ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Морозова Андрея Алексеевича, на диссертацию Александра Игоревича Белоконя «Динамика квантовых полей и их локализованных возмущений в искривлённых пространствах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика

Современные исследования в области теоретической физики сталкиваются с необходимостью объяснения феноменов, характерных для теории поля в искривлённом пространстве и не проявляющихся в пространстве Минковского. В диссертации А. И. Белоконя в этом контексте охватывается широкий круг задач, которые делятся на несколько смысловых блоков, включающих феноменологическую проверку различных моделей тёмной материи в ΛCDM подходе в космологии, исследование квазиклассических эффектов в гравитации через изучение свойств энтропии излучения Хокинга в моделях многомерных чёрных дыр с использованием недавно предложенного «островного предписания», а также описание динамики различных корреляционных функций в возбуждённых состояниях, задаваемых локальными операторными вставками.

Диссертация состоит из **Введения**, **пяти глав**, **Заключения** и **Списка литературы**, который содержит 372 наименования. Некоторые технические детали конкретных вычислений отнесены в **Приложения** в конце соответствующих глав.

Во **Введении** приводится подробный обзор текущего состояния рассматриваемых задач в современной литературе, даётся обоснование актуальности исследований и их научной новизны, сформулированы положения, выдвигаемые на защиту, а также описана структура диссертации.

Первая глава посвящена описанию модели тёмной материи, представленной ультралёгким скалярным полем, взаимодействующим с гидродинамическим тензором энергии-импульса полей Стандартной модели. Данная модель, мотивированная динамикой свободного массивного скалярного поля в расширяющейся Вселенной Фридмана-Робертсона-Леметра-Уокера, а также различными моделями аксионов в Стандартной модели и теории струн, предсказывает нетривиальные динамические эффекты в ранней и поздней Вселенной вследствие влияния такого типа взаимодействия на значения фундаментальных констант физики элементарных частиц, что отражается, в частности, на количестве гелия, появившегося в результате первичного нуклеосинтеза в горячей Вселенной. Такое взаимодействие также значительно подавляет амплитуду поля, что влечёт дополнительные феноменологические ограничения на параметры модели, следующие из наблюдательных данных по плотности энергии холодной тёмной материи в поздней Вселенной. В работе проведён аналитический и численный анализ уравнений поля, изучены ключевые феноменологические аспекты — количество синтезированного гелия в ранней Вселенной и момент фазового перехода поля. На основе полученных результатов предложена модифицированная версия исходной модели, в которой экспериментальные ограничения, включающие наблюдательные данные по нуклеосинтезу и плотности тёмной материи, самосогласованно удовлетворены.

Во **второй главе** обсуждаются феноменологические свойства модели холодной тёмной материи, представленной голдстоуновским полем спонтанно нарушенной масштабной инвариантности. Данное поле служит одновременно двум целям: во-

первых, оно вводится для сохранения масштабной инвариантности Стандартной модели при высоких энергиях, а во-вторых, ему приписывается взаимодействие, схожее со взаимодействием аксионного поля с топологическим членом калибровочных полей квантовой хромодинамики, что позволяет объяснить таким полем холодную тёмную материю. Благодаря введению квадратичного взаимодействия полей дилатона и Хиггса с кривизной пространства-времени в данной модели воспроизводится сценарий космологической инфляции Старобинского на достаточно низком энергетическом масштабе, при котором безмассовое поле тёмной материи не образует ненаблюдаемых в эксперименте возмущений изокривизны. Данные ограничения являются основным препятствием для построения аксионных моделей тёмной материи. В завершении главы показывается, что в такой модели возмущения изокривизны естественным образом подавляются, воспроизводится корректный спектр первичных возмущений инфляции, а плотности энергии поля дилатона в поздней Вселенной достаточно для объяснения им всей наблюдаемой тёмной материи.

В **третьей главе** рассматривается динамика энтропии зацепленности в модели электрически заряженной чёрной дыры Райсснера-Нордстрёма с учётом вклада острова, представленного односвязной пространственно-подобной областью. Глава начинается с введения и объяснения основных формул и концепций, согласно которым строится изучаемая модель. Основные упрощающие предположения содержат приближение s-волны, которое сводит исходную четырёхмерную задачу к эффективной двумерной, а также приближение формулы для энтропии четырёхмерного излучения Хокинга энтропией зацепленности двумерной конформной теории поля, представленной безмассовыми свободными дираковскими фермионами. Также в начале главы вводится достаточное условие отсутствия нарушения унитарности оператора эволюции представленной квантовой системы, которое затем используется для анализа информационного парадокса в данной модели. В главе рассматриваются области конечной

протяжённости, в которых собирается излучение, и анализируется динамика энтропии, ассоциированной с этими областями, а также её зависимость от значения электрического заряда чёрной дыры. Было продемонстрировано, что для произвольной конечной области всегда можно найти такое значение заряда, при котором упомянутое выше достаточное условие выполнено без привлечения дополнительных предположений. В завершении главы анализируется динамика энтропии конечных областей в контексте островного предписания и показывается, что острова либо приводят к разрывному поведению энтропии при малом заряде, либо вообще не вносят доминирующего вклада в энтропию при больших значениях заряда.

