

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Юрова Артема Валериановича на диссертационную работу Головнева Алексея Валерьевича «Модифицированные теории гравитации в космологическом контексте», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Актуальность темы. Обнаружение ускоренного расширения вселенной по данным наблюдений за сверхновыми типа Ia поставило на повестку дня важнейший вопрос о физической природе темной энергии – гипотетической субстанции с паскалевым отрицательным давлением. С одной стороны, это открытие породило ряд фундаментальных проблем, важнейший из которых, в случае если темная энергия суть положительная космологическая постоянная, малость наблюдаемой величины в сравнении с квантово-полевыми предсказаниями. С другой, колоссальный вклад темного сектора в плотность в сравнении с барионной материей, позволил прийти к удовлетворительному согласию с инфляционной теорией, предсказывающей с высокой точностью плоскостность вселенной, выглядящей совершенно непонятно при наличии только барионов, обеспечивающих лишь пять процентов от критической плотности. Если темная энергия (ТЭ) составляет около 70% всего содержимого наблюдаемой вселенной, то около 25% приходится на загадочную темную материю (ТМ), с барионным уравнением состояния, т.е. с исчезающим давлением. Это актуализировало вопрос о поиске подходящих кандидатов на роль частиц темной материи, который оказался чрезвычайно непростым. Данные полученные на БАК фактически не оставили шансов для популярной и элегантной модели легчайших суперпартнеров, что выглядит злой иронией, поскольку одинаковые по порядку величины массы для этих частиц (порядка ТэВ) предсказывались из двух совершенно разных источников: из попыток объяснения наблюдаемого количества ТМ в предположении о тепловом равновесном механизме генерации суперпартнеров и из соображений стабилизации радиационных поправок к массе бозона Хиггса. Вторая популярная модель – аксионов, пока не подтверждается экспериментом и сверх того, многие правдоподобные с физической точки зрения модели уже надежно исключены.

В отличие от ТМ, ТЭ достаточно уверенно интерпретируется, как ненулевая положительная плотность вакуумной энергии, т.е. космологическая постоянная. Измерения параметра уравнения состояния дают величину чрезвычайно близкую к Деситтеровской минус единице.

Сверх того, загадка малости получает естественное объяснение в рамках антропного принципа, как отметил еще Вайнберг. Вместе с тем, многие физики и космологи выражают неудовлетворенность антропными объяснениями и требуют наличия более традиционных причин для экстремальной малости космологической постоянной по сравнению с квантово-полевыми оценками. Содержательная мотивация такой точки зрения, конечно, опирается не на личные вкусы и пристрастия, а скорее на то, что использование антропных объяснений (и антропных предсказаний – это разные вещи с точки зрения байесовского анализа) имеет смысл только в мультиверсе. Хотя мультиверс практически неизбежен в рамках инфляционной парадигмы, его существование имеет смысл лишь при наличии корректной меры, а загадка задания меры до сих пор остается открытой, по сути, делая невозможным какие-либо численные оценки!

При наличии таких фундаментальных проблем с темным сектором, кажется естественным изучение совсем другой парадигмы – предположения, что на больших масштабах гравитация описывается некоторой модификацией традиционных уравнений Эйнштейна. Это направление получило название модифицированной гравитации и является предметом чрезвычайно бурно развивающейся области космологии, по сути альтернативной к традиционной. Хотя автор этих строк остается приверженцем «обычной» теории гравитации (по причинам, излагать которые в рецензии неуместно), нелепо спорить, что развитие моделей модифицированной гравитации чрезвычайно интересно и важно, соответственно, актуальность темы диссертации А.В. Головнева «Модифицированные теории гравитации в космологическом контексте» не вызывает никаких сомнений.

Содержание диссертации. Содержание диссертации составляют введение, пять глав, заключение и список литературы. В приложении приведены публикации автора по теме диссертации. Общий объем работы составляет 298 страниц, библиография включает 247 источников, без учета работ автора.

Во введении обоснована актуальность работы и сформулирована глобальная цель исследования для достижения которой поставлено восемь локальных задач: 1) изучение моделей инфляции с векторным инфлатоном, 2) исследование устойчивости таких моделей и возможности их обобщения при отсутствии таковой, 3) проведение гамильтонова анализа моделей массивной гравитации и установление наличия или отсутствия духового поля Боулвара-Дезера, 4) изучение роли, которую играет неоднозначность

извлечения квадратного корня из матрицы в теориях массивной гравитации, 5) построение общих методов гамильтонова анализа биметрических теорий, в которых тензор кривизны порождён связностью Леви-Чивита вспомогательной метрики, 6) нахождение методов описания биметрических теорий Амендолы - Энквиста – Койвист, 7) исследование проблемы локальной лоренц-инвариантности в телепараллельной гравитации и 8) развитие скалярно-тензорного описания модели миметической темной материи. Наконец, во введении сформулированы десять (10) результатов выносимых на защиту, представлена научная новизна и значимость исследования, представлена исчерпывающая информация об апробации работы и подчеркнута, что содержание диссертационного исследования представлено в 18 печатных работах в изданиях входящих в базы данных "Web of Science" и "SCOPUS".

В первой главе диссертации содержится вводный обзор в теорию гравитации и теоретическую космологию. Хотя эта глава не содержит результатов выносимых на защиту, ее наличие представляется нам важным и оправданным. Действительно, работа посвящена моделям модифицированной гравитации или (как сейчас часто говорят) расширенной теории гравитации. Такие модели имеют более широкий (по сравнению с «обычным») контекст геометрических теорий, с метрической и аффинной структурами, включая телепараллельный эквивалент – теорий в которых гравитация основана на использовании кручения (определяемого антисимметричной частью коэффициентов связности), а не кривизны.. Так же полезно простое, но содержательное изложение АДМ формализма. Что касается «космологической» части обзора, то следует иметь в виду, что основная задача поставленная автором: дать более-менее убедительную мотивировку обращения к моделям модифицированной гравитации для объяснения (в первую очередь!) загадки темного сектора, составляющего порядка 95% (!) материального содержания вселенной, в рамках «обычной», т.е. не модифицированной гравитации.

Как уже отмечалось выше, здесь мы имеем дело с двумя проблемами. Во-первых, темная материя. Помимо трудностей с обнаружением соответствующий слабо-взаимодействующих частиц на ускорителях, есть проблемы и с наблюдательной космологией. Скажем, как отмечено в диссертации моделирование в рамках гипотезы холодной ТМ приводит к слишком большому числу спутников у гигантских галактик типа Млечного Пути, к профилям с сингулярным распределением плотности материи в центре галактики вместо наблюдаемого гладкого ядра (cusp vs. core) и некоторым другим проблемам. Более того, как справедливо подчеркивает

автор, внутри-галактическая динамика удивительно хорошо описывается феноменологической формулой типа MOND. Это показывает, что гипотезы позволяющие модифицировать модель холодной ТМ (скажем теплая ТМ или сверхлегкие аксионы) выглядят весьма неестественно. Соответственно, с точки зрения диссертанта, все более правдоподобными и многообещающими становятся не попытки видоизменить физическую модель ТМ, а скорее непосредственное обращение к моделям модифицированной гравитации. И хотя автора этих строк, вся представленная аргументация не убеждает в полной мере, следует признать, что диссертант добился поставленной им в первой главе цели, изложив ясную и достаточно убедительную мотивировку обращения к моделям модифицированной гравитации.

Вторая глава посвящена инфляции с векторными полями. Следует подчеркнуть, что изучение таких моделей было фактически инициировано совместной с Мухановым и Ванчуриным статьей диссертанта 2008 года, что делает совершенно очевидными актуальность и новизну представленного в этой главе материала. Важность этой темы на период 2008 года опиралась на то, что скалярный бозон Хиггса был еще не обнаружен и потому вопрос о реальном наличии скалярных полей повисал в воздухе. Тем не менее, введение векторных полей не было популярным из-за трудностей с наличием режимов медленного скатывания, а также с существенной анизотропизацией расширения. Для решения первой проблемы использовалась тонкая подстройка тахионной массы, что, конечно выглядело «смертельно» для теорий векторной инфляции. В упомянутой совместной работе автора, эта, казалось бы «неподъемная» задача, была изящно решена путем использования неминимального взаимодействия, описываемого в лагранжиане членом пропорциональным скалярной кривизне и квадрату векторного поля. Несмотря на то, что эти модели оказались фатально неустойчивыми, их важность трудно переоценить – именно они послужили основой для других, значительно более жизнеспособных моделей, построение которых является сейчас важной частью теоретической космологии.

Третья глава диссертации посвящена ряду вопросов теории массивной гравитации де Рам-Габададзе-Толли. Одной из проблем массивной теории гравитации в первоначальном варианте Фирца и Паули, как известно, является то, что в ней не сохраняется непрерывность предела при стремлении массы гравитона к нулю. Для решения этой проблемы Вайнштейн предложил использовать нелинейность в кинетической части действия для поля. Тем не менее, это порождает, возможно, другую серьезную проблему – в теории с нелинейностью в кинетической части

действия могут появиться духовые поля. Первый раздел главы содержит анализ проблемы теории Фирца-Паули. Далее рассматривается теория дРГТ и доказательство отсутствия духовых полей в ней, предложенное Хассаном и Розен. Недостаток этого доказательства заключается в том, что оно допускает свободу в выборе квадратного корня из матрицы. Автором предложен оригинальный подход к доказательству отсутствия духовых полей, основанный на введении вспомогательных тензорных полей в теорию дРГТ. В качестве опорной метрики выбирается метрика Минковского. В этом случае число степеней свободы оказывается строго меньше шести. Следует отметить полезность раздела 3.4, где обсуждаются некоторые вопросы теории матриц, в частности, проблема континуального множества корней при извлечении квадратного корня из матрицы. Эту проблему можно обойти, записав действие для массивной гравитации без явного введения квадратного корня из матрицы, связанной с метрикой. Уравнения для переменных, через которые записывается действие, оказываются разрешимыми. Замечательным является то, что предложенный автором метод можно применить для анализа возмущений метрики около нестандартных корней, где обычный подход не работает. Этот случай подробно рассмотрен как на примере простой модели с двумя измерениями, так и в реалистичном пространстве-времени. В разделах 3.7-3.8 автором описаны космологические решения в рамках массивной гравитации с квазидилатонным полем. Главным результатом здесь является то, что в спектре космологических возмущений возникает духовая мода, т.е. теория оказывается нежизнеспособной. Хотя этот результат и является отрицательным, важность его несомненна.

В следующей главе автор обращается к более общим биметрическим теориям гравитации, не связанным с массивной теорией. В начале рассматривается вариационный биметрический принцип. Действие для такой теории содержит две метрики, одна из которых определяет аффинную связность, а другая меру интегрирования и взаимодействие с материей. В простом варианте рассмотрение возмущений приводит к выводу, что возникают духовые моды. Произвольная вспомогательная метрика не позволяет построить приемлемую теорию. Проведен АДМ анализ некоторых более сложных теорий (с нелинейными функциями по кривизне, теория со слагаемым Эйнштейна-Гильберта) и показано, что они также несвободны от духовых полей. Однако, если ограничить допустимые вариации вспомогательной метрики, можно построить приемлемую с физической точки зрения теорию. Пример такого рода (когда две метрики отличаются только конформным преобразованием) рассмотрен в конце раздела 4.2. В

заклучении главы рассмотрен пример нелокальной гравитации в рамках биметрического формализма.

Интерес представляет собой **пятая глава** диссертационной работы, где рассмотрены ряд вопросов, касающихся некоторых теорий модифицированной гравитации и квантовой гравитации. В разделе 5.1 представлена ковариантная формулировка телепараллельной гравитации в нескольких вариантах путем явного введения спин-связности в действие. В следующем разделе рассмотрена миметическая модель темной материи, предложенная автором в работе, которая явилась второй работой по миметической гравитации. В метрику в действии Эйнштейна-Гильберта вводится дополнительное скалярное поле. Вклад в тензор энергии-импульса от дополнительной степени свободы может быть интерпретирован как темная материя. Рассмотрена и эквивалентная формулировка модели с множителем Лагранжа. Эта формулировка, предложенная автором, ныне используется во многих статьях, посвященных миметической гравитации.

Отдельно хочется остановиться на оригинальном подходе автора к решению, так называемого, информационного парадокса черных дыр, описанного в пятом параграфе пятой главы. В настоящее время, ситуация с этим вопросом весьма накалилась в свете формулировки парадокса AMPS. Суть дела в том, что после истечения времени Пэйджа (пропорционального кубу массы черной дыры) практически вся информация должна излучиться наружу – за пределы горизонта событий. Это означает наличие квантовой перепутанности элементов раннего хокингского излучения (находящихся на достаточном удалении от горизонта) с элементами позднего, находящимися вблизи горизонта, в области, которую, вслед за автором будем называть зоной. С другой стороны, свободно падающий наблюдатель должен обнаружить перепутанность между хокингскими частицами в зоне и внутри черной дыры, поскольку, согласно принципу эквивалентности, он не видит никакого горизонта. Тем самым нарушается моногамия запутанности: находясь сначала вдали, а потом и вблизи горизонта наблюдатель должен обнаружить перепутанность раннего хокингского излучения с излучением в зоне, но ЭТОТ ЖЕ наблюдатель может избрать другую стратегию и обнаружить перепутанность между излучением в зоне и внутри черной дыры. Тем самым, популярный принцип дополнительности Сасскинда не срабатывает, несмотря на всю свою экзотичность! Создается четкое ощущение того, что этот мысленный эксперимент свидетельствует о необходимости весьма мощной ревизии нашего понимания физики черных дыр, ревизии граничащей с революцией.

За прошедшие несколько лет было предложено немало радикальных идей для разрешения этого парадокса: от гипотезы «огненной стены», предложенной авторами парадокса AMPS, до допущения исчезновения информации (Унру, Уолд), от экстравагантной гипотезы ЭПР=ЭР (Сасскинд, Малдасена) до допущения о наличии макроскопических (!) квантовых суперпозиций черных дыр (Hsu), от предположения о модификации принципа неопределенности Гейзенберга (Cpen, Ong, Yeam) до заключения о том, что горизонты вообще отсутствуют (Хокинг; Типлер).

Автор диссертации предложил тоже экстравагантный, но все-таки более скромный (а значит, скорее всего, и более реалистичный) подход к проблеме. По его мысли, раннее хокинговское излучение понемногу запутывается с квантовой пеной и это автоматически снимает парадокс AMPS. На этом пути автору удалось успешно получить оценку времени Пэйджа и (более спекулятивно) времени «переваривания». Несмотря на то, что это только качественные оценки, опирающиеся на ряд предположений (скажем, возможность моделирования пены на основе теории случайных блужданий), полученные соотношения – впечатляют. Можно думать, что соображения автора действительно способны приоткрыть в будущем дорогу для содержательного решения парадокса AMPS.

Диссертация А.В. Головнева не свободна и от некоторых недостатков:

1) Не всегда удачен использованный стиль изложения в тексте диссертации. Например, на странице 129 автор пишет: «Печальная новость заключается в том, что...» Совершенно понятно, что автор подразумевает то, что в теории возникают проблемы, но приведенное выражение, наверное, более уместно в ходе дискуссии на семинаре, а не в тексте диссертационной работы. На странице 137 и в ряде других мест говорится о «духе Бульвара-Дезера». Было бы лучше написать, как представляется, о «духовом поле Бульвара-Дезера». Опять-таки же, с физической точки зрения ясно, о чем автор хотел сказать, но такая вольная терминология несколько вредит литературности изложения.

2) Не совсем также понятно, почему в тексте диссертации слова в словосочетаниях «темная материя», «темная энергия», «черная дыра» пишутся с прописной буквы. В русскоязычной научной литературе принято написание со строчных букв.

3) В главе 4, к сожалению, не обсуждаются космологические приложения рассмотренных теорий биметрической гравитации. Это несколько контрастирует с изложением в предыдущей главе, где рассмотрены космологические решения с расширенным квазидилатонным

полем. Представляет интерес возможность получения решений с ускоренным расширением в биметрических теориях, возможность космологической инфляции в них.

Разумеется, указанные замечания носят косметический характер и не снижают общей весьма высокой оценки диссертационной работы А.В. Головнева. Результаты диссертации опубликованы в ведущих журналах, их достоверность и новизна сомнений не вызывает. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Считаю, что диссертация Головнева Алексея Валерьевича «Модифицированные теории гравитации в космологическом контексте», удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
(01.04.23 – физика высоких энергий),
директор института физико-математических
наук и информационных технологий
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Балтийский федеральный университет
им. И.Канта» (ФГАОУ ВО БФУ им.И.Канта)

Юров Артем Валерианович

05 марта 2018 года



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет им. И.Канта» 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, д. 14, Тел.: +7 (4012) 33-82-17, +7 (4012) 46-58-13
e-mail: AIUrov@kantiana.ru

