

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**о диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук Хлопунова Михаила Юрьевича**  
**на тему: «Гравитационно-волновые эффекты в теориях с большими**  
**дополнительными измерениями»**  
**по специальности 1.3.3 – «теоретическая физика»**

В настоящее время все мы являемся свидетелями бурного развития гравитационно-волновой астрономии, которая зародилась в начале XXI века. Эта новая область науки открывает беспрецедентные возможности для экспериментальной проверки общей теории относительности (ОТО). Несмотря на то, что все имеющиеся на сегодняшний день данные подтверждают корректность ОТО в рамках наблюдений на гравитационно-волновых обсерваториях, в физике элементарных частиц и космологии остаются нерешённые проблемы: тёмной материи, тёмной энергии, инфляционной стадии ранней Вселенной. Эти проблемы заставляют учёных искать новые подходы и рассматривать возможность модификации традиционных теорий, таких как ОТО и Стандартная Модель. Одним из перспективных направлений модификации ОТО является увеличение размерности пространства-времени. Включение дополнительных измерений позволяет создавать новые теории гравитации, способные решить проблему иерархии в Стандартной Модели и объяснить ускоренное расширение Вселенной без введения космологической постоянной и дополнительных полей. Однако, для проверки таких теорий с помощью гравитационно-волновой астрономии необходимо провести предварительные теоретические исследования процессов гравитационного излучения в рамках выбранных моделей и определить характерные для них гравитационно-волновые эффекты. Диссертация М.Ю. Хлопунова посвящена **актуальной** задаче исследования гравитационно-волновых эффектов, связанных с нарушением принципа Гюйгенса в теориях с нечётным числом

дополнительных измерений и метастабильным гравитоном в модели «мира на бране» Двали-Габададзе-Поррати (ДГП).

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, 8 приложений и списка литературы, включающего 181 наименование. Общий объём работы составляет 196 страниц.

Во введении представлен обзор научной литературы по теме исследования, обосновывается её актуальность и дается общая характеристика работы. Здесь формулируются цели и задачи исследования, выдвигаются положения, выносимые на защиту, обсуждается достоверность полученных результатов и приводится краткое содержание работы. В заключении перечисляются основные результаты, полученные в диссертационном исследовании.

В первой главе диссертации рассматриваются общие признаки нарушения принципа Гюйгенса в излучении на примере скалярного излучения точечного заряда в аналогах пространства Минковского размерности три и пять. Для этого кратко описывается подход Рорлиха-Тейтельбойма к излучению, который позволяет выделить излучаемую часть запаздывающего поля в нечётных размерностях на основе лоренц-инвариантного разложения его тензора энергии-импульса. В результате в этой главе получены формулы для мощности излучения нерелятивистского заряда в размерностях три и пять, а также формулы для мощности скалярного синхротронного излучения. Показано, что в нечётных размерностях из-за нарушения принципа Гюйгенса поле излучения собирается со всей мировой линии заряда и представлено интегралом по собственному времени заряда вплоть до запаздывающего момента времени. **Достоверность** полученных результатов дополнительно подтверждается за счёт суммирования спектральных распределений мощности излучения, нечувствительных к размерности пространства-времени.

Во второй главе, опираясь на результаты первой главы, автор рассматривает характерный признак нарушения принципа Гюйгенса в гравитационном излучении двойных чёрных дыр и нейтронных звезд -

нелокальные «хвостовые» сигналы в излучении эллиптических двойных систем. На примере скалярного излучения нерелятивистского заряда, движущегося по эллиптической орбите в пространстве Минковского размерности три, показано, что интеграл по истории движения заряда в выражении для запаздывающего поля приводит к формированию «хвостовых» сигналов в излучении. Отличительной особенностью этих сигналов является сдвиг максимумов и минимумов мощности излучения заряда во времени относительно моментов прохождения им перигелия и афелия орбиты. В частности, получены формулы для этих сдвигов с точностью до квадратичных по эксцентриситету орбиты вкладов. Также показано, что в высших размерностях максимум спектрального распределения мощности гравитационного излучения эллиптических двойных систем соответствует более высоким гармоникам спектра по сравнению с четырехмерной теорией.

В третьей главе диссертации изучается гравитационное излучение нерелятивистской двойной системы, расположенной на 3-бране без натяжения, вложенной в пятимерное пространство Минковского. Рассмотрение ведётся в рамках пятимерного аналога общей теории относительности (ОТО). С помощью явных вычислений доказано, что двойная система на бране генерирует все пять доступных поляризаций гравитационных волн в пятимерном объемлющем пространстве. Также показано, что одна из возникающих здесь трёх дополнительных поляризаций, так называемая «дышащая мода», доступна для регистрации наблюдателем на бране. Для учета вклада натяжений безмассового скалярного поля на бране, связывающего двойную систему в источник гравитационного поля, предложено обобщение метода DIRE для вычисления постньютоновских разложений в ОТО на случай теорий с нарушением принципа Гюйгенса. В результате в этой главе получен аналог квадрупольной формулы для мощности гравитационного излучения двойной системы, зависящий от интеграла квадрупольного момента системы по истории её движения, в соответствии с нарушением принципа Гюйгенса в пятимерном объемлющем пространстве рассматриваемой модели. В частности,

показано, что «дышащая мода» даёт на 25% меньший вклад в гравитационное излучение, по сравнению с другими поляризациями гравитационных волн.

