

## ОТЗЫВ

официального оппонента Арефьевой Ирины Ярославны на диссертационную работу Агеевой Юлии Александровны "Космологические решения в скалярно-тензорной теории Хорндески", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - Теоретическая физика.

Диссертационная работа посвящена исследованию и построению несингулярных космологических сценариев ранней Вселенной, проблеме сильной связи в таких моделях и получению ограничений на параметры исходного лагранжиана теории.

На сегодняшний день инфляция является основным и самым правдоподобным сценарием эволюции ранней Вселенной. Теория инфляции последовательно объясняет и текущие космологические наблюдения. Тем не менее, альтернативные эпохи жизни ранней Вселенной также заслуживают рассмотрения. Во-первых, чтобы убедиться, что инфляция действительно имела место в далёком прошлом, все другие вероятные сценарии должны быть исключены. Во-вторых, теория инфляция, например, не может решить проблему начальной сингулярности. Оба этих факта являются мотивировкой к исследованию альтернативных инфляционной теории или дополняющих ее сценариев.

Цель и задачи данной диссертации формулируются в рамках теории Хорндески, а точнее — конкретного ее подкласса. Теория Хорндески — это наиболее общая скалярно-тензорная теория модификации гравитации с лагранжианами, содержащими производные второго порядка, однако приводящими к уравнениям поля, не содержащим производные выше второго порядка. Использование лагранжиана теории Хорндески позволяет построить необходимые космологические решения без начальной сингулярности. Действительно, как известно для построения несингулярных моделей ранней Вселенной зачастую требуется нарушение теоремы Пенроуза. Теорема заключается в следующем: во-первых, требуется выполнение так называемого изотропного условия энергодоминантности для рассматриваемой материи, а во-вторых, требуется некомпактность гиперповерхности Коши. Так, по теореме Пенроуза в будущем обязательно возникает сингулярность, если в пространстве имеется ловушечная поверхность. Оказывается, что выполнение этих условий применительно к пространственно плоской расширяющейся Вселенной, заполненной однородной и изотропной материей приводит к тому, что в такой Вселенной в прошлом будет сингулярность. Нарушая же условия теоремы Пенроуза сингулярности можно избежать. Одно из условий построения несингулярных конфигураций — это нарушение изотропного условия энергодоминантности. Это условие довольно сложно нарушить так, чтобы в получившейся теории не возникало ни духовых, ни градиентных неустойчивостей. Например, в случае скалярного поля с лагранжианом, содержащим только первые производные поля по времени и пространственным координатам, было показано, что нарушение изотропного условия энергодоминантности неизбежно влечёт за собой появление таких неустойчивостей. Этот и другие факты способствуют развитию интереса к теориям типа теории

Хорндески: в таких теориях возможно построение стабильных конфигураций, нарушающих изотропное условие энергодоминантности.

В диссертации Агеевой Ю. А. был использован подкласс теории Хорндески для исследования таких космологических сценариев ранней Вселенной как модель генезиса и Вселенная с отскоком. Первая — генезис — описывает изначально пустую (единственная существующая форма материи — скалярное поле из лагранжиана теории Хорндески) Вселенную, которая начинает свою эволюцию на бесконечном отрицательном времени и с плоского пространства Минковского, а затем постепенно плотность энергии скалярного поля начинает расти и при приближении к некоторому выбранному моменту времени генерируется переход на последующую стадию (инфляция или первичный разогрев). Вторая рассматриваемая возможность — модель Вселенной со сжатием и отскоком (от англ. «bounce» — отскок). В этой модели Вселенная изначально сжимается (параметр Хаббла отрицательный), затем в какой-то момент происходит отскок (смена знака параметра Хаббла) и далее — расширение (параметр Хаббла положительный). Как и в случае с генезисом, после отскока возможен переход как на инфляцию, так и на горячую стадию.

Главной же целью данной работы является исследование проблемы сильной связи в таких моделях ранней Вселенной. Действительно, в ряде работ было отмечено, что одним из возможных сценариев генезиса или Вселенной с отскоком, свободными от неустойчивостей во все космологические эпохи, являются те, в которых, на первый взгляд, возникает режим сильной связи на очень ранних временах и поэтому отпадает возможность описывать систему доступными классическими методами. Именно этот аспект и был рассмотрен в диссертации Агеевой Ю. А., чтобы убедиться, что классическое полевое описание эволюции Вселенной в эти ранние времена всё же возможно. Необходимо было убедиться в том, что несмотря на то, что эффективная масса Планка стремится к нулю в далеком прошлом (что и является наивным сигналом о возникновении сильной связи в теории), классический анализ является законным в определённом диапазоне параметров выбранного лагранжиана теории.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Общий объем работы 141 страница.

В **первой главе**, в рамках конкретного подкласса теории Хорндески и для определенного анзаца функций лагранжиана был построен устойчивый на всех временах генезиса без сильной связи на ранних временах. Так, в этой главе приводятся лагранжиан подкласса теории Хорндески как в ковариантном, так и в АДМ формализмах, явный вид возмущенной метрики, получены соответствующие уравнения движения. Далее, приводится анзац для функций лагранжиана, в рамках которого можно получить в качестве фонового решения генезис. Далее автор приводит формулы для квадратичного действия для возмущений метрики (скалярных и тензорного) в унитарной калибровке и подробно обсуждает устойчивость решения и запрещающую теорему, а также способ обойти ее условия. В данном случае запрещающие теоремы — это такие теоремы, которые гласят о невозможности построения космологических решений без начальной сингулярности, которые были бы свободны от градиентных неустойчивостей на протяжении всей эволюции. Итого, получен явный вид ограничений на параметры лагранжиана: как раз в рамках этих

ограничений и можно обойти запрещающую теорему. Здесь же показано, как в теории наивно возникает проблема сильной связи на больших отрицательных временах. Далее в этой же главе приводится действие третьего порядка для возмущений и с помощью него проводится размерный анализ проблемы сильной связи во всех секторах — скалярном (взаимодействие трех скаляров), смешанном (взаимодействие скалярных возмущений с тензорными) и тензорном (три гравитона). Из данного размерного анализа получен еще один набор ограничений на параметры теории. Результатом исследования в первой главе является тот факт, что построение устойчивого на всех временах генезиса без сильной связи в прошлом действительно возможно в рамках выбранного анзаца для функций лагранжиана, а также и при выборе определенных параметров лагранжиана.

Во **второй главе** были построены различные полные несингулярные модели ранней Вселенной. Так, в отличие от генезиса из первой главы, модели текущей главы «сшиты» с последующими возможными эпохами — с инфляцией или со стадией, на которой восстанавливается ОТО и также динамика определяется безмассовым скалярным полем. В начале второй главы приводится анзац для функций лагранжиана, в рамках которых будет построен сценарий сжатия с последующим отскоком, явный вид уравнений движения в этом анзаце и коэффициенты из действия второго порядка для возмущений. Здесь же детально показано, как можно построить модель ранней Вселенной, эволюция которой начинается со сжатия с последующим отскоком, затем происходит переход на стадию инфляции, после которой запускается эпоха, на которой дальнейшая динамика определяется безмассовым скалярным полем, а в гравитационном секторе восстанавливается стандартная общая теория относительности. Далее, приводится конкретный численный пример такой модели. Аналогичным образом был построен и другой сценарий: после сжатия и отскока сразу наступает стадия с безмассовым скалярным полем и стандартной гравитацией, описываемой ОТО. Кроме того, также были построены и различные численные примеры полных моделей с генезисом на ранних временах. Все построенные модели представляют большой интерес с феноменологической точки зрения: в них могут быть вычислены наклон и амплитуда спектра, можно изучать возможные негауссовости и так далее.

Далее, **третья глава** содержит исследование потенциальной проблемы сильной связи на ранних временах в модели сжимающейся Вселенной, которая конформно связана с некоторой моделью инфляции. Наивный размерный анализ (который был задействован в первых двух главах диссертации) в модели со сжатием приводит к выводу, что масштаб энергии сильной связи в такой теории есть и он даже может быть ниже классического. Однако, с точки зрения того, что модель сжимающейся Вселенной конформно связана с моделью инфляции, никакого масштаба сильной связи, кроме планковского, в теории быть не может. Из вычислений соответствующих матричных элементов и при использовании условия унитарности было показано, что в теории возникают нетривиальные сокращения, и в итоге модель сжимающейся Вселенной действительно свободна от режима сильной связи, как и должно быть.

Наконец, в **четвертой главе** получены соотношения унитарности для парциальных амплитуд процессов рассеяния «два-в-два» с учетом вклада промежуточных двух-частичных состояний. Такое соотношение было получено в двух случаях: когда частицы в паре различимы и идентичны. Далее, автором были получены унитарные ограничения, и, кроме того, на примере простой теории с двумя действительными полями продемонстрировано, что полученное соотношение унитарности действительно выполняется в первом нетривиальном порядке по константам связи. Полученные соотношения унитарности и унитарные ограничения представляют интерес при оценке масштаба сильной связи. Кроме того, следует отметить, полученные в данной главе формулы могут найти применение и в других теориях, где различные возмущения над нетривиальным фоновым решением распространяются с разными скоростями звука. Например, в физике твердого тела различные скорости звука эффективно возникают в задачах, связанных с анизотропными средами.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Общее впечатление от диссертационной работы Агеевой Ю. А. безусловно положительное. Поставленные цели и задачи актуальны, интересны и важны в контексте построения единой модели эволюции ранней Вселенной. Автор обладает обширными знаниями в выбранной научной области, ориентируется в современной научной литературе, уверенно владеет многими инструментами теоретической физики. Текст написан точным и ясным языком.

#### **Замечания по работе**

В качестве недостатков, не снижающих значимости полученных результатов, можно отметить следующее:

1. Встречаются повторы и небольшое количество орфографических ошибок.
2. В автореферате дана неполная ссылка на работу диссертанта. Имеется ввиду ссылка на УФН, 2022. Нет тома и стр.

Приведенные замечания не умаляют высокого качества проделанной работы и важности полученных результатов.

#### **Заключение**

Диссертационная работа Агеевой Ю. А. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 1.3.3 - Теоретическая физика. Она вносит существенный вклад в исследование альтернативных несингулярных сценариев эволюции ранней Вселенной, изучение аспекта сильной связи в таких моделях.

Основные результаты диссертационной работы являются оригинальными и получены впервые, они убедительны и опубликованы в ведущих физических журналах. Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. Всего опубликовано 5 работ в журналах, рекомендуемых ВАК. Результаты докладывались автором на

конференциях и школах. Содержание диссертации полно и точно отражено в автореферате.

Диссертация Агеевой Юлии Александровны «Космологические решения в скалярно-тензорной теории Хорндески» удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

31 августа 2023 г.

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник отдела теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Математический институт им. В. А. Стеклова» РАН,  
член-корреспондент РАН, профессор,  
доктор физико-математических наук

Арефьева Ирина Ярославна,

Адрес: Россия, 119991,  
Москва, ул. Губкина, д. 8  
Тел.: +7 (499) 941 01 87  
Email: [arefeva@mi-ras.ru](mailto:arefeva@mi-ras.ru)

Подпись Арефьевой И. Я. заверяю:  
Ученый секретарь МИАН  
к.ф.-м.н. С. А.Поликарпов

М. П.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Irina Aref'eva, Igor Volovich, Spontaneous symmetry breaking in fermionic random matrix model// Journal of High Energy Physics, 2019.— № 114.
2. Irina Ya. Aref'eva, Alexander Patrushev, Pavel Slepov, Holographic entanglement entropy in anisotropic background with confinement-deconfinement phase transition// Journal of High Energy Physics, 2020.— № 43.
3. Irina Ya. Aref'eva, Kristina Rannu, Pavel Slepov, Holographic anisotropic model for light quarks with confinement-deconfinement phase transition// Journal of High Energy Physics, 2021.— № 90.
4. Irina Ya. Aref'eva, Kristina Rannu, Pavel Slepov, Holographic Anisotropic Model for Heavy Quarks in Anisotropic Hot Dense QGP with External Magnetic Field// Journal of High Energy Physics, 2021. – № 161.
5. Irina Ya. Aref'eva, Anastasia A. Golubtsova, Eric Gourgoulhon, Holographic drag force in 5d Kerr-AdS black hole// Journal of High Energy Physics, 2021. – № 169.
6. Dmitry S. Ageev, Irina Ya. Aref'eva, Thermal density matrix breaks down the Page curve// The European Physical Journal Plus 137, 2022.— № 10.
7. Irina Ya. Aref'eva, Alexey Ermakov, Kristina Rannu, Pavel Slepov, Holographic model for light quarks in anisotropic hot dense QGP with external magnetic field// The European Physical Journal Plus 83, 2023.— № 79.