

На правах рукописи

Фиткевич
Максим Дмитриевич

Двумерная дилатонная гравитация
с динамической границей

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Левков Дмитрий Геннадиевич, кандидат физ.-мат. наук., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН, г. Москва), отдел теоретической физики, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Арефьева Ирина Ярославна, доктор физ.-мат. наук., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук» (г. Москва), отдел теоретической физики, ведущий научный сотрудник;

Горский Александр Сергеевич, доктор физ.-мат. наук., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (г. Москва), лаборатория № 5 «Квантовая физика и информация», ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (г. Москва).

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИЯИ РАН по адресу:

<http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.119.01

к. ф.-м. н.

Сергей Владимирович Демидов

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Регистрация гравитационных волн в экспериментах LIGO и VIRGO [1] и прямое наблюдение силуэта горизонта событий с помощью интерферометра Event Horizon Telescope [2] предоставляют нам убедительные свидетельства того, что множество массивных астрофизических объектов является чёрными дырами, предсказанными общей теорией относительности. Успех упомянутых экспериментов связан, в частности, с тем, что мы хорошо научились предсказывать наблюдаемые свойства чёрных дыр как классических объектов.

Квантовые свойства чёрных дыр известны хуже. Такой разрыв иногда связывается с проблемами квантования общей теории относительности, которая является неперенормируемой [3]. Её ультрафиолетовое пополнение может быть осуществлено в рамках различных подходов, таких как теория струн, петлевая квантовая гравитация или теория поля с нарушенной лоренцевой симметрией [4,5], но все эти построения ещё далеки от завершения. По этой причине к гравитации имеет смысл относиться до определённого масштаба как к эффективной теории поля. А именно, при малых переданных импульсах и малых флуктуациях метрики допустимо пользоваться методами квантовой теории поля на фоне классического искривлённого пространства-времени, квантуя слабые возмущения гравитационного поля наравне с остальными полями [6].

В рамках данного подхода Стивен Хокинг предсказал, что чёрная дыра должна излучать как абсолютно чёрное тело с температурой $T_H = M^2_{\text{Pl}} / 8\pi M$, зависящей от её массы M [7]. Как следствие, квантовые чёрные дыры испаряются таким образом вплоть до масс порядка планковской, когда пертурбативное приближение для флуктуаций метрики перестанет работать. Без знания квантовой

гравитации нельзя сказать с определённой степенью, что происходит дальше, но наиболее ожидаемым исходом является быстрый распад планковской микродыры [8].

Экспериментальная проверка процесса испарения чёрных дыр возможна в классе моделей мира на бране, где гравитация становится сильной при энергиях выше нескольких ТэВ. В этом случае можно надеяться обнаружить продукты распада чёрных микродыр, рожденных космическими лучами [9] либо в ускорительных экспериментах [10]. Второй оптимистический вариант – присутствие во Вселенной реликтовых чёрных дыр малой массы [11]. К сожалению, результаты наблюдений пока не подтверждают ни один из вышеприведённых сценариев. Поэтому мы вынуждены изучать квантовые чёрные дыры теоретически с позиции согласования квантовой механики и теории гравитации.

Теоретические вычисления Хокинга вызывают явное беспокойство, поскольку из экстраполяции на полный процесс образования и испарения чёрных дыр следует вывод о невозможности построения фундаментальной квантовой теории, включающей в себя постулат унитарной эволюции [12]. А именно, коллапс материи, изначально находившейся в чистом квантовом состоянии с факторизуемой матрицей плотности $\rho_i = |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$, приводит к образованию чёрной дыры, которая затем испаряется и образует излучение Хокинга в смешанном конечном состоянии, описываемом термальной матрицей плотности $\rho_f = \sum e^{-E_n/T} |n\rangle\langle n|$. Таким образом, чистое начальное состояние должно переходить в смешанное, что невозможно в унитарной теории. Данное противоречие получило название *информационного парадокса* [13,14].

В дальнейшем предлагались весьма различные гипотезы о том, как может быть разрешен данный парадокс. Хокинг выдвинул первую гипотезу, что детерминированное уравнение Шрёдингера является приблизительным описанием, применимым лишь для слабых гравитационных полей, а на самом деле квантовая информация теряется [15–17]. Однако построение самосогласованной неунитарной квантовой теории оказывается весьма непростым делом.

Согласно аргументу Бэнкса-Пескина-Сасскинда такие теории страдают от нарушения закона сохранения энергии в экстремальной форме [18]. Это послужило одним из доводов в пользу сохранения свойства унитарной эволюции.

Вторая гипотеза заключается в том, что в конце испарения возникают *остатки* (remnants) – (мета)стабильные частицеподобные объекты планковской массы с бесконечным числом внутренних состояний [19–21]. Долгое время жизни остатков прямо следует из требования унитарности, поскольку, чтобы вернуть обратно энтропию равную энтропии всего предыдущего излучения Хокинга S_H , требуется единомоментно произвести множество мягких квантов с энергией каждого $E \sim M_{\text{Pl}} e^{-S_H}$. Гигантское подавление мод распада в небольшое число частиц требует в этом случае объяснения, равно как и проблема нарушения термодинамического равновесия с обычным веществом из-за энтропийного усиления процессов рождения остатков благодаря бесконечному числу их сортов. Кроме того, гипотеза остатков создаёт проблемы для интерпретации площади горизонта как термодинамической энтропии [22].

Третья «квантово-консервативная» гипотеза заключается в рассмотрении процесса образования и испарения чёрной дыры на равных основаниях с обычным рассеянием частиц, описываемым с помощью унитарной S-матрицы [23–25]. В таком случае информация оказывается заключённой в тонких корреляциях между всеми квантами на больших временных масштабах. Кажущаяся термальность излучения Хокинга не запрещает его пребывания в чистом квантовом состоянии как целого [26]. Пропоненты последней точки зрения критиковали ряд предположений, стоящих за изначальным выводом Хокинга, такие как пренебрежение обратным влиянием квантовых полей на метрику и/или глубоко классическое понимание пространства-времени. Сейчас эта точка зрения является доминирующей благодаря открытию АдС/КфТП-соответствия, устанавливающего эквивалентность квантовой гравитации в пространстве Анти-де-Ситтера (АдС) и явно унитарной суперконформой теории Янга-Миллса [27–29]. В этом

случае испарение чёрной дыры в пространстве АдС имеет дуальное описание в явно унитарной модели. Используя подход АдС/КфТП, можно вычислить энтропию запутывания, характеризующую «квантовую чистоту» состояния хокинговского излучения, и проследить за тем, как это излучение становится чистым в конце испарения [30].

Несмотря на важные шаги, включающие создание голографической картины чёрной дыры со степенями свободы вблизи горизонта и выдвижение принципа комплементарности [31], полноценного понимания механизма сохранения квантовой информации нет до сих пор. Даже наоборот, появились новые формулировки информационного парадокса, например, парадокс «огненной стены» (firewall), уничтожающей любое тело, пересекающее горизонт событий. А именно, были приведены аргументы [32, 33], что наличие этой «стены» вокруг горизонта событий старых чёрных дыр следует из предположения чистоты излучения Хокинга и локальности квантовой теории поля вблизи горизонта. Наличие «огненной стены» явно нарушает принцип эквивалентности. Впрочем, предположение о локальности может оказаться неверным в настоящей теории квантовой гравитации. Это можно продемонстрировать в рамках как теории струн [34], так и петлевой квантовой гравитации [35,36].

Следует подчеркнуть, что информационный парадокс имеет опосредованное отношение к проблеме неперенормируемости гравитации, так как излучение Хокинга содержит в основном мягкие кванты. В то же время, для своего решения парадокс требует учёта непертурбативных эффектов [37].

Таким образом, для анализа проблемы потери информации по-прежнему остаются весьма важны упрощенные модели гравитации, такие как двумерные модели дилатонной гравитации [28–40], изучавшиеся с данной целью на протяжении нескольких десятилетий. В двумерии тензор Эйнштейна тождественно равен нулю, $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} R/2 = 0$, поэтому для существования решений в присутствии полей материи необходимо «оснастить» гравитаци-

онный сектор дополнительным полем дилатона ϕ , взаимодействующим с метрикой $g_{\mu\nu}$. Нас интересуют представители данного класса моделей.

Преимуществами моделей двумерной гравитации являются их перенормируемость и отсутствие динамических степеней свободы, за исключением материальных полей. Как и в высокоразмерных теориях, в моделях дилатонной гравитации могут существовать чёрные дыры, которые испаряются при учёте квантовых поправок. Это позволяет использовать их для попыток решения информационного парадокса.

В частности, на ранних этапах оказалось весьма плодотворным исследование моделей Каллана-Гиддингса-Харви-Стромджера (КГХС) [41], Руссо-Сасскинда-Торласиуса (РСТ) [42], а также их различных модификаций [43–46], включающих модели с динамической границей пространства-времени, введённой для лучшей определённости задачи рассеяния [47–51]. Вполне вероятно, что ряд по-настоящему важных результатов нам только еще предстоит в этой области получить.

Цели и задачи работы

Целью исследования является поиск путей к решению информационного парадокса в модели КГХС с безмассовым скалярным полем в качестве материи. Для существования классического режима отражения мы дополнительно регуляризовали модель, введя физическую границу на линии постоянного дилатона. Благодаря этому топология решений становится похожей на существующую в высокоразмерных теориях гравитации.

Граница автоматически отсекает область пространства-времени в модели КГХС, где гравитация становится сильной, что должно улучшить применимость квазиклассического метода. Для учёта влияния границы на динамику требуется добавить к действию дополнительное слагаемое типа граничного члена Гиббонса-Хокинга, вид которого будет конкретизирован в дальнейшем. В рамках данной модели мы стремимся решить следующие задачи.

Во-первых, будут построены точные классические решения в модели КГХС с границей в качестве первого шага на пути к точному описанию процесса испарения чёрных дыр. Также будет исследованы критические процессы на грани появления чёрных дыр. Будет изучен вопрос интегрируемости модели КГХС с границей, что является существенным для решения задачи квантования.

Во-вторых, будет построено квазиклассическое описание модели КГХС с границей и однопетлевым контрчленом РСТ (модели РСТ с границей). Благодаря этому будет изучен процесс испарения чёрной дыры в режиме слабой связи. При этом возникает трудность, связанная с правильным выбором граничного члена для эффективного однопетлевого действия модели РСТ. После решения данной проблемы станет возможным получить и проанализировать решения, описывающие испаряющиеся чёрные дыры.

В-третьих, в модели КГХС с границей будут квазиклассически вычислены S -матричные элементы для эксклюзивных гравитационных переходов, включающих образование и распад чёрной дыры. Ожидается, что если конечное состояние $|\psi_i\rangle$ существенно отличается от хокинговского, амплитуда рассеяния экспоненциально подавлена. В таком случае континуальный интеграл для матричных элементов S можно вычислять комплексного квазиклассического метода — подобно тому, что используется для описания процесса туннелирования в обычной квантовой механике. Для решения этой задачи требуется научиться находить правильные туннельные решения. Это будет сделано в модели с материей в виде одной первично-квантованной частицы.

Методы исследования

В диссертации используются аналитические методы математической физики. А именно методы нахождения точных решений интегрируемых уравнений, метод анзаца Бете, метод эффективного действия, лагранжевы методы описания гравитации, а также комплексный квазиклассический метод для описания экспоненциально подавленных переходов.

Положения, выносимые на защиту

1. Получен широкий класс точных классических решений в модели КГХС с границей. Приведён конструктивный способ нахождения этих решений, использующий математическую аналогию со спиновой цепочкой Годена.

2. Изучены критические явления на пороге образования чёрных дыр в классической модели КГХС с границей. С помощью этих решений показано, что эта модель не является интегрируемой, то есть не обладает полным набором интегралов движения, гладких на фазовом пространстве.

3. Выведен граничный член в однопетлевой модели РСТ с границей, удовлетворяющий условию самосогласованности Весса-Зумино.

4. Изучены квазиклассические решения, описывающие образование и испарение чёрных дыр в однопетлевой модели РСТ с границей в случае гладкого распределения коллапсирующей материи в начальном состоянии. Показано, что эти решения являются сингулярными и не могут давать вклад в амплитуду перехода между начальным состоянием материи и конечным состоянием излучения Хокинга. Показано, что остатки (remnants) не возникают в данных решениях. Таким образом, информация теряется в модели РСТ с границей на однопетлевом уровне.

5. В модели КГХС с границей с помощью комплексного квазиклассического метода вычислена непертурбативная амплитуда рассеяния точечной частицы. Показано, что при низких энергиях частица тривиально отражается от границы с единичной вероятностью. При энергии частицы M выше порога образования чёрных дыр КГХС вероятность отражения частицы экспоненциально подавлена, $P \sim e^{-S_{BH}}$, где $S_{BH}(M)$ — термодинамическая энтропия чёрной дыры с массой M . Этот ответ позволяет интерпретировать отражение частицы при высоких энергиях как двухстадийный процесс, включающий образование и распад промежуточной чёрной дыры.

Научная новизна работы

Все положения, выносимые на защиту, являются новыми. А именно:

1. Впервые получены точные решения, описывающие рассеяние гладких волновых пакетов в модели КГХС с границей. При высоких энергиях эти решения описывают образование чёрных дыр.

2. Получено самосогласованное эффективное действие для однопетлевой модели РСТ, включающей динамическую границу.

3. Впервые получены квазиклассические решения в модели РСТ с границей в случае гладких волновых пакетов материи в начальном состоянии. Показано, что эти решения не описывают формирование остатков (remnants).

4. Комплексный квазиклассический метод впервые применён для нахождения амплитуды рассеяния первично-квантованной частицы в модели КГХС с границей. Обобщение данного метода на случай более реалистичной материи может позволить явно проверить унитарность гравитационного рассеяния.

Теоретическая и практическая значимость

В главе 1 представлен конструктивный способ построения точных гладких решений в модели КГХС с границей. Представляется, что данный класс решений будет удобен для анализа квантовых аспектов дилатонной гравитации.

В главе 2 получены квазиклассические решения, экстремизирующие однопетлевое эффективное действие и описывающие испаряющиеся чёрные дыры в модели РСТ с границей. С помощью этих решений вычислена энтропия запутывания полей материи. Показано, что решения предсказывают потерю квантовой когерентности при испарении чёрных дыр. Данный отрицательный результат означает, что либо однопетлевое эффективное действие неприменимо для описания квантовой когерентности при испарении чёрных дыр, либо модель РСТ с границей является самопротиворечивой.

В главе 3 разрабатывается комплексный квазиклассический метод для вычисления амплитуд гравитационного рассеяния. На

примере точечной массивной частицы в модели КГХС с границей показано, что данный метод приводит к ответу, совместному с унитарностью, а потому может сыграть значимую роль при решении информационного парадокса.

В целом, представленная работа расширяет и углубляет существующее поле исследований двумерной дилатонной гравитации.

Основные публикации по теме диссертации

По материалам диссертации опубликовано 6 работ [52–57], из них 4 в рецензируемых международных изданиях, рекомендуемых ВАК.

1. Fitkevich Maxim, Levkov Dmitry, Zenkevich Yegor. Exact solutions and critical chaos in dilaton gravity with a boundary // JHEP. 2017. Т. 04. С. 108.
2. Fitkevich Maxim. Signatures of chaos and non-integrability in two-dimensional gravity with dynamical boundary // EPJ Web Conf. 2016. Т. 125. С. 05004.
3. Fitkevich Maxim. Failure of mean-field approximation in weakly coupled dilaton gravity // EPJ Web Conf. 2018. Т. 191. С. 07004.
4. Fitkevich M.D. Model of Dilaton Gravity with Dynamical Boundary: Results and Prospects // Phys. Atom. Nucl. 2020. Т. 82, № 12. С. 1610–1615.
5. Fitkevich Maxim, Levkov Dmitry, Zenkevich Yegor. Dilaton gravity with a boundary: from unitarity to black hole evaporation // JHEP. 2020. Т. 06. С. 184.
6. Fitkevich Maxim, Levkov Dmitry, Sibiryakov Sergey. Semiclassical S-matrix and black hole entropy in dilaton gravity // JHEP. 2020. Т. 08. С. 142.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих российских и международных семинарах и конференциях: 17-ая международ-

ная московская школа физики (42-ая Зимняя Школа ИТЭФ), Москва, 11–18 февраля 2014 г., конференция фонда Династия «Молодые ученые России», Москва, 14–15 апреля 2014 г., международная конференция «18th International Seminar on High Energy Physics» (Quarks-2014), Суздаль, Россия, 2–8 июня 2014 г., международная конференция «19th International Seminar on High Energy Physics» (Quarks-2016), Пушкин, Россия, 29 мая – 4 июня 2016 г., «Молодёжная конференция по теоретической и экспериментальной физике», Москва, Россия, 20-23 ноября 2017 г., международная конференция «20th International Seminar on High Energy Physics» (Quarks-2018), Валдай, Россия, 27 мая – 2 июня 2018 г., 7-ая международная конференция «Higher Spin Theory and Holography-7», Москва, Россия, 4-6 июня 2018 г., Летняя школа «Gravity@Prague», Прага, Чехия, 10–14 сентября 2018 г. Также были проведены доклады по материалам диссертации на научных семинарах ИЯИ РАН (Москва), ИТЭФ (Москва) и МФТИ (Долгопрудный).

Степень достоверности и личный вклад автора

Основные статьи по теме диссертации были опубликованы в признанных международных изданиях, пройдя процедуру рецензирования. Все результаты, представляемые в диссертации, получены автором либо при его непосредственном участии.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и приложений. В первой главе исследуется классическая модель КГХС с границей. Во второй главе рассматривается однопетлевая модель РСТ с границей. В третьей главе проводится квазиклассическое вычисление амплитуды рассеяния точечной частицы в модели КГХС с границей. Объём текста составляет 112 страниц, включает в себя 23 рисунка. В списке литературы 97 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** даётся общая характеристика работы и формулируются задачи исследования.

