ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.167.02 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. В.А. СТЕКЛОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК.

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.06.2025 № 4

О присуждении **Белоконю Александру Игоревичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Динамика квантовых полей и их локализованных возмущений в искривлённых пространствах»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика, принята к защите «03» апреля 2025 г., протокол №2 диссертационным советом 24.1.167.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Математического института им. В.А. Стеклова Российской академии наук (119991, г. Москва, ул. Губкина, д. 8; приказ № 1114/НК от 23.05.2023).

Соискатель Белоконь Александр Игоревич, 1995 года рождения, окончил в 2020 г. специалитет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности 03.05.01 «Астрономия», а в 2024 г. — аспирантуру Математического института им. В.А. Стеклова. Диссертация выполнена в отделе математических методов квантовых технологий МИАН, где и работает соискатель в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель — Агеев Дмитрий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела математических методов квантовых технологий Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Математического института им. В.А. Стеклова Российской академии наук (специальность – 01.04.02).

Официальные оппоненты:

- Морозов Андрей Алексеевич — доктор физико-математических наук, исполняющий обязанности ведущего научного сотрудника Лаборатории №16 Методы математической физики и теории информации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (специальность – 01.04.02);
- Фурсаев Дмитрий Владимирович — доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Международной межправительственной научно-исследовательской организации Объединенный институт ядерных исследований (специальность – 01.04.02);

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (г. Санкт-Петербург) в своем положительном заключении, утвержденном исполняющим обязанности проректора по научной работе СПбГУ, доцентом, кандидатом физико-математических наук Микушевым С.В., указала, что диссертационное исследование является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи по квантовой теории поля в искривлённом пространстве-времени, имеющей важное значение для космологии, проблемы информационного парадокса чёрных дыр и исследования неравновесной динамики квантовых систем.

По материалам диссертации автором опубликовано 5 статей, в том числе в журналах первого квартиля.

1. “Light scalar dark matter coupled to a trace of energy-momentum tensor” Aleksandr Belokon and Anna Tokareva, Phys.Rev.D 101, (2020) 10, 103535

2. “Higgs-dilaton model revisited: can dilaton act as QCD axion?” Aleksandr I. Belokon, Anna Tokareva, Phys.Rev.D 107 (2023) 12, 123503
3. “From locality to irregularity: Introducing local quenches in massive scalar field theory” Dmitry S. Ageev, Aleksandr I. Belokon, Vasilii V. Pushkarev, JHEP 05 (2023) 188
4. “Entanglement entropy in de Sitter: no pure states for conformal matter” D.S. Ageev, I.Ya. Aref'eva, A.I. Belokon et al., JHEP 05 (2024) 308
5. “Finite entangling regions and information paradox in charged black holes” Aleksandr I. Belokon, Theor.Math.Phys. 222:1 (2025), 154-169.

По совместным статьям имеются заявления от соавторов о разделении научного вклада в публикациях. Все статьи выполнены при непосредственном участии диссертанта, а его вклад в эти статьи является определяющим.

На автореферат диссертации Белоконя А.И. поступили отзывы Алкалаева К.Б. — доктора физико-математических наук (специальность 01.04.02), ведущего научного сотрудника, заместителя руководителя Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и Троицкого С.В. — член-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук (специальность 01.04.16), главного научного сотрудника отдела теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных исследований Российской академии наук. В отзывах дана положительная оценка работы. В отзыве Алкалаева К.Б. подчёркивается широта круга рассматриваемых в диссертации задач и высоко оценивается часть работы, посвящённая изучению энтропии зацепленности с использованием островного предписания. Отмечается решающая роль такого рода исследований для понимания квантовой структуры пространства-времени и разработки непротиворечивой теории квантовой гравитации.

В отзыве Троицкого С.В. особое внимание уделяется части диссертации, посвящённой космологии. Отмечается оригинальный подход, использованный в диссертации, благодаря которому “сильная CP-проблема” и проблема тёмной материи получают решение за счёт введения поля дилатона. Также в отзыве отмечается высокий уровень публикаций, на которых основано диссертационное исследование. Оба отзыва на автореферат заключают, что диссертационная работа является законченным научно-квалификационным исследованием и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они являются высококвалифицированными специалистами в области физико-математических наук, в частности, в квантовой теории поля, квантовой информации и гравитации, а также наличием публикаций по тематике, близкой к теме диссертации. Оппонент Фурсаев Д.В. является одним из пионеров исследований квантовой зацепленности в системах с динамической гравитацией. Оппонент Морозов А.А. в том числе является экспертом в теории квантовой информации. Среди сотрудников ведущей организации имеется ряд специалистов по квантовой теории поля, теории струн, гравитации, физике чёрных дыр и космологии.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- предложена модель тёмной материи, в которой в основном приближении при рассмотрении квадратичного взаимодействия скалярного поля со следом гидродинамического тензора энергии-импульса полей Стандартной модели, которая удовлетворяет текущим экспериментальным ограничениям по динамике первичного нуклеосинтеза и количеству тёмной материи в поздней Вселенной;

- предложена космологическая модель, в которой спонтанно нарушенная квантовая масштабная инвариантность в основном приближении решает “сильную CP-проблему”, а соответствующий голдстоуновский бозон

образует наблюдаемую тёмную материю в рамках Хиггс-дилатонной инфляции в формализме Палатини;

- в приближении, использующем двумерные свободные фермионы, предложено аналитическое описание динамики энтропии зацепленности конформной материи, представляющей излучение Хокинга, в модели электрически заряженной чёрной дыры с учётом вклада островов зацепленности;

- доказана несамосогласованность используемых в литературе моделей по изучению динамики энтропии зацепленности конформной материи в редуцированном до двумерия трёхмерном пространстве де Ситтера;

- предложено аналитическое описание корреляционных функций в неравновесных состояниях в скалярной теории поля, создаваемых вставками локальных операторов, а также установлена связь с соответствующими голографическими результатами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- изучена возможность нетривиального взаимодействия тёмной материи с веществом помимо гравитационного и доказано, что существует соответствующий класс моделей, удовлетворяющих текущим космологическим ограничениям;

- доказана возможность построения согласованных с наблюдательными данными моделей инфляции и тёмной материи путём масштабно-инвариантного расширения Стандартной модели в рамках подхода эффективной теории поля;

- изложены положения, позволяющие изучать динамику энтропии зацепленности с учётом вклада несвязных пространственно-подобных областей на фоне многомерных геометрий с использованием существующих подходов двумерной конформной теории поля;

- раскрыты противоречия моделей, используемых в современной литературе для изучения динамики энтропии зацепленности в редуцированной версии трёхмерного пространства де Ситтера;

- изучена динамика локализованных возмущений в более широком классе теорий, не обязательно обладающих конформной симметрией, в отличие от предыдущих работ, сосредоточенных преимущественно на двумерной конформной теории поля.

Диссертация имеет теоретический характер. Результаты диссертации представляют интерес во многих областях теоретической физики: космологии тёмной материи и инфляционных моделях, физике элементарных частиц, физике чёрных дыр и неравновесной физике. Предложенные модели тёмной материи, прошедшие феноменологическую проверку, открывают возможности для новых направлений её экспериментального поиска, а также косвенно мотивируют конформно-инвариантные ультрафиолетовые обобщения Стандартной модели. Развиваемые в диссертации подходы по изучению энтропии зацепленности в моделях многомерных геометрий важны для исследования предсказаний островного предписания, модифицирующего вычисление энтропии в присутствии динамической гравитации, а также проблемы информационного парадокса чёрных дыр. В частности, исследованная в диссертации динамика энтропии зацепленности конечных областей с учётом вклада островов в модели электрически заряжённой чёрной дыры демонстрирует наличие эффектов, требующих дальнейшего изучения и физической интерпретации. Результаты диссертации, касающиеся пространства де Ситтера, демонстрируют необходимость существенной модификации текущих моделей, использующихся для изучения энтропии зацепленности в этой геометрии. Результаты по вычислению корреляционных функций в локально возбуждённых состояниях представляют собой основу для изучения неравновесных процессов в различных теориях поля, в том числе и экзотических, а также различных приложений AdS/CFT-соответствия.

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием методов квантовой теории и гравитации, а также подходов, общепринятых в современной литературе по затронутым тематикам. Результаты работы

являются новыми и обобщают результаты, полученные ранее другими авторами. Результаты исследований докладывались автором на многочисленных семинарах и конференциях.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. не ясно, почему в ходе рассмотрения радиационно-доминированной стадии для легкой скалярной темной материи величина калибровочной аномалии считается постоянной, тогда как даже в тексте указано, что она меняется на порядок в рамках рассматриваемого процесса;

2. хотелось бы пояснения, почему предпочтительно использовать формализм Палатини при рассмотрении Хиггс-дилатонного действия, и какой из подходов более физически обоснован. В тексте объяснено, почему его удобно использовать, но не ясно, почему можно считать метрику и связность независимыми величинами в этом случае;

3. многие предложения, по-видимому, являются прямолинейным переводом соответствующих предложений из англоязычных работ автора. Их структура, плохо адаптированная под русский язык, несколько затрудняет чтение. Перевод термина Jordan frame как “джордановский остов” представляется крайне неудачным, хотя следует отметить отсутствие устоявшегося русскоязычного термина (в разных работах употребляется “картина Йордана”, а также “представление” и калька с английского “фрейм”);

4. обзор литературы сделан на уровне, достаточном для статей в научных журналах, но в диссертации его следовало бы сделать более подробным. В защиту автора стоит отметить, что при относительно скупом обзоре литературы, ключевые утверждения приведены, а даже собственные результаты автора обеспечили довольно большой объем диссертации для этой специальности;

5. формула (3.22.17) введена неудачно. Не сразу понятно, что выбрана конкретная двумерная модель с безмассовыми фермионами, для которой известно решение, а не произвольная двумерная модель.

Соискатель Белоконь А.И. ответил на заданные ему вопросы, привел собственную аргументацию и высказал предложения по дальнейшему развитию исследования:

1. Аналитическое решение уравнения поля, следующего из действия (1.11.1), может быть получено, только если параметр β, представляющий собой нормированный на плотность энергии след тензора энергии-импульса вещества, выбран постоянным, тогда как в общем случае, когда он является функцией температуры $\beta(T)$, уравнение аналитически неразрешимо. Как показывает численный анализ, $\beta(T)$ в течение радиационно-доминированной стадии меняется в пределах от 10^{-3} до 10^{-2}. Чтобы получить качественное представление о характере эволюции скалярного поля с рассмотренным взаимодействием, мы в первом приближении взяли значение $\beta(T)=10^{-3}$ и получили аналитическое решение. Для расчёта количества тёмной материи в поздней Вселенной важна зависимость амплитуды поля от времени. Как видно из формул (1.22.7) и (1.22.8), временная часть амплитуды поля вообще не зависит от β на временах $t \gg 1/m$. По этой причине для получения оценки (1.22.17) допустимо использовать приближённое аналитическое решение. В свою очередь, при расчёте параметров первичного нуклеосинтеза в ранней Вселенной зависимость $\beta(T)$ существенна, и поэтому для получения соответствующих ограничений мы использовали численное решение уравнения поля со следом тензора энергии-импульса общего вида (1.2.22).

2. Метрический формализм и формализм Палатини являются двумя разными подходами к описанию ОТО. Последний по определению является подходом, в котором метрика и связность являются независимыми величинами. Выбор формализма Палатини в диссертационном исследовании обоснован желанием сохранить унитарность теории в рамках эффективного описания (соответствующие аргументация и ссылки приведены во Введении

и в Главе 2). Кроме того, феноменология аксионного поля, претендующего на роль тёмной материи, существенно зависит от значения параметра Хаббла H_I в инфляционную эпоху. В метрической формулировке инфляции на поле Хиггса масштаб H_I достигает значения порядка 10^{13} ГэВ, что не позволяет сделать из аксиона тёмную материю вследствие наблюдательных ограничений. В этой связи в литературе также рассматривается альтернативное описание инфляции на поле Хиггса в рамках формализма Палатини, в котором H_I может принимать значения вплоть до 10^8 ГэВ, что позволяет аксиону в рамках эффективной теории поля образовывать всю тёмную материю и удовлетворить экспериментальным ограничениям.

3. Как было верно отмечено, устоявшегося перевода многих терминов на русский язык из данной области не существует. Я согласен, что выбранный вариант перевода неудачный.

4. Согласен, что Введение можно было бы сделать более подробным. Ввиду обширности затронутых тематик и нетривиальности многих утверждений, используемых в современной литературе, их детальное обсуждение вывело бы объём диссертации за регламентированные рамки. В связи с этим я сделал акцент на тезисном формулировании основных утверждений и сопровождением их необходимыми ссылками на литературу.

5. Согласен с тем, что пояснение к формуле энтропии зацепленности двумерной конформной теории поля, представленной c копиями свободных безмассовых дираковских фермионов, стоило бы поместить перед выражением (3.22.17), потому что это является ключевым моментом, позволяющим исследовать энтропию зацепленности несвязных пространственно-подобных областей. В тексте автореферата этот недостаток был исправлен, а сам факт моделирования излучения Хокинга двумерными безмассовыми фермионными полями был отмечен в аннотации к соответствующему разделу автореферата и перед формулой (29), которая в тексте диссертации соответствует формуле (3.22.17).

На заседании 26 июня 2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Белоконю А.И. за решение научных задач, имеющих значение для космологии, физики чёрных дыр и неравновесной физики ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.3, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 11, против 2.

Заместитель председателя диссертационного
совета 24.1.167.02
доктор физико-математических наук
(распоряжение МИАН от 23.06.2025 № 1)

Печень Александр Николаевич

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.167.02
кандидат физико-математических наук,

Теретёнков Александр Евгеньевич

26 июня 2025 года