

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Волкова Виктория Евгеньевна

**Космологические решения и их устойчивость в
скалярно-тензорных теориях гравитации со старшими
производными**

01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре физики частиц и космологии физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Рубаков Валерий Анатольевич

д.ф.-м.н., академик РАН, профессор

Официальные оппоненты:

Алексеев Станислав Олегович

д.ф.-м.н., профессор, Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова, в.н.с. отдела релятивистской астрофизики

Бабичев Евгений Олегович

к.ф.-м.н., Национальный центр научных исследований, н.с. лаборатории теоретической физики Орсэ

Долгов Александр Дмитриевич

д.ф.-м.н., ФГАОУ ВО Новосибирский государственный университет, заведующий лабораторией космологии и элементарных частиц физического факультета

Защита состоится 16 мая 2019 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.06 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д.1., стр. 2, физический факультет, Северная физическая аудитория.

E-mail: ff.dissovet@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/188027311/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.01.06,
доктор физико-математических наук,
профессор

П.А. Поляков

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Современные экспериментальные данные физики частиц и результаты теоретических исследований в области космологии позволяют многое сказать о самых ранних этапах развития Вселенной. Так, теория горячего Большого Взрыва является одной из наиболее подробно разработанных моделей, которая описывает процессы, происходившие в ранней Вселенной, вплоть до самых высоких температур. Однако, сама по себе теория горячего Большого Взрыва имеет ряд недостатков, требующих существенного дополнения модели. Например, характерным свойством теории является проблема начальных условий, которые приходится задавать явным образом, чтобы предсказания модели согласовались с наблюдаемыми данными. Классическими вопросами в теории горячего Большого Взрыва являются проблемы горизонта, плоскостности и энтропии, а также проблема первичных неоднородностей плотности энергии вещества во Вселенной.

Одним из наиболее элегантных и широко используемых способов решения перечисленных проблем теории горячего Большого Взрыва является предположение о наличии специфического этапа эволюции, предшествовавшего горячей стадии – эпохи инфляции [1, 2, 3]. Существенно, что концепция инфляции естественным образом решает вопрос возникновения первичных возмущений плотности. Одним из недостатков инфляции является невозможность решить проблему наличия сингулярности в начальный момент времени [4, 5]. При этом наличие начальной сингулярности не является следствием стандартного выбора симметричной метрики Фридмана для описания расширяющейся однородной изотропной Вселенной: в общей теории относительности было показано, что начальная сингулярность является характерным свойством расширяющихся космологических решений [6].

Альтернативный способ решения части проблем теории горячего Большого Взрыва был найден в рамках модели со стадией сжатия – экпирозисом [7, 8, 9]. Данный класс моделей предполагает наличие стадии классического сжатия, предшествующей горячему Большому Взрыву. Позднее на базе сценария с экпирозисом была предложена модель, в которой отсутствовала начальная сингулярность – новый экпирозис или классический космологический отскок [10, 11, 12]. В моделях Вселенной с космологическим отскоком

не только отсутствует начальная сингулярность, но также предложены механизмы генерации первичных возмущений без использования инфляции. Не менее любопытной альтернативой инфляции служит модель генезиса [13, 14]: сценарий описывает Вселенную, которая расширяется из пустого пространства Минковского по мере роста плотности энергии заполняющей ее специфической формы материи, и в результате происходит переход на горячую стадию.

Характерной особенностью указанных космологических сценариев без начальной сингулярности является нарушение условий теоремы Пенроуза [15], справедливой в общей теории относительности. Теорема опирается на два условия: 1) выполнение изотропного условия энергодоминантности (англ. Null Energy Condition или NEC), 2) наличие некомпактной поверхности Коши. Следствием теоремы Пенроуза, а именно требования выполнения NEC, является отсутствие возможности реализовать сценарий с космологическим отскоком в общей теории относительности.

До недавнего времени считалось, что нарушение NEC неизбежно приводит к возникновению различных патологий в теории. Так, теории скалярного поля, минимально связанного с гравитацией, с лагранжианом первого порядка по производным либо удовлетворяют NEC, либо сталкиваются с различными типами неустойчивостей [16, 17]. Однако, существует класс теорий скалярного поля с лагранжианами, включающими в себя вторые производные, уравнения движения для которых при этом оказываются второго порядка по производным. Указанные теории были описаны в работе [18] и называются теориями Хорндески.

Теории Хорндески – это наиболее общие теории модифицированной гравитации со скалярным полем, наличие вторых производных в лагранжиане которых не приводит к возникновению в уравнении поля слагаемых с производными старше второй. В общем случае

лагранжиан теории Хорндески имеет вид ¹:

$$\mathcal{L}_{\mathcal{H}} = \mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5, \quad (1)$$

$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X), \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\square\pi, \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)R + 2G_{4X}(\pi, X) [(\square\pi)^2 - \pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu}], \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_5 = G_5(\pi, X)G^{\mu\nu}\pi_{;\mu\nu} + \frac{1}{3}G_{5X} [(\square\pi)^3 - 3\square\pi\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu} + 2\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\rho}\pi_{;\rho}{}^{\nu}], \quad (5)$$

где π – это скалярное поле, иногда называемое галилеоным, $X = g^{\mu\nu}\pi_{,\mu}\pi_{,\nu}$, $\pi_{,\mu} = \partial_{\mu}\pi$, $\pi_{;\mu\nu} = \nabla_{\nu}\nabla_{\mu}\pi$, $\square\pi = g^{\mu\nu}\nabla_{\nu}\nabla_{\mu}\pi$, $G_{4X} = \partial G_4/\partial X$ и т.д.; R в (4) и $G^{\mu\nu}$ в (5) – скаляр кривизны и тензор Эйнштейна, соответственно. В наиболее общий вид лагранжиана теории Хорндески (1) входят 4 независимые функции $F(\pi, X)$, $K(\pi, X)$, $G_4(\pi, X)$ и $G_5(\pi, X)$. Лагранжиан (1) уже содержит в себе гравитационную часть действия с функциями $G_4(\pi, X)$ в (4) и $G_5(\pi, X)$ в (5), в случае специального выбора которых восстанавливается стандартное действие Эйнштейна–Гильберта: $G_5(\pi, X) = 0$, $G_4(\pi, X) = 1/(2\kappa)$, где $\kappa = 8\pi G$. В случае нетривиального вида функции $G_4(\pi, X)$ теория имеет неминимальную связь с гравитацией, что позволяет, например, считать теории с модифицированной гравитацией вида $f(\phi)R$ частными случаями общей теории Хорндески.

Далее наиболее общими теориями Хорндески будем называть теории с лагранжианом вида (1). В литературе также принято называть кубическими теориями Хорндески подкласс теорий с лагранжианом

$$\mathcal{L}_{cub} = -\frac{1}{2\kappa}R + \mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3. \quad (6)$$

Одно из наиболее важных свойств теории Хорндески заключается в том, что нарушение NEC не влияет на устойчивость космологических решений, построенных в данном классе теорий [14]. Здесь и далее устойчивость космологического решения будет означать отсутствие духов и градиентных неустойчивостей в соответствующей линеаризованной теории. Таким образом, теории Хорндески являются подходящим кандидатом для изучения решений, требующих нарушения NEC. Как следствие, был предложен ряд моделей с

¹Греческие индексы принимают значения 0, 1, 2, 3.

безопасным нарушением NEC, которые описывают космологическое решение с генезисом и Вселенную с отскоком. В предложенных космологических решениях действительно отсутствовали патологические степени свободы (духи и градиентные неустойчивости) вблизи момента отскока или генезиса. Однако, вопрос о возможности построить в теории Хорндески космологические решения, устойчивые на протяжении *всей* эволюции, оставался открытым: при изучении эволюции, например, отскокового решения на протяжении достаточно длинного промежутка времени неизбежно возникали градиентные (или, возможно, духовые) неустойчивости. То же справедливо для "полных" моделей генезиса.

Неизбежное возникновение градиентных неустойчивостей на линеаризованном уровне в кубическом подклассе теории обобщенных галилеонов (6) было доказано и сформулировано в виде запрещающей теоремы в работе [19]. Аналогичная теорема была доказана для случая, когда кроме поля галилеона присутствует дополнительное скалярное поле, для которого NEC выполняется [20]. Позднее запрещающая теорема была обобщена на наиболее общий случай теории Хорндески [21]. Таким образом, было сформулировано общее утверждение о невозможности построить космологическое решение без начальной сингулярности в рамках теории Хорндески, которое было бы свободно от градиентных неустойчивостей на протяжении всей эволюции. В работе [21] было, однако, отмечено, что сценарий с устойчивым отскоком или генезисом может быть построен при условии, что в асимптотическом прошлом или асимптотическом будущем теория переходит в режим сильной связи. Пример такого решения был впоследствии найден [22]. В дальнейшем мы будем избегать теорий с сильной связью и считать возникновение такого режима нежелательным.

Задача о полностью устойчивом классическом решении с отскоком в теориях типа Хорндески получила свое дальнейшее развитие, когда было предложено расширение данного класса скалярно-тензорных теорий – "расширенные" теории Хорндески (англ. *beyond Horndeski*):

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{BH} = \mathcal{L}_H + F_4(\pi, X) \epsilon^{\mu\nu\rho}{}_{\sigma} \epsilon^{\mu'\nu'\rho'\sigma'} \pi_{,\mu} \pi_{,\mu'} \pi_{;\nu\nu'} \pi_{;\rho\rho'} + \\ + F_5(\pi, X) \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \epsilon^{\mu'\nu'\rho'\sigma'} \pi_{,\mu} \pi_{,\mu'} \pi_{;\nu\nu'} \pi_{;\rho\rho'} \pi_{;\sigma\sigma'}, \end{aligned} \quad (7)$$

где \mathcal{L}_H соответствует наиболее общей теории Хорндески (1). Принципиальным отличием

ем расширенной теории Хорндески является тот факт, что в результате добавления двух новых функций $F_4(\pi, X)$ и $F_5(\pi, X)$ в лагранжиан теории в соответствующих уравнениях поля появляются слагаемые с третьими производными. Однако, гамильтонов анализ показал, что повышение порядка уравнений движения не приводит к возникновению дополнительных степеней свободы [23, 24], т.е. число степеней свободы в теории Хорндески и расширенной теории Хорндески совпадает. Было выдвинуто предположение, что дополнительные слагаемые в лагранжиане расширенной теории Хорндески могут оказать существенное влияние на анализ стабильности космологических решений. Предположение получило свое подтверждение в рамках подхода эффективной теории поля [25, 26], где было показано, что расширение теории Хорндески позволяет обойти запрещающую теорему [21].

Цели и задачи работы.

Целью данной работы является изучение классических космологических решений без начальной сингулярности в скалярно-тензорных теориях гравитации со старшими производными (теории Хорндески и ее расширения) и исследование устойчивости указанного типа решений.

Задачи данной работы формулируются в рамках расширенной теории Хорндески в ковариантном виде. Так, одной из задач является доказательство на языке ковариантной теории, что дополнительные слагаемые в действии, характерные для расширенной теории Хорндески, действительно позволяют обойти запрещающую теорему [21]. В результате, построены явные примеры лагранжианов расширенной теории Хорндески, которые допускают решения в виде космологического отскока и генезиса, устойчивые в любой момент времени. Кроме этого, показано существование особого примера полностью устойчивого отскокового решения в расширенной теории Хорндески: асимптотики теории при $t \rightarrow \pm\infty$ описываются общей теорией относительности и стандартным безмассовым скалярным полем. Такое отскоковое решение представляет особый интерес с точки зрения построения полных моделей ранней Вселенной.

Отдельной группой задач является анализ различных способов вычисления квадратичного действия для возмущений при изучении теории Хорндески и ее расширения на линеаризованном уровне. В частности проводится сравнительный анализ двух различных

методов вычисления квадратичного действия для возмущений в теории Хорндески, который доказывает соответствие каждого из методов определенному выбору калибровки теории. Один из методов сводится к явному выбору унитарной калибровки и является одним из стандартных способов вычисления квадратичного действия. Другой подход, так называемый метод DPSV, предложенный для кубической теории галилеонов (6) в работе [27], явно не предполагает фиксации калибровки, и в некоторых случаях существенно упрощает вычисление квадратичного действия. Несмотря на технический характер задачи проведенное исследование позволило убедиться в корректности используемых методов вычисления квадратичного действия теории возмущений, которое является необходимой составляющей при анализе устойчивости конструируемых космологических решений. Одной из задач является обобщение метода DPSV на случай расширенной теории Хорндески.

Научная новизна работы.

Над решением задач по моделированию процессов, протекавших на самых ранних этапах эволюции Вселенной, работают высококвалифицированные коллективы по всему миру. Новизна и актуальность всестороннего исследования космологической эпохи, предшествовавшей горячей стадии, подтверждается существенным количеством новых работ в указанной области. В основу данной работы легли принципиально новые результаты, полученные в рамках исследования космологических решений и их устойчивости в (расширенной) теории Хорндески. Постановка задачи по исследованию методов получения квадратичного действия для возмущений в теории Хорндески и ее расширении является оригинальной, а решение позволило глубже понять структуру рассматриваемых скалярно-тензорных теорий.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенные устойчивые космологические решения без начальной сингулярности позволяют в будущем построить реалистичные модели ранней Вселенной с использованием сценариев с отскоком или генозисом. Благодаря простому асимптотическому поведению одного из построенных отскоковых решений в расширенной теории Хорндески, указанный сценарий допускает, например, естественный выход на горячую стадию после фазы отскока, что делает данное решение интересным с точки зрения построения полной модели Вселенной.

Методология диссертационного исследования.

В данной работе используется стандартный формализм теории возмущений, а также многократно апробированные методы вычисления действия линеаризованной теории. В частности, вторая глава диссертации посвящена анализу нового, альтернативного способа вычисления квадратичного действия для возмущений. В рамках исследования данного подхода используются классические методы работы с космологическими возмущениями в линейном режиме. Корректность нового метода устанавливается путем сопоставления результатов, полученных в рамках данного подхода, с известными результатами, которые получены с помощью ранее проверенных, достоверных методов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Устойчивые на протяжении всего времени эволюции космологические решения без начальной сингулярности могут быть построены в рамках ковариантного формализма в расширенной теории Хорндески.
2. Существуют примеры лагранжианов расширенной теории Хорндески, допускающие решения типа космологического отскока или генезиса, в которых на протяжении всего времени эволюции не возникает градиентных неустойчивостей.
3. Существует полностью устойчивое решение в виде отскока в расширенной теории Хорндески, для которого скалярное поле теории и в асимптотическом прошлом, и в асимптотическом будущем становится безмассовым скалярным полем со стандартным кинетическим членом, а гравитация описывается общей теорией относительности.
4. В контексте исследования устойчивости космологических решений в теории Хорндески два различных метода вычисления квадратичного действия для возмущений – метод унитарной калибровки и так называемый метод DPSV – являются альтернативными и соответствуют различному выбору калибровки в теории.
5. Метод DPSV может корректно применяться для вычисления квадратичного действия для возмущений в случае наиболее общей теории Хорндески при условии однородности фона.

6. Метод DPSV требует существенной модификации для своей корректной работы в расширенной теории Хорндески. Предложенный алгоритм модификации метода соответствует явному использованию уравнений связи теории.

Достоверность и обоснованность результатов.

Достоверность и обоснованность результатов, изложенных в диссертации, подтверждаются проверкой согласованности предлагаемых моделей с известными результатами, представляющими частные случаи указанных моделей. Помимо этого, исследования, аналогичные или тесно связанные с изложенными в данной работе, в различные моменты времени проводились другими научными группами, в результате чего был возможен сравнительный анализ результатов. Наконец, результаты работы были опубликованы в рецензируемых научных изданиях, а также обсуждались в рамках докладов на международных конференциях.

Апробация результатов.

Основные результаты, изложенные в диссертации, были представлены на следующих конференциях:

1. Международная конференция 6th International Conference on New Frontiers in Physics 2017 (ICNFP-2017), о.Крит, Греция, 17 — 29 августа 2017 года.
2. Международный семинар “XXth International Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2018)”, Валдай, Россия, 27 мая – 2 июня 2018 года.

Результаты также были представлены 14 февраля 2019 г. на семинаре отдела теоретической физики Института ядерных исследований Российской академии наук.

Личный вклад автора.

Вклад автора в исследования, результаты которых изложены в данной работе, является определяющим.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, трех приложений и списка литературы. Общий объем работы 108 страниц. Диссертация содержит 13 рисунков. Список литературы включает 113 наименований.

Содержание работы

Введение содержит обзор современного состояния исследований космологических решений без начальной сингулярности в скалярно-тензорных теориях гравитации со старшими производными. Определен класс скалярно-тензорных теорий, в рамках которого формулируются задачи диссертации, изложена мотивация исследования данного типа полевых теорий. Кроме этого, во Введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, обоснована новизна выбранной темы, перечислены основные защищаемые положения, приведена структура работы и краткое содержание.

В **первой главе** мы рассматриваем линеаризованную теорию возмущений над однородным фоном для расширенной теории Хорндески с целью анализа устойчивости космологических решений в виде отскока и генезиса. В параграфе 1.1 приведено квадратичное действие для возмущений в унитарной калибровке, и получен явный вид условий отсутствия духов и градиентных неустойчивостей, а также сверхсветовых мод. С использованием полученных условий устойчивости в параграфе 1.2 показано, что благодаря дополнительным слагаемым, характерным для расширенной теории Хорндески, запрещающая теорема неприменима к указанному классу скалярно-тензорных теорий. В качестве иллюстрации последнего утверждения на базе найденных условий устойчивости построены два различных решения с нетривиальными асимптотиками: в виде космологического отскока (параграф 1.3) и решения, подобного генезису (параграф 1.4). Предложенные решения устойчивы на протяжении всего времени эволюции и геодезически полны. В параграфе 1.5 обсуждается возможность построить решение в виде космологического отскока, которое было бы не только устойчиво на протяжении всей эволюции, но и имело бы простые асимптотики, описываемые общей теорией относительности в присутствии безмассового скалярного поля. В пункте 1.5.1 приведен анализ поведения скалярных возмущений в унитарной калибровке, и показано, что возмущения ведут себя регулярным образом, несмотря на кажущиеся расходимости в линеаризованных уравнениях при определенном поведении коэффициентов уравнения. Пример лагранжиана расширенной теории Хорндески, который допускает устойчивое отскоковое решение с простыми асимптотиками, приведен в пункте 1.5.2.

Вторая глава полностью посвящена изучению двух методов вычисления квадратичного действия в теории Хорндески и ее расширении. В параграфе 2.1 проводится сравнительный анализ двух подходов в рамках кубической теории Хорндески (6). Пункт 2.1.1 содержит вывод квадратичного действия для возмущений без фиксации калибровки. В пункте 2.1.2 проведен подробный анализ метода DPSV, и показано, что он соответствует специальному выбору калибровки. Соответствие получаемых результатов методом DPSV и методом унитарной калибровки проверено в пункте 2.1.3. В параграфе 2.2 показано, что метод DPSV применим для случая наиболее общего лагранжиана теории Хорндески (1), но требует наложения условий однородности на фоновое решение. Применимость подхода DPSV в расширенной теории Хорндески (7) исследуется в пункте 2.3.1, где явно показано, что метод в своей исходной форме работает некорректно и приводит к неверному результату. В пункте 2.3.2 предложен способ модифицировать метод, чтобы получаемый результат совпадал с результатом в случае выбора унитарной калибровки.

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследований, представленных в диссертации.

Работа содержит три приложения. В **Приложение А** вошли явные выражения для коэффициентов в квадратичном действии для возмущений в случае расширенной теории Хорндески, а также квадратичное действие, записанное в терминах калибровочно-инвариантной комбинации возмущений скалярного сектора. В **Приложении Б** и **Приложении В** приведены явные выражения для коэффициентов, введенных для упрощения формы записи линеаризованных уравнений Эйнштейна и уравнения поля галилеона в теории Хорндески и ее расширении.

Заключение

В работе изучались классические космологические решения без начальной сингулярности в рамках теории Хорндески и ее расширения. Центральным вопросом при исследовании указанных решений являлась устойчивость на всех этапах эволюции системы. Были получены следующие результаты:

1. В терминах ковариантных теорий показано, что полностью устойчивые космологи-

ческие решения без начальной сингулярности могут быть построены в расширенной теории Хорндески. Так, явно продемонстрировано, что наличие в лагранжиане теории функций, характерных для расширенной теории Хорндески, существенно меняет форму условий устойчивости и позволяет обойти теорему, запрещающую существование полностью устойчивых решений без начальной сингулярности.

2. Впервые предложены конкретные примеры лагранжианов расширенной теории Хорндески, допускающие решения в виде космологического отскока и генезиса, в которых не возникает градиентных неустойчивостей на протяжении всего времени эволюции. Устойчивость построенных решений проверена явно. Особенностью предложенных решений является нетривиальность одной из асимптотик соответствующих теорий: в асимптотическом прошлом теория, описывающая систему, относится к классу расширенной теории Хорндески, в то время как в асимптотическом будущем поле галилеона трансформируется в стандартное безмассовое скалярное поле, а гравитация описывается общей теорией относительности. Иными словами, на больших положительных временах теория Хорндески переходит в теорию безмассового скалярного поля на фоне эйнштейновской гравитации.
3. Построено полностью устойчивое решение в виде отскока в расширенной теории Хорндески, для которого скалярное поле теории и в асимптотическом прошлом, и в асимптотическом будущем становится безмассовым скалярным полем со стандартным кинетическим членом, а гравитация описывается общей теорией относительности. Кроме этого, явно показано, что описание соответствующей линеаризованной теории в терминах унитарной калибровки корректно несмотря на кажущиеся расходимости, присутствующие в линеаризованных уравнениях. Тем самым доказано, что γ -кроссинг не является источником патологий на линеаризованном уровне теории.
4. Изучены два метода вычисления квадратичного действия для возмущений в общей теории Хорндески: метод унитарной калибровки и метод DPSV. Проведен подробный анализ метода DPSV и установлено, что метод соответствует определенному выбору калибровки, хотя подход не предполагает ее явной фиксации. Показано, что в случае наиболее общей теории Хорндески калибровка $h_{0i} = 0$ одновременно явля-

ется синхронной ($h_{00} = 0$). Данное свойство является характерной особенностью общих теорий Хорндески, и его справедливость является основой метода DPSV. Метод DPSV был явно применен в случае наиболее общей теории Хорндески. Показано, что для подклассов общей теории Хорндески старше кубического, метод работает при условии выполнения однородности и изотропии фоновых метрики и поля галилеона. Явно проверено совпадение полученного квадратичного действия с результатом в унитарной калибровке, что подтверждает корректность метода DPSV.

5. Были проведены вычисления квадратичного действия методом DPSV в расширенной теории Хорндески. Установлено, что даже при условии однородности и изотропии фоновых объектов, метод DPSV приводит к неверному результату для квадратичного действия возмущений. Проведен анализ причины некорректной работы метода: в расширенной теории Хорндески сопутствующая калибровка не является автоматически синхронной. Предложен способ модифицировать метод DPSV, который предполагает явное использование уравнений связи линеаризованной теории. Предложенные модификации позволяют методом DPSV получить квадратичное действие, совпадающее с результатом применения метода унитарной калибровки.

Список публикаций

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и RSCI:

1. R. Kolevaton, S. Mironov, N. Sukhov and V. Volkova. Cosmological bounce and Genesis beyond Horndeski // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2017. — Vol. 1708. — no.08. — 038.
2. R. Kolevaton, S. Mironov, V. Rubakov, N. Sukhov and V. Volkova. Perturbations in generalized Galileon theories // Physical Review D. — 2017. — Vol. 96. — no.12. — 125012.

3. S. Mironov and V. Volkova. Properties of perturbations in beyond Horndeski theories // International Journal of Modern Physics A. — 2018. — Vol. 33. — no.27. — 1850155.
4. S. Mironov, V. Rubakov and V. Volkova. Bounce beyond Horndeski with GR asymptotics and γ -crossing // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2018. — Vol. 1810. — no.10. — 050.

а также в тезисах докладов:

1. V. Volkova. On perturbations in Horndeski theories // EPJ Web Conferences. — 2018. — Vol. 182. — 02127.
2. R. Kolevaton, S. Mironov, V. Rubakov, N. Sukhov and V. Volkova. Cosmological bounce in Horndeski theory and beyond // EPJ Web Conferences. — 2018. — Vol. 191. — 07013.

Список литературы

- [1] A. H. Guth. The Inflationary Universe: A Possible Solution To The Horizon And Flatness Problems // Phys. Rev. D. — 1981. — Vol. 23. — p.347.
- [2] A. D. Linde. A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution Of The Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy And Primordial Monopole Problems // Phys. Lett. B. — 1982. — Vol. 108. — p.389.
- [3] A. Albrecht and P. J. Steinhardt. Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking // Phys. Rev. Lett. — 1982. — Vol. 48. — p.1220.
- [4] A. Borde and A. Vilenkin. Eternal inflation and the initial singularity // Phys. Rev. Lett. — 1994. — Vol. 72. — p.3305, arXiv:gr-qc/9312022.
- [5] A. Borde, A. H. Guth, and A. Vilenkin. Inflationary space-times are incomplete in past directions // Phys. Rev. Lett. — 2003. — Vol. 90. — p.151301.
- [6] S. Hawking and G. Ellis. The Large scale structure of space-time // Cambridge University Press. — 1973.

- [7] J. Khoury, B. A. Ovrut, P. J. Steinhardt and N. Turok. The Ekpyrotic universe: Colliding branes and the origin of the hot big bang // *Phys. Rev. D.* — 2001. — Vol. 64. — p.123522, arXiv:hep-th/0103239.
- [8] J. Khoury, B. A. Ovrut, N. Seiberg, P. J. Steinhardt, and N. Turok. From Big Crunch to Big Bang // *Phys. Rev. D.* — 2002. — Vol. 65. — p.086007, arXiv:hep-th/0108187.
- [9] J.-L. Lehners. Ekpyrotic and Cyclic Cosmology // *Phys.Rept.* — 2008. — Vol. 465. — p.223, arXiv:astro-ph/0806.1245
- [10] E. I. Buchbinder, J. Khoury, and B. A. Ovrut. New Ekpyrotic Cosmology // *Phys.Rev. D.* — 2007. — Vol. 76. — p.123503, arXiv:hep-th/0702154
- [11] P. Creminelli and L. Senatore. A smooth bouncing cosmology with scale invariant spectrum // *JCAP.* — 2007. — Vol. 0711. — 010, arXiv:hep-th/0702165.
- [12] M. Lilley and P. Peter. Bouncing alternatives to inflation // *Comptes Rendus Physique.* — 2015. — Vol. 16. — p.1038, arXiv:astro-ph/1503.06578.
- [13] P. Creminelli, M. A. Luty, A. Nicolis and L. Senatore. Starting the Universe: Stable Violation of the Null Energy Condition and Non-standard Cosmologies // *JHEP.* — 2006. — Vol. 0612. — 080, arXiv:hep-th/0606090.
- [14] P. Creminelli, A. Nicolis and E. Trincherini. Galilean Genesis: An Alternative to inflation // *JCAP.* — 2010. — Vol. 1011. — 021, arXiv:hep-th/1007.0027.
- [15] R. Penrose. Gravitational Collapse and Space-Time Singularities // *Phys. Rev. Lett.* — 1965. — Vol. 14. — p.57.
- [16] C. Armendariz-Picon, T. Damour and V. F. Mukhanov. k-inflation // *Phys. Lett. B.* — 1999. — Vol. 458. — p.209, arXiv:hep-th/9904075.
- [17] J. Garriga and V. F. Mukhanov. Perturbations in k-inflation // *Phys. Lett. B.* — 1999. — Vol. 458. — p.219, arXiv:hep-th/9904176.

- [18] G. W. Horndeski. Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space // *Int. J. Theor. Phys.* — 1974. — Vol. 10. — p.363.
- [19] M. Libanov, S. Mironov and V. Rubakov. Generalized Galileons: instabilities of bouncing and Genesis cosmologies and modified Genesis // *JCAP.* — 2016. — Vol. 1608. — no.08. — 037, arXiv:hep-th/1605.05992.
- [20] R. Kolevatov and S. Mironov. Cosmological bounces and Lorentzian wormholes in Galileon theories with an extra scalar field // *Phys. Rev. D.* — 2016. — Vol. 94. — no.12. — p.123516, arXiv:hep-th/1607.04099.
- [21] T. Kobayashi. Generic instabilities of nonsingular cosmologies in Horndeski theory: A no-go theorem // *Phys. Rev. D.* — 2016. — Vol. 94. — no.4. — p.043511, arXiv:1606.05831.
- [22] A. Ijjas and P. J. Steinhardt. Fully stable cosmological solutions with a non-singular classical bounce // *Phys. Lett. B.* — 2017. — Vol. 764. — p.289, arXiv:gr-qc/1609.01253.
- [23] X. Gao. Unifying framework for scalar-tensor theories of gravity // *Phys. Rev. D.* — 2014. — Vol. 90. — p.081501, arXiv:gr-qc/1406.0822.
- [24] C. Lin, S. Mukohyama, R. Namba and R. Saitou. Hamiltonian structure of scalar-tensor theories beyond Horndeski // *JCAP.* — 2014. — Vol. 1410. — no.10. — 071, arXiv:hep-th/1408.0670.
- [25] Y. Cai, Y. Wan, H. G. Li, T. Qiu and Y. S. Piao. The Effective Field Theory of nonsingular cosmology // *JHEP.* — 2017. — Vol. 1701. — 090, arXiv:qr-qc/1610.03400.
- [26] P. Creminelli, D. Pirtskhalava, L. Santoni and E. Trincherini. Stability of Geodesically Complete Cosmologies // *JCAP.* — 2016. — Vol. 1611. — no.11. — 047, arXiv:hep-th/1610.04207.
- [27] C. Deffayet, O. Pujolas, I. Sawicki and A. Vikman. Imperfect Dark Energy from Kinetic Gravity Braiding // *JCAP.* — 2010. — Vol. 1010. — 026, arXiv:hep-th/1008.0048.