# ОТЗЫВ

официального оппонента, Фурсаева Дмитрия Владимировича, на диссертацию Александра Игоревича Белоконя «Динамика квантовых полей и их локализованных возмущений в искривлённых пространствах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика

В диссертационной работе А. И. Белоконя «Динамика квантовых полей и их локализованных возмущений в искривлённых пространствах» исследуется ряд моделей в космологии, а также свойства квантово-полевых моделей, применяемые для анализа современных гипотез об особенностях квантовой гравитации. Условно диссертацию можно разделить на две части, весьма разные по предмету исследований и характеру изложения. Первая часть связана с феноменологией ранней Вселенной и рассматривает физические следствия различных расширений Стандартной модели гипотетическими скалярными полями, которые могут играть роль инфлатона или источника темной материи. Другая часть работы чисто теоретическая и нацелена на проверку ряда эвристических утверждений о роли гравитации в расчетах квантового перепутывания подсистем, обособленных в пространстве. Такая структура диссертации, по моему мнению, не является ее недостатком, а, скорее, указывает на способность автора выполнять теоретические исследования по широкому спектру направлений.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав основного текста, так что главы содержат приложения с углублением в технические вопросы.

Работа завершается Заключением и Списком литературы, который содержит 372 наименования. Общий объём диссертации 199 страниц.

**Во Введении** обоснована актуальность исследования, определены цели и задачи работы, дан приведён обзор литературы и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В Главе 1** рассматривается вариант расширения Стандартной модели новым скалярным полем, взаимодействующим с остальными полями материи через специфическую связь со следом тензора энергии-импульса (ТЭИ). Модель интересна тем, что новое скалярное поле, может играть роль холодной тёмной материи в поздней Вселенной. Автор исследовал уравнения движения данного поля в радиационно-доминантной Вселенной Фридмана и показал, что взаимодействие со следом ТЭИ приводит к зависимости динамики такого поля от момента фазового перехода. Кроме этого, связь со следом ТЭИ приводит к эффективной разности масс нейтрона и протона, что надо учитывать при вычислении параметров первичного нуклеосинтеза. Поэтому специфическая связь нового гипотетического скалярного поля со следом тензора энергии-импульса ведет к ряду существенных следствий. Задачей автора было выяснить, будет ли данный вариант расширения Стандартной модели в принципе совместим с экспериментальными данными в каком-то секторе параметров. В ходе аналитического и численного анализа автором были получены ограничения на параметры поля и предложена модификация модели, совместимая с экспериментальными данными.

**В Главе 2** автор проводит анализ интересной модели, в которой с помощью дополнительного безмассового дилатонного поля и его связи с топологическим членом КХД обеспечивается инфляционный сценарий

Старобинского с полем Хиггса в подходе Палатини, решается «CP-проблема», а также генерируется темная материя. Рассматриваемая модель содержит около 10 свободных параметров. Основной задачей автора в этой главе является проверка того, что существует такое пространство параметров, при которых модель совместима с наблюдаемыми данными. Для этой цели автор находит конформное отображение, которое устраняет явные связи кривизны со скалярными полями, и гравитационный сектор теории принимает такой же вид как в гравитации Эйнштейна, вычисляет эффективный инфляционный потенциал и выводит в аналитической форме спектр первичных возмущений.

**В Главе 3** исследуется энтропия перепутывания (энтропия «зацепленности», в терминологии автора) в конформной теории поля безмассовых фермионов в 2-мерном пространстве-времени, которое может быть конформно отображено на 2-менную часть пространства-времени заряженной 4-мерной черной дыры. Это описание эквивалентно вычислению энтропии перепутывания в соответствующей 4-мерной КТП на фоне вечной заряженной черной дыры в приближении s-мод. Энтропия перепутывания вычисляется на различных пространственно-подобных поверхностях (временных сечениях), пересекающих горизонты черной дыры. Усреднение по квантовым состояниям проводится внутри конечных областей со сферическими границами на постоянном расстоянии от горизонта черной дыры. Выбирая разные временные сечения для расчета энтропии можно условно говорить о «динамике» энтропии. Цель автора проверить в этом приближении, как выполняются для данной энтропии неравенства, следующие из условия сильной субаддитивности, а также проверить как неравенства меняются, если следовать «островной формуле» (0.00.2), предписывающей учет вклада в энтропию от так называемых островов перепутывания. Нарушение субаддитивности

интерпретируется как нарушение унитарности. Автор показывает, что при определённых значениях заряда чёрной дыры субаддитивность не нарушается даже без использования «островной формулы». Вычисления по «островной формуле» требуют рассматривать вариацию функционала, который включает классическую часть, пропорциональную площади границы «острова», и квантовую поправку в виде энтропии 2-мерной КТП. Данный функционал при определенных соотношениях заряда к массе черной дыры может не иметь экстремума.

**Глава 4** развивает подход, примененный в Главе 3, для случая квантовых полей на трёхмерном пространстве де Ситтера, редуцированных к 2-мерной эффективной теории. Анализируется «динамика энтропии излучения горизонта» и поправки к ней с учетом «островной» гипотезы. Автор показывает, что в рассматриваеой модели основные свойства энтропии не выполняются, а «островная» формула не всегда применима.

**Глава 5** посвящена исследованию эволюции плотности энергии и заряда, в состояниях, возникающих путем одномоментного локального воздействия на вакуумное состояние системы. В качестве модели рассматривается скалярное поле в 2-х и более измерениях. Если поле безмассовое, то такая теория является конформной, а полученные результаты могут быть проинтерпретированы на языке AdS/CFT соответствия как процессы, происходящие в гравитирующих системах в пространстве-времени на единицу большей размерности. Автор провел подробные вычисления в плоском пространстве, а также на 2-мерном пространстве, пространственные сечения которого являются окружностями (на «лоренцевом цилиндре»), исследовал и сравнил временные асимптотики возмущений в массивном и безмассовом случае.

Результаты вычислений в разных режимах наглядно представлены на многочисленных рисунках.

В **Заключении** приведён подробный анализ полученных в диссертационном исследовании результатов, а также подведены итоги и обозначены возможные направления их дальнейшего развития.

Конкретные замечания и вопросы по тексту данной диссертационной работы приведу по главам.

**Замечания по Введению.** Здесь автор проделал значительную работу, чтобы ввести читателя в проблематику достаточно разных направлений, которые рассматриваются в диссертации. В целом, Введение дает представление о контексте и актуальности исследований диссертационной работы. Однако здесь есть ряд неточностей и недостатков в используемой терминологии. Например, свойство однородности и изотропности Вселенной наблюдается на масштабах не порядка Мегапарсек, а на масштабах сотен Мегапарсек. Касаясь нарушения CP-четности в КХД, автор ошибочно связывает этот эффект с дипольным моментом электрона. Далее автор пишет, что отличительным свойством пространства де Ситтера является наличие горизонта и использует термин «геометрии с горизонтом». Такой термин не является правильным, поскольку горизонт событий - это не свойство геометрии, а свойство системы отсчета наблюдателей. В одном и том же пространстве могут быть системы отсчета с горизонтом («статические координаты» в пространстве де Ситтера) и системы отсчета без горизонта (координатные карты, покрывающие все пространство де Ситтера). Касаясь описания «островной формулы» (0.00.2), я не понимаю, как простанственную область вблизи черной дыры можно назвать «баней» или областью «где

собирается излучение»? Как может быть реализован процесс, когда наблюдатель «собирает излучение внутри своей причинной области»? Такого рода неточности являются следствием буквального перевода с английского языка определенных понятий, которые и в оригинале не всегда являются удачными. Считаю, что с определенным усилием можно было бы подобрать формулировки, не вызывающие отторжения.

**Замечания по Главе 1.** Связь в действии (1.11.1) со следом ТЭИ предполагает вклад от конформной аномалии ТЭИ, который приведет к дополнительным членам взаимодействия нового скалярного поля с кривизной пространства-времени. Эти слагаемые изменят уравнение движения (1.22.3) и, по-видимому, будут особенно существенны на раннем этапе из-за расходимости кривизны в радиационно-доминантной Вселенной в начальный момент времени. Интересно знать, как конформная аномалия ТЭИ влияет на заключения, сделанные автором в этой Главе.

В разделе 1.4 рассматривается скалярная модель с модифицированным потенциалом (1.44.1). Хотя данная модификация позволяет избежать ограничений, связанных с первичным нуклеосинтезом, возникает резонный вопрос о происхождении (1.44.1).

**Замечания по Главе 2.** Ключевым элементом анализа инфляционной модели, рассматриваемой в этой главе, является конформное отображение (2.33.6)-(2.33.9), от «йордановской» формы действия к «эйнштейновской». Это преобразование меняет метрику и скалярные поля. Хотя преобразование является традиционным способом теоретических исследования скалярно-тензорных теорий гравитации, остаются вопросы о наблюдаемых в данной конкретной модели:

- какая из двух метрик, связанных конформным преобразованием, является физической (например, в какой метрике уравнения движения свободных пробных частиц описываются стандартными уравнениями геодезических)?

- как меняются при отображении (2.33.6) юкавские связи с полем Хиггса в секторе полей Стандартной модели со спином ½, насколько существенны эти изменения для наблюдаемых эффектов?

- как учитывается конформная аномалия при отображении (2.33.6), и как связанные с ней вклады меняют гравитационный сектор, не возникают ли в связи с этим в (2.33.10) новые вклады между кривизной и скалярными полями?

**Замечания по Главам 3 и 4.** Попытки понять связь между гравитацией, термодинамикой и квантовым перепутыванием происходят с 70-х годов прошлого века. Удивительным кажется сам факт, что уже в рамках подхода «квантовые поля и классический гравитационный фон» были сделаны наблюдения, которые выходят за рамки полуклассического описания гравитации. Один из ярких примеров такого рода наблюдений - возможность использовать классическую формулу Бекенштейна-Хокинга для вычисления энтропии перепутывания в определенных квантовых системах. Многие продуктивные гипотезы, которые делаются в этом направлении, не имеют статуса строгих утверждений, но позволяют проверку на простых моделях и расширяют нашу интуицию. Такой подход кажется оправданным с учетом сложности доказательства унитарности процесса гравитационного коллапса в полноценной теории квантовой гравитации. Работа автора, результаты которой представлены в Главах 3 и

4, связана с проверкой на простых моделях «островной формулы» - одной из недавних гипотез, позволяющей обосновать унитарность на выходя за рамки полуклассических рассуждений.

«Островная формула» первоначально исследовалась в 2-мерных моделях, поэтому интерес представляют ее тесты в полноценной 4-мерной теории. В этом случае, однако, вычисления энтропии квантового перепутывания для локальных областей является технически сложной задачей. В главах 3 и 4 автор стартует с 4-мерной или 3-мерной теорий, но ограничивается рассмотрением s-мод.

Известно, что, например, в скалярном случае s-моды дают вклад в мощность излучения Хокинга черной дыры на уровне до 90 %. Сам по себе этот факт не является основанием, чтобы в расчетах энтропии рассматривать вклад s-мод как определяющий. Причина в том, что суммирование вклада всех остальных мод в энтропию ведет к появлению более сильной (степенной, а не логарифмической, как в случае s-мод) расходимости. Данные расходимости носят ультрафиолетовый характер и для полей спина ½ устраняются перенормировкой постоянной Ньютона. К сожалению, этот аспект расчетов автором не обсуждается.

Определенный скептицизм вызывает принятая в работе точка зрения, что нарушение неравенства (3.22.21), следующего из субаддитивности, можно трактовать как нарушение унитарности. Дело в том, что в работе рассматривается вечная черная дыра (что физически возможно, когда черная дыра за счет определенных условий находится в тепловом равновесии с излучением). Временная динамика, исследуемая в работе, это не эволюция системы, а выбор разных пространственно-подобных сечений в одном и том же состоянии.

Касаясь Главы 4, замечу, что формула (4.22.15) повторяет (3.22.17). У меня есть сомнение, что для 3-мерного пространства де Ситтера формула (4.22.15) может применяться, и что есть проблема с выполнением условия

чистоты. Частично мои аргументы совпадают с замечанием самого автора после (4.33.6). Дело в том, что сечения постоянного времени в 3-мерном пространстве де Ситтера являются 2-мерными сферами. Если считать полярный угол фиксированным (что формально воспроизводит метрику для s-моды), то соответствующая конформная теория оказывается заданной на окружности. В этом случае вместо (4.22.15) надо пользоваться выражением для энтропии на дуге окружности, см. формулу (31) в работе P. Calabrese and J. Cardy, "Entanglement entropy and conformal field theory", e-Print: 0905.4013 [cond-mat.stat-mech]. То есть, кажется, что расчеты автора не учитывают топологию поверхностей постоянного времени в пространстве де Ситтера. Как следует из Заключения автора к Главе 4, он приходит к похожему мнению о неприменимости (4.22.15).

В разделе 4.2.3 автор пишет «Несмотря на успешное разрешение информационного парадокса для чёрных дыр, на данный момент существует проблема применения островного предписания в пространстве-времени де Ситтера.» Я не думаю, что информационный парадокс для черных дыр успешно разрешен.

Автор оперирует понятием «информационный парадокс» применительно к квантовой теории поля в пространстве де Ситтера. Однако четкой формулировки этого парадокса ни в этой Главе, ни во Введении он не дает. В разделе 4.4.1 парадокс потери информации связывается с ситуацией, когда «… энтропия зацепленности теплового излучения, исходящего от космологического горизонта, вследствие постоянного роста превышает его термодинамическую энтропию…». Не могу принять эту формулировку хотя бы по той причине, что космологический горизонт - это понятие, которое зависит исключительно от выбора системы отсчета и не имеет выделенного положения. В случае коллапсирующей черной дыры этот не так: пространство является асимптотически плоским, имеется световая бесконечность будущего,

отделенная горизонтом, и можно показать что на этой бесконечности есть ненулевой поток излучения Хокинга.

Я не ставлю под сомнение полезность исследований автора, представленных в Главе 4, их мотивированность, но считаю, что над интерпретацией полученных результатов стоит еще работать.

**Замечаний по Главе 5 и Заключению** не имею.

Высказанный мною выше критицизм не умаляет научной значимости полученных результатов и может рассматриваться как рекомендация для дальнейших исследований.

Работа А. И. Белоконя представляет собой исследование, охватывающее широкий круг задач теоретической физики, связанных с квантовой теорией поля в искривлённом пространстве-времен. Автор хорошо знает литературные источники, владеет современными теоретическими методами в квантовой теории поля и классической гравитации. Понимание существующих подходов, позволяет автору самостоятельно формулировать собственные задачи. Результаты, полученные автором в данной диссертации, являются оригинальными и актуальными, вносят вклад в решение таких задач как объяснение природы темной материи и проблемы унитарной эволюции системы при наличии черных дыр. Результаты диссертационной работы опубликованы в пяти статьях в международных рецензируемых журналах, представлялись на научных семинарах, российских и международных конференциях

Считаю, что диссертационная работа А. И. Белоконя «Динамика квантовых полей и их локализованных возмущений в искривлённых пространствах» соответствует всем требованиям, установленным к

кандидатским диссертациям постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, А. И. Белоконь, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика.

Официальный оппонент:
Фурсаев Дмитрий Владимирович

доктор физико-математических наук, специальность 01.04.02,
ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований,
адрес: 141980, Московская область, город Дубна, ул. Жолио Кюри, д. 6 ,
электронная почта: fursaev@theor.jinr.ru

10 июня 2025 г.

Подпись:

Подпись Д.В. Фурсаева заверяю.

О.В. Теряев

Заместитель директора Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований