

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

# Физический ИНСТИТУТ



*имени  
П.Н.Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

119991, ГСП-1, Москва,  
Ленинский проспект, 53, ФИАН  
Телефоны: (499) 135 1429  
(499) 135 4264  
Телефакс: (499) 135 7880  
<http://www.lebedev.ru>  
[postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Физического института  
им. П.Н. Лебедева РАН  
член-корреспондент РАН, профессор,  
д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Н.Н.Колачевский

« 05 » \_\_\_\_\_ сентября \_\_\_\_\_ 2023

Дата 05.09.2023 № 11220-9311-11 65

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## ОТЗЫВ

Ведущей организации "Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук"  
на диссертацию 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.

Диссертация Агеевой Ю. А. посвящена исследованию различных несингулярных космологических сценариев ранней Вселенной, которые могут служить альтернативой или дополнением к инфляционной модели. Изучение и построение таких альтернативных сценариев представляет на сегодняшний день интересную и важную задачу теоретической космологии. Действительно, с одной стороны, исследование таких новых сценариев позволяет нам глубже понять структуру возможных физических процессов, которые протекают в ранней Вселенной. Кроме того, решение космологических задач часто способствует дополнительному, более детальному пониманию теорий гравитации, как общей теории относительности, так и ее модификаций, а также и квантовой теории поля. С другой стороны, новые сценарии очень ранней Вселенной могут дополнить инфляционную модель, избавляя ее, например, от проблемы начальной сингулярности.

Построение несингулярных конфигураций гипотетически возможно в теориях,

нарушающих изотропное условие энергодоминантности. Это условие сложно нарушить так, чтобы в получившейся теории не возникало ни духовых, ни градиентных неустойчивостей. В случае скалярного поля, лагранжиан которого содержит только первые пространственно-временные производные, было показано, что нарушение изотропного условия энергодоминантности неизбежно влечёт за собой появление таких неустойчивостей. Этот факт способствует развитию интереса к теориям, содержащим вторые производные поля в лагранжиане, но лишенным третьих производных в уравнениях движения, поскольку в таких теориях возможно построение стабильных конфигураций, нарушающих изотропное условие энергодоминантности. Скалярно-тензорная теория модифицированной гравитации Хорндески — это пример такой теории, уравнения движения которой второго порядка, несмотря на высшие производные в лагранжиане.

В рамках диссертации Агеевой Ю. А. был изучен подкласс теорий Хорндески для исследования космологических моделей ранней Вселенной без начальной сингулярности, включающих так называемую модель генезиса и модель со сжатием и отскоком. Обе эти модели могут служить в качестве начального состояния очень популярной в настоящее время инфляционной стадии Вселенной так и ее горячей стадии. На данный момент изучение и построение стадии генезиса и Вселенной с отскоком являются весьма актуальной темой. Во множестве работ освещались такие вопросы и направления, как описание генезиса или отскока с помощью конформной теории поля, построение несингулярных моделей в наиболее общей модели Хорндески, изучение первичного разогрева и возможного спектра возмущений Вселенной сразу после несингулярной стадии, построение ряда запрещающих теорем о невозможности стабильности этих моделей, описание первичных космологических возмущений для случаев закрытой и открытой и т. д. Главной трудностью, однако, остается тот факт, что хотя построение устойчивых на всех временах моделей Хорндески с генезисом или отскоком и возможно, но в таких моделях появляется проблема сильной связи: эффективная масса Планка в удаленном прошлом стремится к нулю и классический анализ теории оказывается внутренне противоречивым. Предметом изучения данной работы является преодоление этой трудности.

**Первая глава** диссертации Агеевой Ю. А. посвящена размерному анализу режима сильной связи в модели генезиса в рамках конкретного подкласса теории Хорндески. Так, возможность применения классического полевого описания эволюции Вселенной на ранних стадиях базируется на сравнении характерных масштабов энергии: чтобы выяснить, является ли классический подход законным, были получены характерные масштабы сильной связи и проведено сравнение этих масштабов с обратным характерным временем эволюции космологических решений. Масштаб сильной связи был определен из кубического лагранжиана взаимодействий скалярных и тензорных возмущений. Характерные энергетические масштабы сильной связи были получены из кубического действия во всех секторах: скалярном (то есть взаимодействие трех скаляров), тензорном (три гравитона) и смешанном (взаимодействия типа скаляр-гравитон-гравитон, скаляр-скаляр-гравитон). Классический масштаб энергии был получен из модифицированных уравнений Фридмана в виде обратного параметра Хаббла. В результате, в первой главе было получено, что классический энергетический масштаб действительно может быть

меньше, чем масштаб сильной связи в скалярном, тензорном и смешанном секторах. Показано, что такое условие отсутствия сильной связи на стадии генезиса удовлетворяется при определенных значениях параметров лагранжиана.

Далее, во **второй главе** диссертации Агеевой Ю. А. были построены полные космологические модели ранней Вселенной, которые начинаются с несингулярных эпох генезиса и сжатия с отскоком в подклассе теории Хорндески. Например, одной из построенных моделей была такая, в которой эволюция Вселенной начинается со сжатия, затем происходит отскок, затем Вселенная проходит через инфляционную эпоху к стадии с безмассовым скалярным полем (эпоха «kination»): расширение Вселенной в рамках общей теории относительности, динамика определяется безмассовым скалярным полем. Подобным образом были построены и модели, где эволюция начинается с эпохи генезиса. Все предложенные модели устойчивы на всех временах, а скорости распространения соответствующих возмущений над фоновым решением не превышают скорости света. Также во всех моделях проведен анализ проблемы сильной связи, показано, что классическое полевое описание в каждый момент времени законно. Отметим, что эти модели претендуют на роль реалистичных моделей ранней Вселенной, в них могут быть построены спектры мощности, найдены их наклон и амплитуда, что интересно с экспериментальной точки зрения.

**Третья глава** диссертационного исследования Агеевой Ю. А. посвящена неточностям, к которым может приводить наивный размерный анализ сильной связи. Так, в первых двух главах в различных космологических моделях проводился именно размерный анализ проблемы сильной связи: были найдены характерные энергетические масштабы — классический и энергия сильной связи, проводилось их сравнение. Тем не менее, показано, что такой подход может давать завышенную оценку энергетического масштаба сильной связи, что в свою очередь приводит к сильным ограничениям на параметры модели, хотя в реальности ограничения более слабые. Более того показано, что размерный анализ проблемы сильной связи может приводить и к неправильным выводам. Для того, чтобы проиллюстрировать данные утверждения, был рассмотрен такой класс космологических моделей, в которых эволюция Вселенной начинается со сжатия (в системе координат Йордана); более того, данная модель сжатия конформно связана с инфляцией (в системе координат Эйнштейна, «Einstein frame»). Наивный размерный анализ в такой модели сжатия показывает, что масштаб сильной связи оказывается заниженным. Однако, было продемонстрировано, что наивный анализ масштаба сильной связи не всегда дает правильный ответ и для того, чтобы определить применимость классического описания в ряде моделей требуется проводить более точный анализ проблемы сильной связи с помощью диаграммной техники и унитарных ограничений.

Наконец, в **четвертой главе** диссертации был рассмотрен класс теорий с несколькими безмассовыми скалярными полями с различными «скоростями звука». Такие теории представляют интерес и были рассмотрены, поскольку в изучаемых ранее космологических моделях присутствуют несколько типов возмущений (а именно — скалярные и тензорные возмущения метрики). Для таких теорий были получены соотношения унитарности для парциальных амплитуд процессов рассеяния «два в два» с учетом вклада промежуточных двухчастичных состояний. Используя эти соотношения, были получены унитарные ограничения как в самом общем случае, так

и в случае, уже рассмотренном в литературе, со стандартной «скоростью звука». Данные ограничения можно использовать для оценки масштаба сильной связи в соответствующей эффективной теории поля. Явными однопетлевыми вычислениями (в первом нетривиальном порядке по константам связи) в простой модели двух скалярных полей с разными «скоростями звука» было также показано, что полученные соотношения унитарности действительно выполняются.

В качестве **замечаний по работе** следует отметить, что диссертация Юлии Агеевой в целом написана ясно, она адекватно освещает цели, методы и результаты проделанной работы. Работа отражает высокую квалификацию диссертанта как в области классической теории модифицированных моделей гравитации, так и в физике частиц. Недостатки носят чисто презентационный характер. А именно, ссылки на формулы в приложениях иногда затрудняют чтение (их повторение и объяснение в основном тексте было бы полезнее). Не совсем явно изложена связь четвертой и третьей глав диссертации, в частности не понятно, как формула (157) и последующая формула для масштаба сильной связи, построенная в секции 3.4 в искривленном пространстве инфляционной Вселенной, выводятся из соотношений унитарности, выведенных в четвертой главе из теории рассеяния в плоском пространстве. Представляет также интерес вопрос, а не ограничивается ли выбором унитарной калибровки времени класс возможных решений в теории Хорндески только с монотонно изменяющимся во времени скалярным полем.

### **Заключение**

Сделанные замечания не снижают качества диссертации и не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертация Агеевой Ю. А. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 1.3.3 - теоретическая физика. Следует отметить значимость полученных автором диссертации результатов: работа вносит существенный вклад в исследование альтернативных несингулярных сценариев эволюции ранней Вселенной, изучение нетривиальной проблемы сильной связи в таких моделях.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались автором на международных семинарах, конференциях и школах. Содержание диссертации полно и точно отражено в автореферате.

Результаты диссертации Агеевой Ю. А. были заслушаны, обсуждены и одобрены на научном семинаре в отделении теоретической физики имени И. Е. Тамма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН.

Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений.

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 заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика – за исследование и решение проблемы сильной связи в несингулярных космологических моделях ранней Вселенной.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник лаборатории теории  
фундаментальных взаимодействий  
Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма  
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,  
д.ф.-м.н.  
Тел.: +7(499)132-60-49  
Email: barvin@lpi.ru

А. О. Барвинский

Подпись А.О.Барвинского «удостоверяю»

Ученый секретарь ФИАН,  
к.ф.-м.н.

А.В. Колобов

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Адрес: 119991 ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53  
Телефон: 8(499)135-42-64  
E-mail: [postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Andrei O. Barvinsky, Wladyslaw Wachowski, Heat kernel expansion for higher order minimal and nonminimal operators. // Phys. Rev. D. – 2022. – Vol. 105. – No. 6. – P. 065013.
2. A.O. Barvinsky, N. Kolganov, A. Vikman, Generalized unimodular gravity as a new form of k-essence. // Phys. Rev. D. – 2021. – Vol. 103. – No. 6. – P. 064035.
3. A.O. Barvinsky, N. Kolganov, Inflation in generalized unimodular gravity. // Phys. Rev. D. – 2019. – Vol. 100. – No. 12. – P. 123510.
4. A.O. Barvinsky, P.I. Pronin, W. Wachowski, Heat kernel for higher-order differential operators and generalized exponential functions. // Phys. Rev. D. – 2019. – Vol. 100. – No. 10. – P. 105004.
5. A.O. Barvinsky, N. Kolganov, A. Kurov, D. Nesterov, Dynamics of the generalized unimodular gravity theory. // Phys. Rev. D. – 2019. – Vol. 100. – No. 2. – P. 023542.
6. A. O. Barvinsky, M. Herrero-Valea, S. M. Sibiryakov, Towards the renormalization group flow of Hořava gravity in 3+1 dimensions. // Phys. Rev. D. – 2019. – Vol. 100. – No. 2. – P. 026012.