В **четвёртой главе** изучаются свойства энтропии зацепленности излучения Хокинга космологического горизонта, которое собирается в конечных и полубесконечных областях в модели частично редуцированного трёхмерного пространства де Ситтера, а также обсуждается информационный парадокс в данной модели. Как и в предыдущей главе, для вычисления энтропии излучения Хокинга использовалось приближение двумерными безмассовыми дираковскими фермионами. Такая постановка задачи характерна для современной литературы, посвящённой изучению информационного парадокса в пространстве де Ситтера. В данной главе диссертации было показано, что в такой модели основные свойства энтропии не выполняются. Были рассмотрены несколько типов конечных областей и ассоциированных с ними островных конфигураций, на примере которых было показано, что введение в рассмотрение островов либо не влияет на динамику энтропии, либо не решает парадокса там, где он потенциально может возникнуть.

В **пятой главе** описывается динамика корреляционных функций различных наблюдаемых скалярного поля в локально возбуждённых состояниях, создаваемых операторными вставками в предписании операторного локального

квенча. В начале главы подробно описываются известные в литературе результаты для двумерной конформной теории поля, а также демонстрируется, как эти результаты могут быть получены без опоры на конформную симметрию. Далее этот анализ распространяется на массивное скалярное поле в двумерном пространстве Минковского, а также на массивные и безмассовые поля в многомерном. В многомерном случае проведено сравнение полученных результатов с ответами, известными из голографии. В конце главы показывается, что в случае лоренцева цилиндра корреляционные функции демонстрируют иррегулярное поведение на больших временах, что представляется интересным результатом в контексте изучения квантового хаоса.

В **Заключении** представлено обсуждение полученных в диссертации результатов, а также намечены наиболее интересные направления дальнейших исследований по тематике диссертации.

Оценивая работу, можно сказать, что диссертация А. И. Белоконя является законченным исследованием по широкому спектру задач теоретической физики, связанных с квантовой теорией поля в искривлённых пространствах и квазиклассической гравитацией. Следует отметить последовательность и детальность подачи материала, а также ясность изложения и аккуратность оформления текста диссертации. Автор всегда детально и всесторонне описывает то, что было получено в литературе до него, делая ясными мотивацию работы и изложение новых результатов. Полученные в ней выводы являются новыми и полностью обоснованными результатами по актуальным проблемам теоретической физики. Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых международных научных журналах и доложены на многочисленных семинарах и конференциях.

В качестве замечаний хотел бы отметить следующее:

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. Понятно ли, с какими физическими эффектами связано исчезновение острова при рассмотрении энтропии состояний, связанных с черными дырами? Будет ли это происходить для всех черных дыр (вращающихся и не вращающихся, заряженных и не заряженных)?

4. Есть ли идеи о том, как посчитать энтропию запутанности в многомерных теориях, не прибегая к различным приближениям, позволяющим свести их к двумерному случаю, но, тем самым, не дающих точного ответа?

5. Понятно ли, какого вида поправки будут к энтропии запутанности, в связи с тем, что четырехмерная гравитация не в точности соответствует двумерной конформной теории поля? Приведет ли это к увеличению или уменьшению полученной в работе энтропии?

6.В тексте присутствуют опечатки, но в незначительных для текста такого размера количествах.

Указанные замечания не влияют на ценность большой проделанной работы и общую высокую оценку диссертационной работы и не снижают научное значение полученных результатов.

Учитывая вышесказанное, считаю, что диссертационная работа А. И. Белоконя “Динамика квантовых полей и их локализованных возмущений в искривлённых

пространствах” соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2014 года, а её автор А. И. Белоконь заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика.

Официальный оппонент:
Морозов Андрей Алексеевич
Доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.02-теоретическая физика
В.н.с. ИППИ РАН,
127051, г. Москва, Большой Каретный переулок, д.19 стр. 1.
Morozov.andrey.a@iitp.ru

Зам. директора ИППИ РАН

127051, г. Москва,
Б. Каретный пер., д. 19, стр. 1
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
им. А.А. ХАРКЕВИЧА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК