

ОТЗЫВ

официального оппонента Фурсаева Дмитрия Владимировича на диссертацию Колганова Никиты Михайловича на тему «Физика ранней Вселенной: модифицированные теории гравитации и неравновесные явления», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

Актуальность. Тема исследований диссертации Колганова Н.М. связана с поиском способа преодоления фундаментальных проблем теории гравитации и космологии. Одной из ключевых проблем в этих областях физики является описание явлений на планковских масштабах, где не работают стандартные методы квантования. С учетом того, что природа темной энергии и темной материи также остается до сих пор непонятой, можно ожидать, что и на больших космологических масштабах классическая гравитация отличается от теории Эйнштейна. По этой причине в современной научной литературе активно изучаются модифицированные теории гравитации, которые могли бы быть применимы для описания как крупномасштабной структуры Вселенной так и квантовых эффектов. Данная диссертация является актуальной, посвящена разработке и анализу одной из версий модифицированных теорий — обобщенной унимодулярной гравитации. В диссертационной работе также развиваются методы вычисления наблюдаемых величин в квантовой космологии, которые могут применяться для сравнения теоретических предсказаний с экспериментальными данными.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трёх приложений. Объем диссертации — 164 страницы, включая 3 рисунка, список литературы содержит 56 наименований.

Обоснование актуальности темы диссертации, обзор современных модифицированных теорий гравитации и неравновесных явлений в контексте квантовой космологии дается во **введении**. Здесь же определяются цели и задачи диссертации, формулируются положения, выносимые на защиту, научная новизна и значимость полученных результатов.

Исследованию обобщенной унимодулярной гравитации посвящена **первая глава**. Автор показывает, что обобщенная унимодулярная гравитация обладает специфическими свойствами, отличающими ее от общей теории относительности. В обобщенной унимодулярной гравитации множество координатных преобразований сужается до преобразований, сохраняющих условие на компоненты метрики. Соответственно, по сравнению с ОТО дополнительная компонента метрики остается не фиксированной. Для разъяснения физической природы дополнительной степени свободы автор строит теорию возмущений на однородном изотропном фоне, получает квадратичное действие для скалярных и тензорных возмущений, и

демонстрирует, что на таком фоне дополнительная степень свободы отвечает за нетривиальный скалярный сектор. Для получения ограничений на параметры обобщенной унимодулярной гравитации автором в этой главе также вычислены спектры скалярных и тензорных возмущений, проведено сравнение теоретических предсказаний с экспериментальными данными. В заключительной части Главы предлагается ковариантная формулировка обобщенной унимодулярной гравитации, которая позволяет показать, что на классическом уровне уравнения движения этой теории эквивалентны уравнениям движения теории k -эссенции со специальным видом действия.

Вторая глава посвящена разработке и применению техники Швингера-Келдыша для описания неравновесных квантовых систем.

В этой главе разрабатывается формализм Швингера-Келдыша на случай произвольного начального состояния, задаваемого общей матрицей плотности. Цель автора — сформулировать описание неравновесных полевых систем. Для задания начального состояния системы предлагается использовать «гауссову» матрицу плотности. При этом, функциональные интегралы оказываются гауссовыми, что существенно упрощает анализ. В разделе 2.2.6 делается дополнительное предположение о матрице плотности, которое позволяет определить начальное состояние системы динамически, через евклидово действие. Мотивацией такого выбора является известная форма волнового состояния Хартла-Хокинга-Израэля. В рамках этого выбора автором, в частности, определяются общий вид функций Грина, характеризующих корреляционные свойства рассматриваемых систем, специальный базис, в котором фоковское пространство допускает корпускулярную интерпретацию. Благодаря этому выражения имеют ясную физическую интерпретацию в терминах средних чисел частиц и базисных функций. Интересно, что для «евклидовой» матрицы плотности выполняется соотношение Кубо-Мартина-Швингера, которое обычно связывают с равновесными системами. Это свидетельствует о том, что некоторые свойства равновесных систем могут быть обобщены на неравновесные системы с особым выбором начального состояния.

В **третьей главе** разрабатывается метод вычисления корреляционных функций в вещественном времени в квантово-механических системах, где возможны туннельные эффекты (то есть, оператор Лапласа для квадратичных возмущений имеет нулевые моды). Для этого производится обобщение диаграммной техники Швингера-Келдыша, пригодное для описания систем с туннелированием.

Для этой цели автор использует прием, который хорошо известен в теории возмущений для систем с инстантонами, адаптируя его для производящего функционала корреляционных функций в рассматриваемой задаче. Техническое препятствие, связанное с нарушением инвариантности относительно сдвигов во мнимом времени, преодолевается автором усреднением производящего

функционала по инстантонным модулям, после чего применяется стандартная техника, основанная на методе Фаддеева-Попова. Это дает возможность построения теории возмущений для вычисления корреляционных функций в тепловых состояниях систем с инстантонами, развить адекватную диаграммную технику и теорию возмущений.

В заключении собраны и представлены все результаты диссертации.

Результаты, полученные в диссертации Колганова Н.М., обладают научной **новизной**, корректно сформулированы и **обоснованы**. **Достоверность** результатов подтверждается последовательностью проведенных исследований и анализом полученных результатов, а также их согласованием с ранее известными научными данными. Результаты прошли апробацию на конференциях и семинарах, а также опубликованы в четырех статьях в рецензируемых научных журналах. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа продумана и хорошо изложена. В целом, текст написан с соблюдением литературного стиля и практически не содержит опечаток.

Конкретные **замечания** по тексту данной диссертационной работы приведу по главам.

Замечания по Главе 1. Мотивация автора для исследования обобщенной унимодулярной гравитации, понятна. Однако в диссертации не объясняется (за исключением беглого комментария после уравнения (1.227)), как могла бы возникнуть такая теория, является ли она эффективной, т.е. порождаемой в рамках какой-то более фундаментальной теории, или «самодостаточной», как общая теория относительности. В последнем случае, необходимо было бы сформулировать принципы обобщенной унимодулярной гравитации по аналогии, например, с принципом эквивалентности Эйнштейна. Это полезно сделать, чтобы понять совместимость данной теории с существующими экспериментальными данными.

В разделе 1.1 автор указывает на возможность строить решения уравнений обобщенной унимодулярной гравитации по известным решениям уравнений ОТО. Однако проведенный здесь анализ не учитывает наличия полей материи. Как меняются выводы работы, если включается взаимодействие с веществом? Можно ли построить это взаимодействие однозначным образом или результат зависит от системы отсчета? Этот момент является принципиально важным для интерпретации обобщенной унимодулярной гравитации, которая может быть проведена только в рамках определенной процедуры измерений и в конкретных системах отсчета. В других разделах, для выявления физического смысла переменных часто используются преобразования метрики. Однако при наличии фоновой материи такие преобразования могут иметь проблемы.

Замечания по Главе 2. Изложение Главы 2 начинается с введения «положительных» и «отрицательных» мод, см. уравнение (2.13), которые после преобразования (2.69) оказываются связаны с решениями, отвечающими (квази) частицам и античастицам. Однако математического определения «положительных» и «отрицательных» мод не дается. Логичнее было бы построить анализ, введя вначале произведение (2.102), которое является аналогом произведения Клейна-Гордона, и определить моды для частиц и античастиц в соответствии со знаком их нормы, как сделано в (2.103).

Стоит отметить, что рассуждения данной главы носят схематичный характер. Не хватает замечаний автора об условиях, при которых производимые выкладки возможны (например, условия обращения операторов и т.д.). Я предполагаю, что Глава 2 может относиться к описанию некалибровочных полей целых спинов. В случае с калибровочными полями возникнут обычные трудности, поскольку будут моды с нулевой нормой (2.102). Эти и другие моменты необходимо было бы прокомментировать.

Помимо примеров в разделе 2.3 было бы желательно рассмотреть хотя бы одно приложение развитого автором формализма к задачам космологии, которые и послужили основной его мотивацией.

Другие замечания по данной главе. Автор накладывает различные условия в начальные и конечные моменты времени. Думаю, что называть эти условия краевыми задачами типа Дирихле или Неймана значит противоречить общепринятой терминологии, когда под краевыми условиями подразумеваются условия на физических границах пространства. С точки зрения стиля изложения в этой главе излишним является частое начало предложений со слова «давайте».

Замечания по Главе 3. Основной недостаток этой главы в отсутствии примеров применения развитой здесь диаграммной техники, а также комментариев автора о ее применимости к квантово-полевым системам.

Автор использует термин «инстантонные системы», очевидно подразумевая, что это системы, в которых присутствует эффект квантового туннелирования. Соответствующие пояснения стоило бы дать.

Замечания по формулировке п 6. Заключение. Термин «евклидова матрица плотности» не является общепринятым. Хотя в тексте диссертации дано соответствующее определение, в Заключении стоило бы дать формулировку, используя более устойчивую терминологию.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, и, в частности, предлагают направления дальнейших исследований. На основе вышесказанного считаю, что диссертационная работа Колганова Никиты

Михайловича соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Колганов Н.М., заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Фурсаев Дмитрий Владимирович
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединённого института ядерных исследований
Адрес: 141980, Московская область, г. Дубна,
e-mail: fursaev@theor.jinr.ru

Подпись Фурсаева Дмитрия Владимировича заверяю

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ
А.В. Андреев

23 сентября 2024 г.

Список основных работ Фурсаева Д.В. по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Fursaev D. V., Pirozhenko I. G. Electromagnetic waves generated by null cosmic strings passing pulsars //Physical Review D. – 2024. – Т. 109. – №. 2. – С. 025012.
2. Fursaev D. V., Pirozhenko I. G. Electrodynamics under the action of null cosmic strings //Physical Review D. – 2023. – Т. 107. – №. 2. – С. 025018.
3. Fursaev D. V., Davydov E. A., Tainov V. A. A Note on Stress-Energy Tensor and Variational Principle for Null Strings //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2023. – Т. 20. – №. 3. – С. 528-530.
4. Davydov E. A., Fursaev D. V., Tainov V. A. Null cosmic strings: Scattering by black holes, optics, and spacetime content //Physical Review D. – 2022. – Т. 105. – №. 8. – С. 083510.
5. Fursaev D. V. Optical equations for null strings //Physical Review D. – 2021. – Т. 103. – №. 12. – С. 123526.
6. Fursaev D. V. Massless Cosmic Strings in Spacetimes with Global Parabolic Isometries //Physics of Particles and Nuclei. – 2020. – Т. 51. – №. 4. – С. 735-738.