В **первой главе** мы представляем исследование классической динамики и точные решения в модели КГХС с динамической границей [52–53]. Поле дилатона на пространстве-времени ограничено, $\phi < \phi_0$, что позволяет избавиться от проблем с сильной связью, поскольку сила гравитационного взаимодействия в модели КГХС пропорциональна параметру $e^{2\phi}$. В модели с границей существуют два режима поведения классических решений. Если энергия волнового пакета небольшая, то имеет место полное отражение, отсутствующее в изначальной модели КГХС. Данный режим важен для корректной постановки квантовой задачи рассеяния. При превышении некоторой пороговой энергии, величина которой зависит от формы и амплитуды волнового пакета, рождается чёрная дыра. В первой главе исследуются оба режима поведения классических решений, а также критический режим на грани образования чёрной дыры.

Во вступительном **параграфе 1.2** приведён обзор классической модели КГХС. Рассматриваются вакуумные решения и решения, описывающие гравитационный коллапс. В параграфе также определяются используемые в дальнейшем обозначения и терминология.

В **параграфе 1.3** формулируется модель КГХС с границей. Мы стартуем с лагранжевой формулировки, из которой выводятся как уравнения поля, так и граничные условия в гравитационном секторе и для полей материи. Из граничных условий мы выводим обыкновенное дифференциальное уравнение, управляющее движением границы. Данное уравнение обладает побочной конформной симметрией, связывающей физически различные решения, но сохраняющей форму самого уравнения. Решив уравнение границы при фиксированных начальных условиях, мы затем находим решение во всём пространстве-времени. Изучая общие свойства уравнений, мы обнаруживаем основные характеристики режимов полного от-

ражения и с образованием чёрной дыры. А именно, все решения с низкими энергиями описывают отражение, в то время как при энергиях выше некоторой критической решения содержат сингулярность, покрытую горизонтом событий, то есть чёрную дыру.

В следующем **параграфе 1.4** мы описываем класс точных решений, которые называем *солитонными*. Отметим, что предыдущие исследования опирались в основном на численные методы, либо на анализ решений в виде дельта-функциональных волновых пакетов. Обнаружение аналитических решений, описывающих как полное отражение, так и коллапс, может оказаться полезным для дальнейшего изучения чёрных дыр КГХС. Каждый солитон задаётся набором из N пар чисел $\{s_n, v_n\}$, характеризующих особенности решения, где s_n — целые или полуцелые числа, а v_n — комплексные параметры. Мы анализируем структуру решений со степенными особенностями и используем аналогию со спиновой цепочкой Годена, дающую конструктивный способ классификации решений. Параметры солитона должны быть фиксированы таким образом, чтобы удовлетворять условиям действительности решения и конечности энергии, что накладывает дополнительные соотношения на $\{s_n, v_n\}$ и сужает пространство физических решений.

В завершающем первую главу **параграфе 1.5** мы изучаем критические явления [58,59]. Мы показываем, что на пороге образования чёрных дыр финальное состояние поля материи всегда содержит узкий пик, несущий фиксированную энергию и чувствительный к изменениям начальных данных. Количественно это выражается тем, что для определённых вариаций начальных данных интегралы движения, вычисленные на начальных состояниях, непрерывны, в то время как те же интегралы движения для конечных состояний имеют существенную особую точку в пространстве параметров. Это служит аргументом против интегрируемости модели КГХС с границей, то есть существования полного набора сохраняющихся величин гладко покрывающих всё фазовое пространство.

Вторая глава посвящена проблеме квантовомеханического испарения чёрных дыр в дилатонной гравитации. Рождение частиц

чёрной дырой и их обратное влияние на метрику можно учесть с помощью конформной аномалии следа тензора энергии-импульса: $T^\mu_\mu = (N/24\pi)R$ для N скалярных полей. При этом, вкладом полей дилатона, метрики и калибровочных духов можно пренебречь при условии наличия большого количества полей $N \gg 1$, а также малости квазиклассического параметра $Ne^{2\phi_0} \ll 1$. Соответствующие квазиклассические поправки к полевым уравнениям можно получить из действия Лиувилля-Полякова [60], представляющего собой однопетлевой вклад от N скалярных полей, после отынтегрирования их флуктуаций на фоне метрики $g_{\mu\nu}$.

В этой главе мы рассматриваем модель Руссо-Сасскинда-Торласиуса (РСТ), действие которой отличается от действия модели КГХС наличием локального контрчлена, призванного сохранить свойство точной решаемости в присутствии действия Лиувилля-Полякова.

В **параграфе 2.2** эффективное действие Лиувилля-Полякова обобщается на модель с границей при $\phi = \phi_0$. Для этого мы применяем условие самосогласованности Весса-Зумино с целью фиксации вида граничного слагаемого для модели РСТ. Из полученного действия выводятся полевые уравнения и граничные условия, из которых следуют общее решение, законы отражения и уравнение границы. В **параграфе 2.3** демонстрируется существование режима регулярного отражения и режима коллапса с образованием чёрной дыры. При этом рассматривается случай гладких начальных волновых пакетов. Показано, что физические решения, описывающие процесс испарения чёрных дыр, не могут быть определены однозначным образом из начальных данных задачи Коши.

В **параграфе 2.4** мы интерпретируем полученные квазиклассические решения в контексте проблемы потери информации. Приведены аргументы, что из-за сингулярности в конце испарения они не могут выступать в роли седловых решений для квазиклассического вычисления амплитуды перехода. Показано, что в модели РСТ с границей также не могут возникнуть остатки (remnants) без

значительных нарушений граничных условий, что ограничивает применимость квазиклассических методов.

В **третьей главе** мы используем квазиклассический метод комплексных траекторий [61] для вычисления амплитуды квантовомеханического рассеяния точечной частицы в дилатонной гравитации с границей. Данный метод уже применялся к задаче гравитационного рассеяния с тонкими оболочками [62] и показал разумные результаты, см. также [63].

В **параграфе 3.2** мы рассматриваем уравнения движения и их решения в модели КГХС с точечной частицей в качестве материи. Для энергии частицы меньше некоторого критического значения M_{cr} решение описывает простой отскок от границы с единичной вероятностью. При больших энергиях классические решения описывают образование чёрной дыры.

В **параграфе 3.3** мы даём определение S-матрицы и находим регуляризованные решения для нахождения её элементов в квазиклассическом приближении. Вычисляются модуль и фаза амплитуды рассеяния.

В **параграфе 3.4** мы обсуждаем экспоненциальное подавление амплитуды рассеяния для частицы с энергией выше M_{cr} . Вероятность процесса отражения частицы оказывается равной $P \sim e^{-S_{BH}}$, где $S_{BH} = 2\pi(M - M_{cr})/\lambda$, а M — полная начальная энергия частицы. Важно, что S_{BH} совпадает с энтропией чёрной дыры, образовавшейся при столкновении классической частицы с границей. Это даёт простую интерпретацию подавления вероятности отражения как выбора одного конечного состояния частицы из $e^{S_{BH}}$ состояний чёрной дыры.

В **Заключении** мы подводим итог исследованию и обсуждаем некоторые перспективы.

Список литературы

1. Abbott B. P. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // Phys. Rev. Lett. 2016. T. 116, № 6. С. 061102.
2. Akiyama Kazunori et al. First M87 Event Horizon Telescope Results.

- I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // *Astrophys. J.* 2019. T. 875, № 1. C. L1.
3. Shomer Assaf. A Pedagogical explanation for the non-renormalizability of gravity // *arXiv:0709.3555 [hep-th]*. 2007.
4. Horava Petr. Quantum Gravity at a Lifshitz Point // *Phys. Rev.* 2009. T. D79. C. 084008.
5. Barvinsky Andrei O. et al. Renormalization of Horava gravity // *Phys. Rev. D.* 2016. T. 93, № 6. C. 064022.
6. Birrell N.D., Davies P.C.W. *Quantum Fields in Curved Space*. Cambridge Monographs on Mathematical Physics. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1984.
7. Hawking S. W. Particle Creation by Black Holes // *Commun. Math. Phys.* 1975. T. 43. C. 199–220.
8. Hawking S. W. Black hole explosions // *Nature*. 1974. T. 248. C. 30–31.
9. Jho Yongsoo, Park Seong Chan. Constraining New Physics with High Multiplicity : I. Ultra-High Energy Cosmic Rays on air-shower detector arrays // *arXiv: 1806.03063 [hep-ph]*. 2018.
10. Sirunyan Albert M et al. Search for black holes in high-multiplicity final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Phys. Lett.* 2017. T. B774. C. 279–307.
11. Polnarev A. G., Khlopov M. Yu. Cosmology, primordial black holes, and supermassive particles // *Phys. Usp.* 1985. T. 28, № 3. C. 213–232.
12. Hawking S. W. Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse // *Phys. 106 Rev.* 1976. T. D14. C. 2460–2473.
13. Preskill John. Do black holes destroy information? // *International Symposium on Black holes, Membranes, Wormholes and Superstrings Woodlands, Texas, January 16-18, 1992*. 1992. C. 22–39.
14. Polchinski Joseph. The Black Hole Information Problem // *Proceedings, Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics: New Frontiers in Fields and Strings (TASI 2015): Boulder, CO, USA, June 1-26, 2015*. 2017. C. 353–397.
15. Hawking S. W. The Unpredictability of Quantum Gravity // *Commun. Math. Phys.* 1982. T. 87. C. 395–415.
16. Page Don N. Is Quantum Gravity Deterministic And/or Time Symmetric? // *Gen. Rel. Grav.* 1982. T. 14. C. 299–302.
17. Unruh William G., Wald Robert M. Information Loss // *Rept. Prog. Phys.* 2017. T. 80, № 9. C. 092002.

18. Banks Tom, Susskind Leonard, Peskin Michael E. Difficulties for the Evolution of Pure States Into Mixed States // Nucl. Phys. 1984. T. B244. C. 125–134.
19. Aharonov Y., Casher A., Nussinov S. The Unitarity Puzzle and Planck Mass Stable Particles // Phys. Lett. 1987. T. B191. C. 51.
20. Carlitz Robert D., Willey Raymond S. The Lifetime of a Black Hole // Phys. Rev. 1987. T. D36. C. 2336.
21. Chen Pisin, Ong Yen Chin, Yeom Dong-han. Black Hole Remnants and the Information Loss Paradox // Phys. Rept. 2015. T. 603. C. 1–45.
22. Bekenstein Jacob D. Black holes and entropy // Phys. Rev. 1973. T. D7. C. 2333–2346.
23. Page Don N. Is Black-Hole Evaporation Predictable? // Phys. Rev. Lett. 1980. T. 44. C. 301.
24. 't Hooft Gerard. The black hole interpretation of string theory // Nucl. Phys. 1990. T. B335. C. 138–154. 107.
25. Stephens Christopher R., 't Hooft Gerard, Whiting Bernard F. Black hole evaporation without information loss // Class. Quant. Grav. 1994. T. 11. C. 621–648.
26. Broda Bogus law. Possible unitarity of black hole evaporation // arXiv: 1810.10431 [gr-qc]. 2018.
27. Maldacena Juan Martin. The Large N limit of superconformal field theories and supergravity // Int. J. Theor. Phys. 1999. T. 38. C. 1113–1133. [Adv. Theor. Math. Phys.2,231(1998)].
28. Witten Edward. Anti-de Sitter space and holography // Adv. Theor. Math. Phys. 1998. T. 2. C. 253–291.
29. Maldacena Juan Martin. Eternal black holes in anti-de Sitter // JHEP. 2003. T. 04. C. 021.
30. Penington Geoff et al. Replica wormholes and the black hole interior // arXiv: 1911.11977 [hep-th]. 2019.
31. Susskind Leonard, Thorlacius Larus, Uglum John. The Stretched horizon and black hole complementarity // Phys. Rev. 1993. T. D48. C. 3743–3761.
32. Almheiri Ahmed et al. Black Holes: Complementarity or Firewalls? // JHEP. 2013. T. 02. C. 062.
33. Almheiri Ahmed et al. An Apologia for Firewalls // JHEP. 2013. T. 09. C. 018.
34. Dodelson Matthew, Silverstein Eva. String-theoretic breakdown of

- effective field theory near black hole horizons // *Phys. Rev.* 2017. T. D96, № 6. C. 066010.
35. Ashtekar Abhay, Bojowald Martin. Black hole evaporation: A Paradigm // *Class. Quant. Grav.* 2005. T. 22. C. 3349–3362.
 36. Rovelli Carlo. Black Hole Evolution Traced Out with Loop Quantum Gravity // *APS Physics.* 2018. T. 11. C. 127.
 37. Giddings Steven B. Black holes in the quantum universe // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 2019. T. A377, № 2161. C. 20190029.
 38. Strobl Thomas. Gravity in two space-time dimensions. Ph.D. thesis: Aachen, Tech. Hochsch. 1999.
 39. Grumiller D., Kummer W., Vassilevich D. V. Dilaton gravity in twodimensions // *Phys. Rept.* 2002. T. 369. C. 327–430.
 40. Grumiller Daniel, Meyer Rene. Ramifications of lineland // *Turk. J. Phys.* 2006. T. 30. C. 349–378.
 41. Callan Jr. Curtis et al. Evanescent black holes // *Phys. Rev.* 1992. T. D45, № 4. C. R1005.
 42. Russo Jorge G., Susskind Leonard, Thorlacius Larus. Black hole evaporation in (1+1)-dimensions // *Phys. Lett.* 1992. T. B292. C. 13–18.
 43. Strominger Andrew. Les Houches lectures on black holes // NATO Advanced Study Institute: Les Houches Summer School, Session 62: Fluctuating Geometries in Statistical Mechanics and Field Theory Les Houches, France, August 2-September 9, 1994.
 44. Thorlacius Larus. Black hole evolution // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 1995. T. 41. C. 245–275.
 45. Russo Jorge G., Susskind Leonard, Thorlacius Larus. The Endpoint of Hawking radiation // *Phys. Rev.* 1992. T. D46. C. 3444–344a9.
 46. Verlinde Erik, Verlinde Herman. A quantum S-matrix for two-dimensional black hole formation and evaporation // *Nuclear Physics B.* 1993. T. 406, № 1-2. C. 43–58.
 47. Chung Tze Dan, Verlinde Herman L. Dynamical moving mirrors and black holes // *Nucl. Phys.* 1994. T. B418. C. 305–336.
 48. Das Sumit R., Mukherji Sudipta. Black hole formation and space-time fluctuations in two-dimensional dilaton gravity and complementarity // *Phys. Rev.* 1994. T. D50. C. 930–940.
 49. Strominger Andrew, Thorlacius Larus. Conformally invariant boundary conditions for dilaton gravity // *Phys. Rev.* 1994. T. D50. C. 5177–5187. 109.

50. Bose Sukanta, Parker Leonard, Peleg Yoav. Semiinfinite throat as the end state geometry of two-dimensional black hole evaporation // *Phys. Rev.* 1995. T. D52. C. 3512–3517.
51. Peleg Yoav, Bose Sukanta, Parker Leonard. Choptuik scaling and quantum effects in 2-d dilaton gravity // *Phys. Rev.* 1997. T. D55. C. 4525–4528.
52. Fitkeovich Maxim, Levkov Dmitry, Zenkevich Yegor. Exact solutions and critical chaos in dilaton gravity with a boundary // *JHEP.* 2017. T. 04. C. 108.
53. Fitkeovich Maxim. Signatures of chaos and non-integrability in two-dimensional gravity with dynamical boundary // *EPJ Web Conf.* 2016. T. 125. C. 05004.
54. Fitkeovich Maxim. Failure of mean-field approximation in weakly coupled dilaton gravity // *EPJ Web Conf.* 2018. T. 191. C. 07004.
55. Fitkeovich M.D. Model of Dilaton Gravity with Dynamical Boundary: Results and Prospects // *Phys. Atom. Nucl.* 2020. T. 82, № 12. C. 1610–1615.
56. Fitkeovich Maxim, Levkov Dmitry, Zenkevich Yegor. Dilaton gravity with a boundary: from unitarity to black hole evaporation // *JHEP.* 2020. T. 06. C. 184.
57. Fitkeovich Maxim, Levkov Dmitry, Sibiryakov Sergey. Semiclassical S-matrix and black hole entropy in dilaton gravity // *JHEP.* 2020. T. 08. C. 142.
58. Choptuik Matthew W. Universality and scaling in gravitational collapse of a massless scalar field // *Phys. Rev. Lett.* 1993. T. 70. C. 9–12.
59. Gundlach Carsten, Martin-Garcia Jose M. Critical phenomena in gravitational collapse // *Living Rev. Rel.* 2007. T. 10. C. 5.
60. Polyakov Alexander M. Quantum Geometry of Bosonic Strings // *Phys. Lett.* 1981. T. B103. C. 207–210.
61. Levkov D. G., Panin A. G., Sibiryakov S. M. Unstable Semiclassical Trajectories 112 in Tunneling // *Phys. Rev. Lett.* 2007. T. 99. C. 170407.
62. Bezrukov Fedor, Levkov Dmitry, Sibiryakov Sergey. Semiclassical S-matrix for black holes // *JHEP.* 2015. T. 12. C. 002.
63. Parikh Maulik K., Wilczek Frank. Hawking radiation as tunneling // *Phys. Rev. Lett.* 2000. T. 85. C. 5042–5045.

Научное издание

Фиткевич

Максим Дмитриевич

Двумерная дилатонная гравитация с динамической границей

01.04.02 – Теоретическая физика

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 0,9 Зак. № 22464 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а