поля не содержит явно координату  $z$  в координатах Вейля-Папапетру.

**Третья глава** посвящена непосредственно генерации решений с помощью методов, рассмотренных в предыдущей главе. Среди них: новые сингулярные КК ЭМД дионы с НУТ зарядом, новые вращающиеся обобщения решений Фишера-Яниса-Ньюмена-Виникура (ФЯНВ), сингулярные  $p$ -бран.

Для сингулярных КК ЭМД дионов рассмотрены частные случаи и показано, как их свести к случаю вырожденной зарядовой матрицы

$$2D(M^2 + N^2 - D^2) + P^2(D - M) + Q^2(D + M) - 2NPQ = 0,$$

где  $M$  – масса,  $N$  – параметр НУТ,  $Q, P$  – электрический и магнитный заряды,  $D$  – скалярный заряд. Изучена структура как новых сгенерированных решений, так и найденных недавно предшественниками (но до сих пор недостаточно изученных), включая анализ сингулярностей. Проведена их классификация по принципу черных дыр, экстремальных черных дыр, кротовых нор, голых сингулярностей как в четырехмерной, так и в пятимерной интерпретации. Показано, что условие вырождения зарядовой матрицы всегда имеет 3 вещественных корня  $D$  (с учетом кратности корней), но лишь один корень соответствует регулярным решениям, что согласуется с теоремой единственности. Обобщено условие на заряды, которое обеспечивает соответствие решения изотропным геодезическим в таргет-пространстве. Такие решения являются экстремальными в статичном пределе. Изучены вращающиеся экстремальные решения. Для них было показано, что ветвь с регулярными решениями обладает экстремальным пределом для любых зарядов, а для двух других ветвей – лишь при наложении дополнительных условий.

С помощью обобщенных преобразований Клемана и преобразований Эриша-Гюрсеса были получены новые решения в ЭМС. Одно из них можно интерпретировать как вращающееся обобщение решения ФЯНВ для фантомных полей с конкретным значением заряда. После комплексификации, его можно рассматривать как кротовую нору с кольцевой сингулярностью.

Также в данной главе были получены обобщения  $p$ -бран на сингулярный случай, ассоциированный с решением ФЯНВ. Для сингулярных  $p$ -бран выведено условие, которое совпадает с по-форсе условием для известных случаев.

**Четвертая глава** содержит вывод термодинамической формулы Смарра для обобщенной модели со скалярными и векторными абелевыми полями

$$M = \sum_n M_n, \quad M_n = \frac{L_n}{2} + 2\Omega_n J_n + \Phi_n Q_n.$$

Вывод формулы Смарра начинается с определений асимптотических величин массы, момента вращения и электрического заряда

$$M_\infty = \frac{1}{4\pi} \oint_{\Sigma_\infty} D^\nu k^\mu d\Sigma_{\mu\nu}, \quad J_\infty = -\frac{1}{8\pi} \oint_{\Sigma_\infty} D^\nu m^\mu d\Sigma_{\mu\nu},$$

$$Q_I^\infty = \frac{1}{4\pi} \oint_{\Sigma_\infty} G_I^{\mu\nu} d\Sigma_{\mu\nu},$$

которые с помощью формализма “стержней”, подхода Комара-Томиматсу и использования потенциалов сигма-модели выражаются через поверхностные вклады на стержнях. Эти стержни могут соответствовать горизонту событий, струнам Мизнера и Дирака, а также другим линейным сингулярностям. Показано, что обобщенная формула Смарра не содержит скалярные вклады явно. Рассмотрены примеры для решений ЭМД и ЭМДА с линейными сингулярностями.

**Пятая глава** посвящена суперсимметричным БПС-решениям в КК ЭМД и ЭАД. Для первой модели КК ЭМД предлагается методология вывода ограничений на физические поля из рассмотрения асимптотического поведения условия вырожденности алгебраической части однородных уравнений дилатино и гравитино в рамках подхода “ложной” суперсимметрии. Рассматривая условия на поля для асимптотически удаленной сферы, получены ограничения на заряды, которые обобщают известные результаты на случай с параметром НУТ

$$(1 + \alpha^2)D^2 = Q^2 + P^2, \quad (1 + \alpha^2)(M^2 + N^2) = Q^2 + P^2,$$

которые можно объединить в одно выражение

$$M^2 + N^2 + xD^2 - \frac{1+x}{1+\alpha^2}(P^2 + Q^2) = 0$$

верное для любого  $x$ . В частности, для  $x = \alpha^2$  мы получаем условие отсутствия сил Шерка.

Для новых сгенерированных  $p$ -бран во второй модели выделяется известный подкласс решений, сохраняющих часть суперсимметрий. Демонстрируется, что только этот подкласс среди всего сгенерированного класса является БПС.

**Шестая глава** посвящена изучению геодезических и пробных полей на фоне УКО, релятивистских изображений УКО, а также скрытых симметрий, которые стоят за интегрируемостью этих систем.

Сначала, изучается поведение времениподобных и изотропных геодезических на фоне неврашающихся КК ЭМД дионов в пятимерной и четырехмерной интерпретациях. Изучается их движение в области нарушения хронологии. Рассматривается вопрос проходимости пятимерных кротовых нор. Далее рассматриваются геодезические и пробные скалярные поля на фоне  $p$ -бран и изучается вопрос “квантового излечения” сингулярностей. В данной главе рассматриваются также алгоритмы построения релятивистских изображений и теней УКО. В частности, изучены изображения новых сгенерированных вращающихся решений в ЭМС.

Кроме того, развит общий формализм для генерации КТК и показана связь сгенерированных КТК с ФП и тенями УКО. Сформулирована теорема генерации конформного тензора Киллинга с помощью подобранного расслоения пространства-времени, в рамках которой КТК имеет вид

$$K_{\alpha\beta} = \alpha g_{\alpha\beta} + \gamma^{ab} \mathcal{K}_{a\alpha} \mathcal{K}_{b\beta} + e^\Psi n_\alpha n_\beta,$$

где  $g_{\alpha\beta}$  – метрика пространства-времени,  $\mathcal{K}_{a\alpha}$  – вектора Киллинга, касающиеся слоев расслоения,  $n^\alpha$  – единичный вектор нормали к слоям,  $\alpha$  – произвольная функция,  $\gamma^{ab}$  и  $\Psi$  подчиняются дифференциальным уравнениям первого порядка. Рассмотрены примеры генерации для различных решений рассматриваемых в диссертации моделей.

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем. Основываясь на работе [14], были построены и проанализированы общие неврашающиеся локально асимптотически плоские решения со скалярными волосами в пятимерной вакуумной гравитации с двумя векторами Киллинга (один из которых времени-подобный), и их редукции до четырех измерений как решения ЭМД  $\alpha = \sqrt{3}$ . Подход зарядовых матриц, который был использован, дополняет технику генерации решений в [15], а именно применение специальной  $SL(3, R)$  группы преобразований к решению Шварцшильда в 5D. Это приводит к более широкому классу дионных решений, которые также обладают параметром НУТ и дилатонным зарядом, на который не накладывается обычное кубическое условие регулярности. Эти решения включают в себя решение ФЯНВ с сингулярным горизонтом и регулярные локально асимптотически плоские черные дыры КК.

Было обнаружено, что кубическое ограничение, гарантирующее, что матрица заряда  $sl(3, R)$  является вырожденной, является лишь необходимым условием регулярности горизонта. Вторым условием является правильный выбор частного решения кубического ограничения из трех возможностей. Два других решения кубического уравнения приводят к сингулярным решениям общего положения, принадлежащим к вырожденному

типу. Также было обобщено условие экстремальных решений для произвольного заряда НУТ.

Во всех случаях мы включали независимый заряд НУТ в надежде, что он может превратить сверхэкстремальные решения в кротовые норы, как в случае решения Брилла теории Эйнштейна-Максвелла. Но в теории КК это оказалось невозможным: никакая комбинация пяти зарядов не может породить четырехмерную невращающуюся кротовую нору. Тем не менее, существуют пятимерные решения теории КК с топологией кротовой норы, но эти кротовые норы не являются геодезически проходимыми.

Из анализа геодезических на фоне полученных решений с зарядом НУТ мы обнаружили, что времениподобные и изотропные геодезические не могут быть замкнуты в окрестности полярных осей внутри области нарушения хронологии, окружающей струну Мизнера, и показали, что времениподобные геодезические включают класс геодезических с круговыми орбитами, лежащими в произвольных (в общем случае неэкваториальных) плоскостях.

Также, мы изучили НУТ-обобщение вращающихся дионов в КК ЭМД и рассмотрели некоторые частные примеры. Среди них нет регулярных кротовых нор, но встречаются вращающиеся кротовые норы с голыми кольцевыми сингулярностями вблизи горловины. Кроме того, мы обобщили решения, первоначально найденные Рашидом, которые соответствуют изотропным геодезическим в косетном подходе. Такие решения представляют интерполяцию пространство-время между асимптотикой Минковского и  $AdS_2 \times S^2$ . Хотя решение Шварцшильда с ФЯНВ ( $S = 1/2$ ) связывают три разные ветви в невращающемся случае, для вращающихся решений это не так, поскольку его незаряженный предел ( $P = Q = 0$ ) для ветвей  $D_{\pm}$  обладает нетривиальным полем Максвелла. Точно так же среди порожденных вращающихся решений нет решений с тривиальным дилатонным полем, кроме вакуумного решения Керра-НУТ. Примечательно, что решения с экстремальным вращением для ветвей  $D_{\pm}$  накладывают дополнительное ограничение на угловой момент  $J = 0$ .

Сгенерированные решения с параметром НУТ использовались для проверки результатов, полученных для модели ЭМД с произвольной константой связи  $\alpha$ , в отношении суперсимметрии и термодинамики. Мы строго получили два зарядовых ограничения, необходимых для существования спинора Киллинга при произвольном заряде  $\alpha$  и НУТ. Такие ограничения широко известны для теорий, связанных с супергравитацией, или для случая без НУТ. Полученный результат справедлив для ЭМД для любых  $\alpha$ , хотя вложения ЭМД в супергравитацию известны только для  $\alpha = 0, \sqrt{3}$ . Условия на заряды и физические поля, накладываемые условиями сохранения части суперсимметрии, были получены из анализа части уравнений на гравитино и дилатино, которые представлены в виде системы

однородных алгебраических уравнений. Условие вырожденности последних дает возможность получить прямые ограничение на физические поля ЭМД и их асимптотический анализ – на соответствующие заряды. Данный подход может быть обобщен на произвольные суперсимметричные модели.

Были изучены дилатонные  $p$ -браны, сгенерированные из решений ФЯНВ и ЗВ. Для этого использовалась техника генерации, основанная на сигма-модельном представлении уравнений движения для полей гравитации, дилатона и антисимметричной формы в произвольных размерностях. Полученные решения имеют скалярный заряд, не зависящий от зарядов Пейджа, и не удовлетворяют обычному дилатонному ограничению заряда для регулярных бран. Таким образом, в общем случае эти браны содержат голые сингулярности, хотя с помощью некоторых ограничений мы можем выделить регулярные решения.

Были построены заряженные  $p$ -браны с первичным скалярным зарядом в гравитации Эйнштейна с дилатоном и антисимметричной формой с использованием преобразований Харрисона адаптированных для бран, примененных к расширенному решению Фишера. Полученные сферически симметричные в поперечном пространстве браны в общем случае имеют голые сингулярности, за исключением тех, которые получены из регулярного подсемейства затравочных решений и параметра преобразования Харрисона  $c^2 < 1$ .

С помощью некоторой процедуры ограничения в пространстве параметров мы также нашли специальное решение, обозначенное как  $S_E$ , удовлетворяющее ограничению на физические заряды, которое сводится к по-форсе условию в теории ЭМД с  $\alpha^2 = 3$ . Исследуя суперсимметрию полного нового семейства решений, соответствующих NS5-бранам, мы обнаружили, что суперсимметрия имеет место только в предельном случае  $S_E$ , совпадающем со стандартными БПС NS5-бранами.

Мы исследовали геодезическое движение в окрестности самой внешней сингулярности полученных решений. В общем случае, когда решение  $c^2 < 1$  с Фишеровской сингулярностью, ключевую роль в поведении геодезических играет параметр  $\sigma$ . В общем случае с  $c^2 > 1$  поведение существенно не отличается для разных параметров теории и зарядов решения. Поведение движения вблизи сингулярности для семейства  $S_E$  зависит от соотношения между константой связи  $\alpha$  и ее критическим значением  $\alpha_{\text{crit}}^2 = 2s^2/(s + d)$ . При  $\alpha^2 \leq \alpha_{\text{crit}}^2$  геодезические вблизи сингулярности ведут себя аналогично движению вблизи поверхности черной дыры: эффективный потенциал всегда ограничен, частица достигает сингулярности за бесконечное время относительно удаленного наблюдателя. В противном случае, если  $\alpha^2 > \alpha_{\text{crit}}^2$ , эффективный потенциал для геодезических с ненулевым угловым моментом расходится, а радиальные геодезические достигают сингулярности за конечное время удаленного наблюдателя.

На фоне полученных решений мы рассмотрели массивное пробное скалярное поле. Преобразовывая динамическую переменную и радиальную координату, можно представить уравнение Клейна-Гордона в виде уравнения Шредингера с некоторым эффективным потенциалом. Мы исследовали возможность излечения сингулярности в квантовом смысле на основе анализа квадратичной интегрируемости пробного поля. Для семейства решений  $S_E$  показано, что форма пробного скалярного поля зависит от того, превышает ли константа связи  $\alpha$  критическое значение  $\alpha_{\text{crit}}$  или нет. Для  $S_E$  не более, чем одна мода квадратично интегрируема вблизи сингулярности (и сингулярность вылечена), за исключением случая  $s = 1$ ,  $\alpha^2 > 2(d + 2)/(d + 1) > \alpha_{\text{crit}}^2$  для моды  $l = 0$  (где одна мода может быть исключена из спектра на том же основании, что и соответствующая мода в нерелятивистской квантовой механике). Для общего семейства с произвольным  $c^2$  все моды квадратично интегрируемы вблизи сингулярности. Таким образом, выбор граничных условий остается важным вопросом устойчивости решения по отношению к пробному скалярному полю.

Также в случае коразмерности три были построены браны с параметром деформации Зипоя-Вурхиса, которые не обладают сферической симметрией в поперечном пространстве.

В модели ЭМС, используя сигма-модельную формулировку уравнений поля, мы получили новое статическое обобщение ФЯНВ, наделенное параметром деформации и НУТ-параметром. Комбинированное решение ЗВ-ФЯНВ открыло возможность применить технику Клемана для генерации вращения, получив нетривиальное вращающееся решение ЭМС. Решение имеет простой вид, и его можно использовать в качестве полноправной вращающейся метрики для изучения физики вне парадигмы Керра. В экстремальном пределе оно совпадает с одним из недавно найденных Шовино решений. Но в этом решении деформация не может быть устранена из-за внутреннего ограничения, которое существует в этой технике.

Для поиска вращающихся скалярно-тензорных конфигураций без дополнительных параметров мы прибегли к методу Эриша и Гюрсеса. Применяв дуальность ЭГ, мы смогли воспроизвести результат, полученный с помощью ПК. Используя ЭГ-преобразование, мы предполагаем, что вращающиеся вакуумные решения семейства ЗВ дуальны скалярным вращающимся решениям ФЯНВ. В качестве примера мы получили новое вращающееся решение, дуальное вакуумному решению Томимацу-Сато с  $\delta = 2$ , которое имеет регулярный горизонт, окруженный голой кольцевой сингулярностью. Сингулярность поддерживается фантомным скалярным полем. С помощью некоторых сложных преобразований скалярное поле можно сделать действительным (не фантомным), но оно уже не будет обобщением решения ФЯНВ и может быть интерпретировано как диск со скалярным зарядом или червоточина с кольцевой сингулярностью.

Мы также получили новое решение, используя метод генерации, предложенный Шовино для керроподобных метрик. С помощью ЭГ-преобразований эта техника была распространена на произвольный аксиально симметричный анзац в форме Вейля-Папапетру. Следуя Шовино, действие дифференциального оператора  $\partial_z$  на скалярное поле оставляет уравнения движения выполненными. В силу теоремы ЭГ наличие скалярного поля приводит к дополнительному члену  $\gamma^\phi$  в метрике, который можно найти из дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. Таким образом, новое сгенерированное скалярное поле переопределяет функцию  $\gamma^\phi$ , которую можно более или менее легко найти. Мы применили эту технику к решению, полученному с помощью преобразований Клемана.

Все решения, которые мы получили в этой главе, можно рассматривать как действительные альтернативы ложным решениям, возникающим в результате применения алгоритма Яниса-Ньюмена в рамках теорий ЭМС и БД.

Касательно термодинамики черных дыр, мы показали, что вывод массовых формул с использованием подхода Томимацу для вычисления интегралов Комара вокруг стержней в электровакууме может быть обобщен на теорию с набором скаляров и векторных абелевых полей. С помощью трехмерной редукции уравнений построены магнитный и твист-потенциалы, которые позволяют выразить интегралы по стержням так же, как в теории Эйнштейна-Максвелла, где Томимацу использовал для этой цели потенциалы Эрнста. Следует отметить, что скалярные поля не дают вклада в результирующие формулы масс, а их асимптотика лишь вращает электрические и магнитные заряды в пространстве параметров. Для правильных асимптотически плоских конфигураций скалярные заряды вторичны и их вариации не входят в формулы типа Смарра.

При таком подходе магнитный и НУТ-заряды не влияют на массу и угловой момент черной дыры, вычисляемые как интегралы Комара по горизонту. Они вносят вклад в асимптотическую массу и угловой момент через соответствующие отдельные стержни, представляющие струны Дирака и Мизнера. В качестве иллюстрации мы рассмотрели случаи вращающихся дионов ЭМДА и КК ЭМД, оснащенных НУТ.

Целью написания алгоритма для построения теней было дать подробные оптические картины теней вокруг двух имитаторов черных дыр, описываемых решениями эйнштейновской гравитации, минимально связанными со скалярным полем найденных ранее [A1]. Обе они могут рассматриваться как вращающиеся обобщения статических голых сингулярностей ФЯНВ, которые, в отличие от ранее известных, являются законными решениями, удовлетворяющими полному набору уравнений движения теории.

Для обоих рассмотренных решений уравнения геодезических неинтегрируемы, но для решения TSL численное интегрирование показывает



лишь небольшие отклонения от результатов интегрируемого случая Керра. Соответствующие поверхности фундаментальных фотонов приближаются к сферическим, а оптические свойства пространства-времени напоминают свойства решения Керра. Таким образом, в этом случае мы получаем сверхкомпактные объекты, которые можно рассматривать как неплохие имитаторы обычных вакуумных черных дыр в ОТО. Граница тени даже ближе к окружности, чем в метрике Керра при всех значениях параметра вращения. На самом деле его отклонение от окружности не превышает 10 %, что согласуется с наблюдениями M87 [5] и Sgr A\* [6] и отличается менее чем 1 % от случая Керра. Таким образом, на уровне точности наблюдений ЕНТ решения TSL практически неотличимы от керровских. Заметим, что максимальная разница наблюдается в близком к экстремальному режиме с  $a \approx 0,9M$  и в принципе может наблюдаться при достижении большей экспериментальной точности. Кроме того, тень решения TSL, как правило, больше, а вертикальный размер тени уменьшается с увеличением параметра вращения  $a$ , в отличие от семейства Керра.

Решение KL с параметром сжатия индуцированным скалярным зарядом не может быть исключено по экспериментальным данным, если значение скалярного заряда меньше переходного значения существования фотонной области. Однако, с увеличением заряда отличие от случая Керра быстро увеличивается. Для фантомных скалярных полей отклонения еще малы и проявляются только в вытянутых изображениях теней по мере увеличения деформации с увеличением абсолютного значения скалярного заряда. Однако для больших действительных скалярных полей мы можем наблюдать существенные эффекты, такие как формирование множественных изображений теней.

Для конформных тензоров Киллинга был представлен чисто геометрический метод построения КТК второго ранга в пространстве-времени со слоением коразмерности один и дополнительными изометриями. Для пространств-времен, расслоенных на произвольные слои, в работе [A4] были получены общие уравнения подъема, связывающие КТК с его проекциями на слои и ортогональное дополнение. Используя эти уравнения, можно попытаться поднять редуцируемый КТК, определенный в таких слоях, до КТК во всем пространстве-времени, который может оказаться нередуцируемым. Автором были установлены условия интегрируемости, обеспечивающие успешный подъем для данного слоения. Окончательный метод генерации был представлен в основной теореме работы [A4]. Было показано, как эта теорема для КТК сводится к аналогичной теореме для точных КТ, обеспечивая более элегантную и ясную формулировку предыдущих результатов [A3].

Поиск слоения, удовлетворяющего условиям интегрируемости, может оказаться трудной задачей. Однако, было доказано, что слои, удовлетворяющие условиям интегрируемости, должны представлять из себя

фундаментальные фотонные поверхности, если выполняются неравенства фотонных областей. Таким образом, наличие ФФП является необходимым условием, которое еще не гарантирует существования КТК, но служит указанием на то, что такой тензор может существовать. Поэтому рекомендуется проверять условия интегрируемости, используя ФФП в качестве слоев в методе генерации КТК. Этот факт обобщает и проясняет взаимосвязь между ФФП и КТК, обсуждавшуюся ранее в [A3; 16; 17].

Поскольку  $m$ -мерная геометрия с  $n = m - 2$  конформными векторами Киллинга, удовлетворяющая условиям интегрируемости, соответствует интегрируемой динамической системе для изотропных геодезических, можно получить полностью аналитическое описание гравитационных теней соответствующих сверхкомпактных объектов. Мы нашли общее аналитическое выражение для границы тени в произвольной геометрии с послойно-редуцируемым КТК и его предел для удаленного наблюдателя. Эти уравнения обеспечивают простую основу для анализа теней, требуя только знания двух конформных векторов Киллинга, послойно-редуцируемого КТК (нередуцируемого во всем пространстве) и структуры фундаментальных фотонных поверхностей, связанных с этим КТК. Разработанный формализм легко применим в практических расчетах и на новом уровне выявляет глубокую связь фотонных поверхностей с оптическими свойствами гравитирующего объекта.

Мы применили разработанные методы к решениям ЭМДА, STU, где послойно-редуцируемые КТК возникают чисто алгебраически без решения каких-либо дифференциальных уравнений. Мы проанализировали, можно ли в этих примерах свести КТК к точному ТК, и дали аналитические выражения для границ гравитационных теней.

### Основные результаты работы

1. Показано, что метод генерации решений Клемана может быть обобщен для генерации решений в ЭМС, если рассматривать поле Максвелла как вспомогательное. Продемонстрировано, что решения Томиматсу-Сату могут рассматриваться как решения дуальные относительно вращающихся обобщений ФЯНВ в теории ЭМС. Комплексификация таких решений может быть проинтерпретирована как вращающиеся кротовые норы. Тени полученных решений являются хорошими имитаторами черной дыры Керра и решения не могут быть отсеяны полученными результатами из наблюдений ЕНТ.
2. Показано, что сгенерированные решения с первичными скалярными волосами и НУТ-зарядом в теории ЭМД и произвольной зарядовой матрицей в общем случае являются голыми сингулярностями. Среди обнаруженных трех независимых ветвей для решений с вырожденной зарядовой матрицей лишь одна ветвь

- содержит регулярные черные дыры, которые были классифицированы в работе. Голые сингулярности, которые находятся параметрически близко к экстремальным невращающимся черным дырам в ЭМД, обладают стабильными фотонными орбитами, что подразумевает нестабильность данных сингулярностей. В пятимерной интерпретации ЭМД дионов с зарядом НУТ, импульс может рассматриваться четырехмерным наблюдателем как электрический заряд, который может являться объектом процесса Пенроуза.
3. Показано, что сгенерированные сингулярные  $p$ -браны содержат БПС-решения в качестве некоторого нетривиального предела. Класс, обобщающий данные БПС-браны на произвольную дилатонную константу, может быть “квантово излучен” на примере пробного скалярного поля, что значит отсутствие проблемы выбора самосопряженного волнового оператора в таких метриках.
  4. Обобщена термодинамическая формула Смарра на модель с набором скалярных и абелевых векторных полей в рамках подхода Комара-Томиматсу. Показано, что скалярные вклады в построенную таким образом формулу Смарра отсутствуют.
  5. Продемонстрировано, что решения ЭМД с произвольной дилатонной константой и “ложной суперсимметрией” обладают статичным спинором Киллинга, если выполнены условия вырожденности алгебраических однородных уравнений на данный спинор. Полученные условия представлены в виде связей на физические поля и асимптотические физические заряды, включая массу, НУТ, электрический и магнитный заряды и скалярный заряд. Методология получения подобных условий может применяться и в рамках других теорий.
  6. Показано, что конформный тензор Киллинга в пространстве может быть сгенерирован из тривиального конформного тензора Киллинга на слое расслоения пространства, если выполнены определенные условия интегрируемости, найденные в работе.

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Bogush, I.* Generation of rotating solutions in Einstein-scalar gravity [Текст] / I. Bogush, D. Gal'tsov // Phys. Rev. D. — 2020. — Т. 102, № 12. — С. 124006. — arXiv: [2001.02936 \[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/2001.02936). — (ИФ WoS: 5.407).
- A2. Nutty Kaluza-Klein dyons revisited [Текст] / I. Bogush [и др.] // Phys. Rev. D. — 2021. — Т. 103, № 6. — С. 064045. — arXiv: [2009.07922 \[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/2009.07922). — (ИФ WoS: 5.407).
- A3. *Kobialko, K.* Killing tensors and photon surfaces in foliated spacetimes [Текст] / K. Kobialko, I. Bogush, D. Gal'tsov // Phys. Rev. D. — 2021. —

- T. 104, № 4. — С. 044009. — arXiv: [2104.02167 \[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/2104.02167). — (ИФ WoS: 5.407).
- A4. *Kobialko, K.* Slice-reducible conformal Killing tensors, photon surfaces, and shadows [Текст] / K. Kobialko, I. Bogush, D. Gal'tsov // Phys. Rev. D. — 2022. — Т. 106, № 2. — С. 024006. — arXiv: [2202.09126 \[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/2202.09126). — (ИФ WoS: 5.407).
- A5. Photon surfaces, shadows, and accretion disks in gravity with minimally coupled scalar field [Текст] / I. Bogush [и др.] // Phys. Rev. D. — 2022. — Т. 106, № 2. — С. 024034. — arXiv: [2205.01919 \[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/2205.01919). — (ИФ WoS: 5.407).
- A6. *Богуш, И. А.* Гипербраны со скалярными волосами [Текст] / И. А. Богуш, Д. В. Гальцов // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. — 2019. — № 3. — (ИФ РИНЦ: 0.058).
- A7. *Богуш, И. А.* Генерация нового заряженного решения с вращением в теории Эйнштейна-Максвелла с дилатоном с помощью сигма-модели [Текст] / И. А. Богуш // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018» Секция физики. Сборник тезисов докладов. — Физический факультет МГУ Москва. — М.: МАКС Пресс, 2018.
- A8. *Богуш, И. А.* ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ РЕШЕНИЙ В СКАЛЯРНО-ТЕНЗОРНОЙ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ С МИНИМАЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ [Текст] / И. А. Богуш // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019» Секция физики. Сборник тезисов докладов. — Физический факультет МГУ Москва. — М.: МАКС Пресс, 2019.
- A9. *Богуш, И. А.* Формула Смарра для стационарных решений с сингулярностями на полярной оси в модели ЭМД [Текст] / И. А. Богуш // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020» Секция физики. Сборник тезисов докладов. — Физический факультет МГУ Москва. — М.: МАКС Пресс, 2020.
- A10. *Богуш, И. А.* Моделирование и анализ теней гравитирующих ультракомпактных объектов [Текст] / И. А. Богуш, К. В. Кобялко // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» Секция физики. Сборник тезисов докладов. — Физический факультет МГУ Москва. — М.: МАКС Пресс, 2021.
- A11. *Богуш, И. А.* Послойно-редуцируемые конформные тензора Киллинга и их связь с фотонными поверхностями и тенями черных дыр [Текст] / И. А. Богуш, К. В. Кобялко // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2022» Секция физики. Сборник тезисов докладов. — Физический факультет МГУ Москва. — М.: МАКС Пресс, 2022.

- A12. *Богуш, И. А.* ГИПЕРБРАНЫ СО СКАЛЯРНЫМИ ВОЛОСАМИ [Текст] / И. А. Богуш, Д. В. Гальцов // Ломоносовские чтения - 2019. Секция физики. Сборник тезисов докладов. – Физический факультет МГУ Москва. – 2019.
- A13. *Богуш, И. А.* КВАНТОВАЯ ТРАКТОВКА СИНГУЛЯРНОСТЕЙ В РЕШЕНИЯХ ДЛЯ БРАН СО СКАЛЯРНЫМИ ВОЛОСАМИ [Текст] / И. А. Богуш, Д. В. Гальцов // Ломоносовские чтения - 2021. Секция физики. Сборник тезисов докладов. – Физический факультет МГУ Москва. – 2021.
- A14. *Kobialko, K.* Killing tensors in foliated spacetimes and photon surfaces [Текст] / K. Kobialko, I. Bogush, D. Gal'tsov // 16th Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories. – 10.2021. – arXiv: [2110.04608 \[gr-qc\]](#). – (accepted in Int.J.Mod.Phys.D).
- A15. *Gal'tsov, D.* Einstein-Maxwell-Dilaton-Axion mass formulas for black holes with struts and strings [Текст] / D. Gal'tsov, G. Clément, I. Bogush // 16th Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories. – 11.2021. – arXiv: [2111.06111 \[gr-qc\]](#). – (accepted in Int.J.Mod.Phys.D).
- A16. *Kobialko, K.* The geometry of massive particle surfaces [Текст] / K. Kobialko, I. Bogush, D. Gal'tsov. – 2022. – Авг. – arXiv: [2208.02690 \[gr-qc\]](#). – (принято в Phys. Rev. D, ИФ WoS: 5.407).
- A17. *Bogush, I.* Supergravity  $p$ -branes with scalar charge [Текст] / I. Bogush, D. Gal'tsov. – 2022. – Авг. – arXiv: [2208.14667 \[gr-qc\]](#).

## Список литературы

1. *Мизнер, Ч.* Гравитация [Текст]. Т. 1–3 / Ч. Мизнер, К. Торн, Д. Уилер. – М.: Мир, 1977.
2. *Вайнберг, С.* Гравитация и космология [Текст]. Т. 1–3 / С. Вайнберг ; пер. п. р. Я. А. С. Пер. с англ. В. М. Дубовика и Э. А. Тагирова. – Волгоград: Платон, 2000. – С. 696.
3. *Will, C. M.* The Confrontation between General Relativity and Experiment [Текст] / C. M. Will // Living Rev. Rel. – 2014. – Т. 17. – С. 4. – arXiv: [1403.7377 \[gr-qc\]](#).
4. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger [Текст] / B. P. Abbott [и др.] // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Т. 116, № 6. – С. 061102. – arXiv: [1602.03837 \[gr-qc\]](#).

5. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole [Текст] / K. Akiyama [и др.] // *Astrophys. J. Lett.* — 2019. — Т. 875. — С. L1. — arXiv: [1906.11238](https://arxiv.org/abs/1906.11238) [[astro-ph.GA](#)].
6. First Sagittarius A\* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way [Текст] / K. Akiyama [и др.] // *Astrophys. J. Lett.* — 2022. — Т. 930, № 2. — С. L12.
7. *Fujii, Y.* The scalar-tensor theory of gravitation [Текст] / Y. Fujii, K. Maeda. — Cambridge University Press, 07.2007. — (Cambridge Monographs on Mathematical Physics).
8. *Bronnikov, K. A.* Scalar-tensor theory and scalar charge [Текст] / K. A. Bronnikov // *Acta Phys. Polon. B.* — 1973. — Т. 4. — С. 251–266.
9. *Bronnikov, K. A.* Black Holes, Cosmology and Extra Dimensions [Текст] / K. A. Bronnikov, S. G. Rubin. — WSP, 2012.
10. *Bronnikov, K. A.* Scalar fields as sources for wormholes and regular black holes [Текст] / K. A. Bronnikov // *Particles* / под ред. A. Sedrakian. — 2018. — Т. 1, № 1. — С. 56–81. — arXiv: [1802.00098](https://arxiv.org/abs/1802.00098) [[gr-qc](#)].
11. *Gal'tsov, D.* Ghost-free Palatini derivative scalar-tensor theory: Desingularization and the speed test [Текст] / D. Gal'tsov, S. Zhidkova // *Phys. Lett. B.* — 2019. — Т. 790. — С. 453–457. — arXiv: [1808.00492](https://arxiv.org/abs/1808.00492) [[hep-th](#)].
12. *Katanaev, M. O.* Geometric interpretation and classification of global solutions in generalized dilaton gravity [Текст] / M. O. Katanaev, W. Kummer, H. Liebl // *Phys. Rev. D.* — 1996. — Т. 53. — С. 5609–5618. — arXiv: [gr-qc/9511009](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9511009).
13. *Katanaev, M. O.* Effective action for scalar fields in two-dimensional gravity [Текст] / M. O. Katanaev // *Annals Phys.* — 2002. — Т. 296. — С. 1–50. — arXiv: [gr-qc/0101033](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0101033).
14. *Dobiasch, P.* Stationary, Spherically Symmetric Solutions of Jordan's Unified Theory of Gravity and Electromagnetism [Текст] / P. Dobiasch, D. Maison // *Gen. Rel. Grav.* — 1982. — Т. 14. — С. 231–242.
15. *Rasheed, D.* The Rotating dyonic black holes of Kaluza-Klein theory [Текст] / D. Rasheed // *Nucl. Phys. B.* — 1995. — Т. 454. — С. 379–401. — arXiv: [hep-th/9505038](https://arxiv.org/abs/hep-th/9505038).
16. *Koga, Y.* Photon surfaces in less symmetric spacetimes [Текст] / Y. Koga, T. Igata, K. Nakashi // *Phys. Rev. D.* — 2021. — Т. 103, № 4. — С. 044003. — arXiv: [2011.10234](https://arxiv.org/abs/2011.10234) [[gr-qc](#)].
17. *Pappas, G.* On the connection of spacetime separability and spherical photon orbits [Текст] / G. Pappas, K. Glampedakis. — 2018. — Июнь. — arXiv: [1806.04091](https://arxiv.org/abs/1806.04091) [[gr-qc](#)].



*Богущ Игорь Андреевич*

Ультракомпактные объекты в скалярно-тензорных теориях гравитации,  
мотивированных теорией струн

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_