

На правах рукописи

Штенникова Арина Михайловна

Динамика космологических возмущений
в теории Хорндески

Специальность 1.3.3 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Миронов Сергей Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Головнев Алексей Валерьевич, доктор физико-математических наук, Британский Университет в Египте, Центр теоретической физики, профессор-исследователь.

Куров Александр Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, отделение теоретической физики, научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт им. В. А. Стеклова Российской академии наук (г. Москва).

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: <http://www.inr.ru>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные экспериментальные данные физики частиц и теоретические исследования в области космологии дают нам много информации о самых ранних этапах развития Вселенной.

Теория горячего Большого взрыва – проработанная, но неполная модель Вселенной. Она не объясняет однородность, изотропность, низкую кривизну пространства-времени, высокую энтропию и происхождение неоднородностей, необходимых для образования звезд и галактик. Для соответствия наблюдаемым данным требуются искусственные начальные условия.

Инфляционная теория, предполагающая сверхбыстрое расширение Вселенной перед “горячей” стадией, является популярным решением. Она объясняет размер, однородность, изотропность и плоскую геометрию Вселенной, решает проблему энтропии благодаря постинфляционному разогреву и объясняет возникновение первичных неоднородностей.

Хотя существует множество инфляционных моделей, экспериментальные данные не позволяют выделить единственно верную. Необходимы дальнейшие исследования.

При этом инфляционные теории также имеют проблемы, например, наличие начальной сингулярности, свойственной расширяющимся космологическим решениям в общей теории относительности.

Согласно общепринятой точке зрения, причина начала расширения Вселенной кроется в эффектах квантовой гравитации. То есть решение этого вопроса неотделимо от вопроса об ультрафиолетовом дополнении общей теории относительности. Однако существуют и альтернативные сценарии, не требующие такого построения.

Цель альтернативных сценариев — решить проблемы, которые были в первоначальной теории Большого взрыва, и при этом избежать проблем, с которыми столкнулась теория инфляции. Так, од-

ним из альтернативных сценариев стала модель, имеющая сжатие предшествующее Большому взрыву – модель экпирозиса [1, 2], при дальнейшем развитии – модель циклической вселенной [3]. Эти сценарии не решали всего спектра имеющихся проблем, поэтому позднее, на их базе был предложен сценарий без начальной сингулярности – новый экпирозис или классический космологический отскок [4, 5, 6]. Вселенная с отскоком предполагает, что эволюция Вселенной начиналась со сжатия ($H < 0$), затем в какой-то момент произошел отскок, он заключается в резкой смене знака параметра Хаббла, а далее происходило дальнейшее расширение ($H > 0$). Другой вариант – сценарий Генезиса [7]. Это решение описывает Вселенную, которая в прошлом была асимптотическим пространством Минковского, затем расширялась с увеличением плотности энергии, пока не вышла из режима действия эффективной теории поля и повторно не нагрелась.

Оба эти сценария требуют нарушения изотропного условия энергодоминантности (англ. Null Energy Condition, далее NEC). Это условие гласит, что тензор энергии-импульса материи $T_{\mu\nu}$ подчиняется неравенству

$$T_{\mu\nu}n^\mu n^\nu > 0, \quad (1)$$

для любого изотропного (светоподобного) вектора n^μ , т.е. для любого вектора удовлетворяющего условию $g_{\mu\nu}n^\mu n^\nu = 0$. Это условие примечательно тем, что его очень сложно нарушить и не ввести в теорию какую-либо нестабильность: градиентную, тахионную или духовую [8]. Кроме того, оно является одним из условий для теоремы Пенроуза [9], которая утверждает, что если в пространстве для всех изотропных векторов выполняется (1), существует некомпактная поверхность Коши, а также существует замкнутая ловушечная поверхность, то пространство не может быть геодезически полным, т.е. в нем есть сингулярная точка.

Нарушая условия теоремы Пенроуза, можно пытаться построить

несингулярные космологические решения, которые будут обладать необходимыми нам свойствами. Один из способов – рассмотрение экзотической материи, которая нарушает NEC (1). Долгое время считалось, что нарушить NEC без возникновения серьезных патологий в теории нельзя [10]. Например, теории скалярного поля, которые минимально связаны с гравитацией и имеют лагранжиан первого порядка по производным, либо удовлетворяют условию NEC, либо сталкиваются с различными типами неустойчивостей [11, 12].

В рамках исследования теорий скалярного поля, в которых безопасно (с точки зрения возникновения неустойчивостей) нарушается NEC, можно рассмотреть класс теорий с более сложными лагранжианами. Однако обычно считается, что теории с лагранжианом, содержащим производные выше первой, не имеют физического применения, так как соответствующие уравнения движения содержат производные выше второй, что приводит к появлению духов Остроградского [13, 14, 15].

Тем не менее, существует класс теорий со скалярным полем, для которых характерно, что их лагранжианы включают вторые производные, но уравнения движения при этом остаются второго порядка по производным. Эти теории впервые были описаны в работе [16] и называются теориями Хорндески. Этот класс теорий является наиболее общим среди скалярно-тензорных теорий гравитации с уравнениями движения второго порядка.

Действие теории Хорндески имеет вид:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} (\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5), \quad (2a)$$

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

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\square\pi, \quad (2c)$$

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

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

В (2) приняты обозначения: π – скалярное поле, $X = g^{\mu\nu}\nabla_\mu\pi\nabla_\nu\pi$ – кинетический член, R – скаляр Риччи, $G_{\mu\nu}$ – тензор Эйнштейна, $\pi_{,\mu} = \partial_\mu\pi$, $\pi_{;\mu\nu} = \nabla_\nu\nabla_\mu\pi$, $\square\pi = g^{\mu\nu}\nabla_\nu\nabla_\mu\pi$, $F(\pi, X)$, $K(\pi, X)$, $G_4(\pi, X)$, $G_5(\pi, X)$ - произвольные независимые функции переменный π и X , $G_{iX} = \partial G_i/\partial X$. За счет особой антисимметричной структуры слагаемых со старшими производными уравнения движения, полученные из (2) имеют второй порядок и по производным скалярного поля π и по производным от метрики $g_{\mu\nu}$.

В силу большой свободы теории в виде произвольных скалярных потенциалов, Теория Хорндески содержит внутри себя огромное количество изучавшихся ранее моделей. В первую очередь, выбирая $G_5(\pi, X) = 0$, $G_4(\pi, X) = 1/(2\kappa)$, где $\kappa = 8\pi G$, мы восстанавливаем действие Эйнштейна-Гильберта (слагаемые \mathcal{L}_2 и \mathcal{L}_3 не модифицируют гравитацию). Далее, в случае нетривиального выбора функции $G_4(\pi, X)$ теория обретает неминимальную связь с гравитацией, так $f(R)$ -гравитация тоже является подклассом теории Хорндески [17, 18] (эти теории сводятся к подклассу теории Хорндески с помощью введения дополнительного поля вида $\phi = \frac{df}{dR}$). Далее, слагаемое \mathcal{L}_2 включает в себя такие модели как к-инфляцию [11], к-эссенцию [19, 20], Хиггс-инфляцию [21, 22, 23]. Добавляя слагаемое с функцией K мы обобщаем модели кинетического “смешивания” с гравитацией [24] и теории G-инфляции [25, 26]. Теория Гаусса–Бонне, как часть Fab Four, также включается в теорию Хорндески, хоть и более сложным образом [27, 28] (для дальнейших деталей см. обзор

[29]). Таким образом, теория Хорндески является обобщением большого класса скалярно-тензорных теорий.

В рамках данной работы теория Хорндески будет интересовать нас с целью изучения возможности построения стабильных космологических решений без начальной сингулярности. В этом контексте одним из наиболее важных свойств теории Хорндески является тот факт, что нарушение NEC не влияет на наличие или отсутствие патологий в космологических решениях, построенных в данном классе теорий [7]. Как упоминалось выше, такими моделями в частности являются модель Генезиса и вселенной с отскоком.

Однако открытым оставался вопрос, можно ли создать в теории Хорндески устойчивые космологические решения на протяжении всей эволюции. При изучении эволюции решений с отскоком или генезиса в течение достаточно длительного времени неизбежно возникали градиентные неустойчивости.

В работе [30] было доказано, что в кубическом подклассе теории обобщённых галилеонов

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}R + F(\pi, X) + K(\pi, X)$$

неизбежно возникают градиентные неустойчивости на линеаризованном уровне. Это было сформулировано в виде запрещающей теоремы (no-go theorem). Аналогичная теорема была доказана и для случая, когда помимо поля галилеона присутствует дополнительное скалярное поле, для которого выполняется NEC [31]. Позднее запрещающая теорема была обобщена на наиболее общий случай теории Хорндески [32] и для системы с несколькими полями галилеонного типа [33].

Однако, помимо построения моделей ранней вселенной не менее интересной задачей является исследование вселенной современной. На данный момент все большее развитие получают методы многоканальной астрономии, которые расширяют наши возможности по ис-

следованию космоса и проверке различных гравитационных теорий. В частности, строгие экспериментальные ограничения на разницу между скоростью гравитационных и электромагнитных волн, выведенные из события GW170817 [34], ввели строгие ограничения на применение теории Хорндески / обобщенных Галилеонов - для космологии позднего времени [35, 36, 37, 38, 39]. В некоторых случаях можно воспользоваться общностью теории Хорндески и специальным подбором скалярных потенциалов теории добиться равенства единице скорости распространения гравитона, однако это является сильным ограничением общности и в некоторой степени подстройкой параметров.

Однако возможен и иной подход: можно попробовать объединить теории электромагнитного и гравитационного взаимодействий таким образом, чтобы скорости распространения волн совпадали автоматически. Это идея не нова и берет свое начало в теории Калуцы-Клейна – попытке обеспечить единое описание природных явлений путем трактовки фундаментальных взаимодействий как общей теории относительности в более высоких измерениях [40, 41]. Идея заключается в рассмотрении теории относительности в $(4+d)$ -измерениях с выбором конкретного анзаца для метрики с наложением дополнительных условий независимости полей от координат дополнительных измерений. При этом предполагается, что теория описывает многообразие $M^4 \times S$, где S является компактным d -мерным многообразием с некоторой группой симметрий, которая после редукции становится внутренней симметрией калибровочных полей четырехмерной теории.

В рамках теории Калуцы-Клейна можно построить обобщение теории Эйнштейна - Максвелла, объединяющее Общую Теорию Относительности и электромагнетизм. В этом случае поля калибровочного поля и четырехмерной метрики являются частями одной пятимерной метрики, что создает некоторую общность в их описа-

нии. Этот подход можно использовать для построения новой теории путем проведения редукции теории Обобщенных Галилеонов из пятимерного пространства-времени в четырехмерное. Теория, получаемая таким образом, будет включать в себя поля метрики, $U(1)$ -калибровочное векторное поле, а также два скалярных поля - галилеон и дилатон. Поскольку исходная теория не содержала производных старшего порядка в уравнениях движения, то и новая теория их избежит.

Цели и задачи диссертации

Целью данного диссертационного исследования является изучение классических космологических решений без начальной сингулярности в скалярно-тензорных теориях гравитации со старшими производными (в подклассе теории Хорндески), и анализ устойчивости данного типа решений.

В частности, были поставлены следующие задачи:

- Изучить возможность обхода теоремы, которая возникает в ситуации, когда действие в унитарной калибровке сингулярно. Построить несингулярные и устойчивые решения (например, вселенной с отскоком или генезиса).
- Изучить возмущения в теории Хорндески на анизотропном космологическом фоне. Использовать полученное действие для анализа стабильности изотропных решений относительно малой анизотропии.
- Построить скалярно-векторно-тензорную теорию со старшими производными путем компактификации теории обобщенных галилеонов из пятимерного пространства времени в четырехмерное. Это должно привести к общности описания электромагнитного и гравитационного полей и расширению класса экспериментально допустимых теорий Хорндески.

Научная новизна и практическая ценность

Все основные результаты, выдвигаемые на защиту, являются новыми. Так, рассмотренный вариант обхода запрещающей теоремы в теории Хорндески ранее не рассматривался в литературе. Однако, возможность построения несингулярных космологических решений типа вселенной с отскоком и генезиса обсуждались ранее в ряде работ (см., например, [42]). Прделанная работа позволила глубже понять структуру используемых скалярно-тензорных теорий. Отдельное исследование анизотропного фона позволило определить недостатки использованного нами подхода и также открывает дальнейшие перспективы для изучения полностью стабильных решений. Применения редукции Калуцы-Клейна к теории Хорндески так же ранее в литературе не рассматривалось. Наш подход позволяет расширить класс допустимых скалярно-тензорных теорий с точки зрения ограничений на скорость гравитационных волн.

Предложенные устойчивые космологические решения без начальной сингулярности позволяют в будущем построить реалистичные модели ранней Вселенной с использованием сценариев с отскоком или генезисом. Так, например, в этих моделях в будущих работах может быть вычислен спектр, наклон спектра возмущений, исследованы негауссовости, а знание этих величин позволит наложить дополнительные ограничения на параметры модели из наблюдательных данных. Благодаря тому, что построенные модели представляют из себя скалярное поле и стандартную ОТО, указанные сценарии допускают естественный выход на горячую стадию после эпохи генезиса или после отскока, что делает данные решения интересными с точки зрения построения полной модели Вселенной. Построение скалярно-векторно-тензорных теорий несет в себе широкий потенциал применительно к построению различных моделей, описывающих как ранние, так и поздние стадии развития вселенной. Полученный нами результат как минимум расширяет класс теорий допустимых с

точки зрения ограничений на скорость гравитационных волн, получаемые из последних наблюдений.

Положения, выносимые на защиту

1. Построено квадратичное действие в калибровочно инвариантном виде для возмущений в теории Хорндески над однородным и изотропным космологическим фоном. Показано нарушение запрещающей теоремы в исключительных условиях, в которых неприменима унитарная калибровка.
2. Построены конкретные примеры лагранжианов теории Хорндески, допускающие решения типа космологического отскока или генезиса.
3. Исходя из построенного квадратичного действия для возмущений в теории Хорндески над однородным анизотропным космологическим фоном, показано, что добавление малой анизотропии к построенным ранее решениям приводит к возникновению духовых и градиентных нестабильностей.
4. Получена новая скалярно-векторно-тензорная теория со старшими производными в действии, но без неустойчивости Остроградского. Векторы в полученной теории обладают калибровочной $U(1)$ симметрией, а скалярно-тензорная часть соответствует теории Хорндески.
5. Проанализированы скорости распространения скалярных, векторных и тензорных мод возмущений полученной теории и выделен класс теорий потенциально проходящий экспериментальные тесты.

Апробация диссертации

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

1. Международная научная школа "International School of Subnuclear Physics 2022 Эриче, Италия, 14-24 июня 2022 года.
2. Международная конференция VII International Conference "Models in Quantum Field Theory", г. Санкт-Петербург, Россия, 10-14 октября 2022 года.
3. Научная школа "LV Зимняя школа ПИЯФ г. Луга, Россия, 13 – 18 марта 2023 года.
4. Международная конференция International Conference on Particle Physics and Cosmology, г.Ереван, Армения, 2-7 октября 2023 года.
5. Международный семинар XXII International Seminar on High-Energy Physics Quarks'24, Переславль, Россия, 20-24 мая 2024 года.
6. Международный семинар COSMO'24, г.Киото, Япония, 21-25 октября 2024 года.
7. Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике (RUSGRAV-18), г.Казань, Россия, 25-29 ноября 2024 года.

Результаты также были представлены 6 мая и 18 ноября 2024 на семинарах отдела теоретической физики Института ядерных исследований Российской академии наук.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приводятся мотивация и актуальность исследования новых несингулярных космологических сценариев ранней Вселенной, альтернативных теорий инфляции. Обсуждаются особенности построения таких решений в теории Хорндески и сложности,

которые при этом возникают. Так же обсуждается интерес использования теории Хорндески для изучения современной Вселенной и варианты обобщения теории на векторные поля.

В главе 1 был проведен детальный анализ устойчивости космологических решений в рамках общей теории Хорндески на фоне пространственно-плоской FLRW вселенной. Были рассмотрены скалярные и тензорные возмущения и получено квадратичное действие для них.

После обсуждения известной запрещающей теоремы, которая утверждает невозможность существования несингулярных космологических решений, устойчивых на всем протяжении эволюции, в рамках стандартной теории Хорндески, был исследован вариант обхода этой теоремы.

Основным результатом главы является исследование способа обхода этой теоремы путем рассмотрения класса теорий, в которых запрещающая теорема неприменима, так как действие для скалярных возмущений в унитарной калибровке оказывается сингулярным. Анализ, проведенный с использованием калибровочно-инвариантных переменных для этой ситуации, показал что:

- В случае динамического фонового скалярного поля ($\dot{\pi} \neq 0$) скалярные возмущения становятся нединамическими ($\dot{\zeta} = 0$), что тривиально снимает проблему градиентной неустойчивости скалярного сектора и позволяет обойти запрещающую теорему.
- В случае статического фонового поля ($\dot{\pi} = 0$), соответствующего пространству Минковского (при $G_4 \neq 0$), скалярные возмущения динамические и распространяются со скоростью света ($c_S^2 = 1$).

Дополнительное условие на функции лагранжиана и фоновые поля позволило нам явно реконструировать лагранжианы для заданных несингулярных космологических сценариев, таких как вселен-

ная с отскоком и генезис, при условии линейной эволюции фонового поля $\pi(t) = t$.

Таким образом, показана возможность построения несингулярных космологических решений устойчивых на протяжении всей своей эволюции.

В главе 2 было исследовано влияние космологической анизотропии на устойчивость решений в теории Хорндески. Основное внимание было уделено анализу возмущений над однородным, но анизотропным фоном типа Бьянки I.

Был построен квадратичный лагранжиан для скалярных и тензорных возмущений над указанным фоном. Продемонстрировано, что анизотропия приводит к “расщеплению” коэффициентов действия, известных из изотропного случая, и появлению новых членов, связывающих различные направления. Анализ проводился с использованием калибровочно-инвариантных переменных, обобщающих переменные Бардина на анизотропный случай.

В качестве проверки согласованности был рассмотрен изотропный предел полученного действия для скалярных возмущений, который, как и ожидалось, совпал с результатом, полученным в Главе 1 при анализе изотропного фона.

Ключевым результатом главы стала проверка устойчивости космологического решения с отскоком, построенного в Главе 1 в рамках подкласса теорий с $A_4 = 0$. Напомним, что в изотропном случае для этого решения скалярные возмущения были нединамическими, что обеспечивало формальную устойчивость. Однако, при введении даже малой анизотропии в фон, анализ квадратичного действия для скалярных возмущений показал возникновение как духовых ($\mathcal{G}_S < 0$), так и градиентных ($\mathcal{F}_S < 0$) неустойчивостей в определенные моменты времени вблизи точки отскока.

Таким образом, сделан вывод, что устойчивость несингулярных решений (типа отскока), достигнутая в Главе 1 за счет выбора $A_4 = 0$

и последующего “вымирания” динамики скалярной моды, является артефактом высокой симметрии изотропного фона. При внесении анизотропии эта стабильность нарушается, указывая на то, что данный механизм обхода запрещающей теоремы неустойчив относительно анизотропных возмущений фона.

В главе 3 предложен и детально исследован новый подход к построению СВТ-теорий гравитации, основанный на процедуре размерной редукции Калуцы-Клейна теории обобщенных галилеонов из пятимерного пространства-времени.

В рамках этого подхода была успешно проведена редукция Калуцы-Клейна пятимерных обобщенных галилеонов на четырехмерное пространство. Это позволило получить 4D теорию, включающую динамическую метрику, $U(1)$ -калибровочное векторное поле (отождествляемое с фотоном) и два скалярных поля: дилатон ϕ и исходный галилеон π . Было показано, как пятимерное действие теории обобщенных галилеонов переходит в четырехмерное действие, содержащее стандартные члены Хорндески для поля π , лагранжиан дилатона \mathcal{L}_ϕ и лагранжиан векторного поля \mathcal{L}_A , который включает нетривиальные связи скаляров с вектором.

Далее, был проведен анализ квадратичного действия для тензорных и векторных возмущений над космологическим фоном. Важным результатом стало установление того факта, что квадраты скоростей распространения тензорных мод (гравитонов) c_g^2 и векторных мод (фотонов) c_A^2 в полученной теории автоматически совпадают в случае $G_5 = G_5(\pi)$, что устраняет необходимость тонкой настройки потенциалов теории и расширяет класс экспериментально допустимых теорий Хорндески.

Кроме того, было выведено квадратичное действие для скалярных возмущений. Показано, что в общем случае теория содержит две динамические скалярные степени свободы s , вообще говоря, различными скоростями распространения. На основе этого были сфор-

мулированы полные условия устойчивости теории, включающие отсутствие духов и градиентных нестабильностей во всех секторах – тензорном, векторном и скалярном.

Наконец, была обсуждена применимость механизма Вайнштейна для экранирования эффектов модифицированной гравитации и электромагнетизма в данной теории вблизи массивных источников.

Таким образом, в главе 3 представлена последовательная процедура построения нового класса СВТ-теорий, которые свободны от неустойчивости Остроградского и естественным образом удовлетворяют современным астрофизическим ограничениям на скорость гравитационных волн. Полученные результаты открывают новые возможности для построения моделей темной энергии и модифицированной гравитации, совместимых с наблюдениями.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Показано, что полностью устойчивые космологические решения без начальной сингулярности могут быть построены в теории Хорндески. Так, явно продемонстрировано, что в случае отсутствия динамики у фонового скалярного поля галилеона существует решение в виде плоского пространства Минковского. В случае динамического фонового скалярного поля, возможен выбор функций лагранжиана при котором будет отсутствовать динамика у скалярной моды возмущений, и при этом будет существовать стабильное космологическое решение.
2. Предложены конкретные примеры лагранжианов теории Хорндески, допускающие решения в виде космологического отскока и генезиса, в которых не возникает градиентных неустойчивостей на протяжении всего времени эволюции. Устойчивость построенных решений следует из устойчивости тензорных мод и отсутствия динамики в скалярном секторе. При этом предло-

женные лагранжианы являются лагранжианами общей теории относительности с неканоническим скалярным полем.

3. Рассмотрены возмущения над анизотропным космологическим фоном типа Бьянки I, полученное действие использовано для анализа стабильности решения с отскоком относительно отклонения от изотропного фона. Выяснено, что вырождение динамической степени свободы в скалярном секторе является следствием высокой симметрии фоновой метрики, и при отклонении от нее возникают духовые и градиентные неустойчивости.
4. Получена новая скалярно-векторно-тензорная теория со старшими производными в действии, но при этом с уравнениями движения второго порядка.
5. Проанализированы скорости распространения скалярных, векторных и тензорных мод возмущений в этой теории и выделен класс теорий потенциально проходящий экспериментальные тесты.

Основные публикации по теме диссертации

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

1. S. Mironov, A. Shtennikova. Stable cosmological solutions in Horndeski theory // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2023. — Vol. 2023, no.06. — P. 037.
2. S. Mironov, A. Shtennikova. Perturbations in Horndeski theory above anisotropic cosmological background. // JETP Letters. — 2024. — Vol. 119, no.5. — P. 339–344.

3. S. Mironov, A. Shtennikova, M. Valencia-Villegas, Reviving Horndeski after GW170817 by Kaluza-Klein compactifications // *Physics Letters B* — 2024. — Vol. 858 — P. 139058.
4. S. Mironov, A. Shtennikova and M. Valencia-Villegas, Higher derivative scalar-vector-tensor theories from Kaluza-Klein reductions of Horndeski theory // *Physical Review D* — 2025 — Vol. 111 no.2 — P. 024028

А так же в материалах конференции:

A. Shtennikova. Stable solutions in Horndeski theory. // *Proceedings of International Conference on Particle Physics and Cosmology — PoS(ICPPCRubakov2023)* — 2024 — Vol. 455. — P. 032.

Список литературы

- [1] The Ekpyrotic universe: Colliding branes and the origin of the hot big bang / Khoury J., Ovrut B. A., Steinhardt P. J., and Turok N. // *Phys. Rev. D.* — 2001. — Vol. 64. — P. 123522. — hep-th/0103239.
- [2] Visible branes with negative tension in heterotic M theory / Donagi R. Y., Khoury J., Ovrut B. A., Steinhardt P. J., and Turok N. // *JHEP.* — 2001. — Vol. 11. — P. 041. — hep-th/0105199.
- [3] Steinhardt P. J., Turok N. Cosmic evolution in a cyclic universe // *Physical Review D.* — 2002. — May. — Vol. 65, no. 12. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.65.126003>.
- [4] Starting the Universe: Stable Violation of the Null Energy Condition and Non-standard Cosmologies / Creminelli P., Luty M. A., Nicolis A., and Senatore L. // *JHEP.* — 2006. — Vol. 12. — P. 080. — hep-th/0606090.

- [5] Buchbinder E. I., Khoury J., Ovrut B. A. New ekpyrotic cosmology // *Physical Review D*. — 2007. — Dec. — Vol. 76, no. 12. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.76.123503>.
- [6] Creminelli P., Senatore L. A smooth bouncing cosmology with scale invariant spectrum // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2007. — Nov. — Vol. 2007, no. 11. — P. 010–010. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2007/11/010>.
- [7] Creminelli P., Nicolis A., Trincherini E. Galilean Genesis: An Alternative to inflation // *JCAP*. — 2010. — Vol. 11. — P. 021. — 1007.0027.
- [8] Rubakov V. A. The Null Energy Condition and its violation // *Phys. Usp.* — 2014. — Vol. 57. — P. 128–142. — 1401.4024.
- [9] Penrose R. Gravitational collapse and space-time singularities // *Phys. Rev. Lett.* — 1965. — Vol. 14. — P. 57–59.
- [10] Buniy R. V., Hsu S. D. H., Murray B. M. The null energy condition and instability // *Physical Review D*. — 2006. — Sep. — Vol. 74, no. 6. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063518>.
- [11] Armendariz-Picon C., Damour T., Mukhanov V. F. k - inflation // *Phys. Lett. B*. — 1999. — Vol. 458. — P. 209–218. — hep-th/9904075.
- [12] Garriga J., Mukhanov V. F. Perturbations in k -inflation // *Phys. Lett. B*. — 1999. — Vol. 458. — P. 219–225. — hep-th/9904176.
- [13] Ostrogradsky M. Mémoires sur les équations différentielles, relatives au problème des isopérimètres // *Mem. Acad. St. Petersburg*. — 1850. — Vol. 6, no. 4. — P. 385–517.

- [14] Woodard R. P. Avoiding dark energy with $1/r$ modifications of gravity // *Lect. Notes Phys.* — 2007. — Vol. 720. — P. 403–433. — astro-ph/0601672.
- [15] Motohashi H., Suyama T. Third order equations of motion and the Ostrogradsky instability // *Phys. Rev. D.* — 2015. — Vol. 91, no. 8. — P. 085009. — 1411.3721.
- [16] Horndeski G. W. Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space // *Int. J. Theor. Phys.* — 1974. — Vol. 10. — P. 363–384.
- [17] Sotiriou T. P., Faraoni V. $f(R)$ Theories Of Gravity // *Rev. Mod. Phys.* — 2010. — Vol. 82. — P. 451–497. — 0805.1726.
- [18] De Felice A., Tsujikawa S. $f(R)$ theories // *Living Rev. Rel.* — 2010. — Vol. 13. — P. 3. — 1002.4928.
- [19] Chiba T., Okabe T., Yamaguchi M. Kinetically driven quintessence // *Phys. Rev. D.* — 2000. — Vol. 62. — P. 023511. — astro-ph/9912463.
- [20] Armendariz-Picon C., Mukhanov V. F., Steinhardt P. J. A Dynamical solution to the problem of a small cosmological constant and late time cosmic acceleration // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Vol. 85. — P. 4438–4441. — astro-ph/0004134.
- [21] Germani C., Kehagias A. New Model of Inflation with Non-minimal Derivative Coupling of Standard Model Higgs Boson to Gravity // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Vol. 105. — P. 011302. — 1003.2635.
- [22] Germani C., Kehagias A. Cosmological Perturbations in the New Higgs Inflation // *JCAP.* — 2010. — Vol. 05. — P. 019. — [Erratum: *JCAP* 06, E01 (2010)]. 1003.4285.

- [23] Germani C., Kehagias A. UV-Protected Inflation // *Phys. Rev. Lett.* — 2011. — Vol. 106. — P. 161302. — 1012.0853.
- [24] Deffayet C. et al. Imperfect Dark Energy from Kinetic Gravity Braiding // *JCAP.* — 2010. — Vol. 10. — P. 026. — 1008.0048.
- [25] Kobayashi T., Yamaguchi M., Yokoyama J. G-inflation: Inflation driven by the Galileon field // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Vol. 105. — P. 231302. — 1008.0603.
- [26] Kamada K. et al. Higgs G-inflation // *Phys. Rev. D.* — 2011. — Vol. 83. — P. 083515. — 1012.4238.
- [27] General second order scalar-tensor theory, self tuning, and the Fab Four / Charmousis C., Copeland E. J., Padilla A., and Safin P. M. // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Vol. 108. — P. 051101. — 1106.2000.
- [28] Kobayashi T., Yamaguchi M., Yokoyama J. Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations // *Prog. Theor. Phys.* — 2011. — Vol. 126. — P. 511–529. — 1105.5723.
- [29] Kobayashi T. Horndeski theory and beyond: a review // *Rept. Prog. Phys.* — 2019. — Vol. 82, no. 8. — P. 086901. — 1901.07183.
- [30] Libanov M., Mironov S., Rubakov V. Generalized Galileons: instabilities of bouncing and Genesis cosmologies and modified Genesis // *JCAP.* — 2016. — Vol. 08. — P. 037. — 1605.05992.
- [31] Kolevatov R., Mironov S. Cosmological bounces and Lorentzian wormholes in Galileon theories with an extra scalar field // *Physical Review D.* — 2016. — Dec. — Vol. 94, no. 12. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.123516>.

- [32] Kobayashi T. Generic instabilities of nonsingular cosmologies in Horndeski theory: A no-go theorem // *Phys. Rev. D.* — 2016. — Vol. 94, no. 4. — P. 043511. — 1606.05831.
- [33] Akama S., Kobayashi T. Generalized multi-Galileons, covariantized new terms, and the no-go theorem for nonsingular cosmologies // *Physical Review D.* — 2017. — Mar. — Vol. 95, no. 6. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.95.064011>.
- [34] Abbott B. P. et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — Vol. 119, no. 16. — P. 161101. — 1710.05832.
- [35] Speed of Gravitational Waves and the Fate of Scalar-Tensor Gravity / Bettoni D., Ezquiaga J. M., Hinterbichler K., and Zumalacárregui M. // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 95, no. 8. — P. 084029. — 1608.01982.
- [36] Ezquiaga J. M., Zumalacárregui M. Dark Energy After GW170817: Dead Ends and the Road Ahead // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — Vol. 119, no. 25. — P. 251304. — 1710.05901.
- [37] Sakstein J., Jain B. Implications of the Neutron Star Merger GW170817 for Cosmological Scalar-Tensor Theories // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — Vol. 119, no. 25. — P. 251303. — 1710.05893.
- [38] Strong constraints on cosmological gravity from GW170817 and GRB 170817A / Baker T., Bellini E., Ferreira P. G., Lagos M., Noller J., and Sawicki I. // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — Vol. 119, no. 25. — P. 251301. — 1710.06394.
- [39] Creminelli P., Vernizzi F. Dark Energy after GW170817 and GRB170817A // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — Vol. 119, no. 25. — P. 251302. — 1710.05877.

- [40] Kaluza T. Zum Unitätsproblem der Physik // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.). — 1921. — Vol. 1921. — P. 966–972.
- [41] Klein O. The atomicity of electricity as a quantum theory law // Nature. — 1926. — Vol. 118, no. 2971. — P. 516–516.
- [42] Ijjas A. Space-time slicing in Horndeski theories and its implications for non-singular bouncing solutions // JCAP. — 2018. — Vol. 02. — P. 007. — 1710.05990.

Научное издание
Штенникова Арина Михайловна
Динамика космологических возмущений
в теории Хорндески

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 19.06.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 0,9 Зак. № 034/25 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а