В четвертой главе диссертации рассматривается эффект утечки гравитационных волн в дополнительное измерение в рамках скалярного аналога модели Двали-Габададзе-Поррати (ДГП). Для проведения этого анализа автором предложено обобщение подхода Рорлиха-Тейтельбойма к излучению на случай эффективного ДГП-скаляра на бране, представляющего собой непрерывный спектр массивных калуце-клейновских мод. С помощью предложенного метода автору удалось получить формулу для эффективной мощности излучения нерелятивистского заряда на бране, движущегося по круговой орбите. В частности, эта формула позволяет количественно охарактеризовать интенсивность утечки гравитационных волн в дополнительное измерение. Показано, что в соответствии с инфракрасной прозрачностью объемлющего пространства ДГП-модели интенсивность утечки излучения оказывается выше для низкочастотных сигналов. Исходя из этого факта автором показано, что интенсивность утечки гравитационных волн, доступных для наблюдения современными и будущими гравитационно-волновыми обсерваториями, оказывается крайне низкой.

В пятой главе диссертации изучается гравитационное излучение нерелятивистских источников, локализованных на бране, в модели Двали-Габададзе-Поррати (ДГП). Для этого предложено обобщение метода Нётер на случай построения эффективного тензора энергии-импульса гравитационного поля на бране из эффективного действия ДГП-модели гравитации, содержащего нелокальные массовые слагаемые. Для вычисления гравитационного излучения построены эффективные действие и тензор энергии-импульса динамических степеней свободы ДГП-гравитона на бране. В результате, получен аналог квадрупольной формулы для эффективной «четырёхмерной» мощности гравитационного излучения нерелятивистского источника, локализованного на бране. В частности, показана генерация подобными источниками трёх дополнительных поляризаций гравитационных

волн. Также, исходя из полученной квадрупольной формулы, найдены оценки для параметров формулы Деффайе-Меноу, которая качественно характеризует интенсивность утечки гравитационных волн в дополнительное измерение. В соответствии с результатами четвертой главы обнаружено, что частота гравитационной волны управляет эффективным переходным радиусом ДПП-модели, за которым проявляется данный эффект, увеличивая его на много порядков в случае высокочастотных сигналов.

Выводы и результаты, полученные в диссертации, представляют собой **новый** весомый вклад в теорию гравитационного излучения. В данной работе автор применяет современные общепринятые математические методы классической теории поля, теории гравитации, дифференциальной геометрии и их комбинации, что гарантирует **достоверность и обоснованность** полученных результатов. Часть полученных результатов согласуется в ряде частных случаев с результатами работ других авторов. По результатам работы Хлопуновым М.Ю. были опубликованы 4 статьи в ведущих научных журналах, входящих в список ВАК и индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Полученные автором результаты были представлены в 14 докладах на международных научных конференциях и семинарах.

Содержание автореферата **соответствует основным положениям диссертации.**

#### **Замечания по работе.**

1. В работе встречаются отдельные слова и выражения, которые выглядят как своего рода «научный сленг» и калька с английского. Например, слово «балк» (от английского “bulk”), означающее в работе объемлющее пространство. Несколько неуместным кажется словосочетание «многомерная формула». Прилагательное «лоренцев» автор пишет с большой буквы как «Лоренцев» - в соответствии с правилами английского языка. Впрочем, всё это не затрудняет чтение и понимание текста диссертации.

2. Одним из ключевых объектов диссертационной работы являются запаздывающие функции Грина в плоских псевдоевклидовых пространствах различных размерностей. С этими обобщёнными функциями автор весьма уверенно и смело проводит различные выкладки, используя стандартные обозначения, принятые в работах по теоретической физике. При этом получаются результаты, корректность которых не вызывает сомнений. Уровень строгости математических выкладок здесь представляется вполне достаточным, тем более, когда речь идёт о квалификационной работе по теоретической физике. Но, на мой взгляд, автор мог бы посвятить отдельный параграф (скажем, в приложении) изложению выкладок с запаздывающими потенциалами на языке математической теории обобщённых функций. Это бы усилило мультидисциплинарную компоненту диссертации и сделало бы некоторые математические результаты автора более доступным для математического сообщества, в том числе при наличии отдельной публикации в математически ориентированном издании – например, в журнале «Теоретическая и математическая физика».

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Они играют роль пожеланий на дальнейшую работу автора. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3 – «теоретическая физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Хлопунов Михаил Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
отдела координации научных исследований и разработок  
ФГБУ «ВНИИМС»

Иващук Владимир Дмитриевич

Контактные данные:

тел.: 7(916)5253911, e-mail: ivashchuk@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.02 – «Теоретическая физика»

Адрес места работы:

119361, г. Москва, ул. Озёрная, д. 46,  
ФГБУ «ВНИИМС», отдел координации научных исследований и разработок  
Тел.: +7 (495) 781-28-68; e-mail: ivas@vniims.ru

Подпись сотрудника

ФГБУ «ВНИИМС» В.Д. Иващука удостоверяю: