

На правах рукописи

Валенсия Вильегас Хуан Маурисио

**Свойства возмущений
в скалярно-векторно-тензорных
и Хорндески-Картановских космологиях**

1.3.3 — Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Научный руководитель:

Миронов Сергей Андреевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел теоретической физики, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Катанаев Михаил Орионович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук, кафедра математической физики, ведущий научный сотрудник.

Дьяконов Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН), лаборатория №16: Методы математической физики и теории информации, научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»(г. Москва).

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современная стандартная модель космологии Большого Взрыва (Λ CDM) даёт удовлетворительное описание множества наблюдений: например, реликтового излучения, распространённости химических элементов, крупномасштабной структуры Вселенной и её позднего ускоренного расширения. Теория, на которой основана Λ CDM, Общая теория относительности (ОТО), также успешно проверена в масштабах Солнечной системы. Более того, предсказанные ею гравитационные волны недавно были зарегистрированы; их скорость c_g практически совпадает со скоростью света c , $|c_g/c - 1| \leq 5 \times 10^{-16}$ что согласуется с ОТО [1–4].

Несмотря на феноменологический успех, в ОТО остаются открытые вопросы. Особую важность представляет существование сингулярностей в большинстве решений уравнений движения. Их существование в широком классе случаев было доказано Пенроузом и Хокингом [5; 6]. В частности, упомянутая выше Λ CDM-космология и почти все её решения без “экзотической материи” должны начинаться с сингулярности.

Здесь мы определяем “экзотическую материю” как материю, нарушающую изотропное условие энергодоминантности (NEC, от английского выражения Null Energy Condition): $T_{\mu\nu}k^\mu k^\nu \geq 0$, где k^μ — любой изотропный (светоподобный) вектор [7]. Действительно, NEC обычно выполняется для большинства типов материи. Например, рассмотрим идеальную жидкость с 4-скоростью $u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau}$, плотностью энергии ρ и давлением p ,

$$T^{\mu\nu} = (p + \rho)u^\mu u^\nu + p g^{\mu\nu}.$$

Из закона сохранения энергии-импульса $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$ следует, что

$$\frac{d\rho}{dt} = -3H(\rho + p).$$

В расширяющейся Вселенной FLRW $H = \frac{\dot{a}}{a} > 0$ приводит к ожиданию, что $\rho + p > 0$, поскольку плотность энергии обычно уменьшается с расширением

$\frac{d\rho}{dt} < 0$. Более того, для любого будущенаправленного нулевого вектора k^μ в этой космологической модели NEC принимает вид

$$T_{\mu\nu}k^\mu k^\nu = (p + \rho)(u \cdot k)^2 \geq 0,$$

что подразумевает $p + \rho \geq 0$, так как $u \cdot k \neq 0$. Таким образом, большинство типов материи, таких как пыль ($p = 0, \rho > 0$), излучение ($p = \frac{1}{3}\rho, \rho > 0$) и космологическая постоянная ($p = -\rho$), удовлетворяют NEC.

“Экзотическая материя”, рассматриваемая в этой работе, мотивирована прежде всего стремлением избежать упомянутых сингулярностей. Она описывается двумя фундаментальными полями: метрикой и дополнительным вещественным скалярным полем, которое в общем случае не минимально связано с кривизной. Кроме того, она включает ОТО как частный случай, поэтому такие модели обычно называют “Модификациями Гравитации”. В первой части этой работы мы рассматриваем теорию Хорндески — наиболее общую модификацию ОТО с одним скалярным полем, содержащую в действии производные скалярного поля не выше второго порядка, но приводящую к уравнениям движения второго порядка [8; 9]:

$$\mathcal{S} = \int d^4x (\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5), \quad (1)$$

$$\mathcal{L}_2 = G_2, \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_3 = -G_3 \nabla_\mu \nabla^\mu \phi, \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_4 = G_4 R + G_{4,X} \left((\nabla_\mu \nabla^\mu \phi)^2 - (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi) \nabla^\nu \nabla^\mu \phi \right), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_5 = & G_5 G^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu \phi - \frac{1}{6} G_{5,X} \left((\nabla_\mu \nabla^\mu \phi)^3 \right. \\ & \left. + (\nabla_\nu \nabla_\rho \phi) \left(2(\nabla^\mu \nabla^\nu \phi) \nabla^\rho \nabla_\mu \phi - 3(\nabla_\mu \nabla^\mu \phi) \nabla^\rho \nabla^\nu \phi \right) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Функции $G_i(\phi, X)$ с $i = 2, 3, 4, 5$, зависящие от скаляра ϕ и его первых производных $X = -\frac{1}{2}\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi$ — с обозначением $G_{i,X} = \partial G_i / \partial X$.

$G_2(\phi, X)$ включает модели инфляции со стандартным кинетическим членом, если $G_2(\phi, X) = X + V(\phi)$, где V — некоторый потенциал. Однако $G_2(\phi, X)$ также включает все возможные самовзаимодействия скалярного поля, даже с нестандартными кинетическими членами. Он известен как “k-

эссенция” [10] и находит применение в моделях инфляции, тёмной материи и тёмной энергии.

Отметим, что ОТО включена как частный случай действия (1) при $G_3 = 0$, $G_4 = \frac{1}{2\kappa}$ и $G_5 = 0$, где R — скаляр Риччи в искривлённом пространстве-времени без кручения и с метрически согласованной связностью (мы используем сигнатуру метрики $(-, +, +, +)$). Аналогично, теория Бранса–Дикке получается из (1) при $G_4 = G_4(\phi)$, зависящей только от ϕ , но не от X [11]. Таким образом, теория Хорндески может рассматриваться как обобщение теории Бранса–Дикке, учитывающее не минимальные связи скаляра с кривизной, а также включающее его вторые производные. Также отметим, что \mathcal{L}_3 естественно возникает как низкоэнергетическая эффективная теория модели Dvali–Gabadadze–Porrati (DGP) [12], что интересно для космологических приложений из-за самодействующих ускоряющихся решений.

В целом, благодаря важному свойству — возможности нарушения NEC и избежания сингулярностей, — решения в теории Хорндески предлагались для моделей тёмной энергии, отскакивающих космологий и компактных объектов, таких как чёрные дыры и кротовые норы [13–25]. Подчеркнём, что отскакивающие космологии — которые мы также строим в этой работе — могут естественно переходить в стандартную инфляционную эпоху.

Однако также было доказано, что несингулярные решения в теории Хорндески на пространстве-времени без кручения обычно имеют проблемы с *глобальной* устойчивостью [13–20; 26–30]. Другими словами, даже если решения являются *локально* устойчивыми и физически приемлемыми вблизи отскока — или наиболее физически значимой фазы, нестабильность обязательно возникнет в какой-то момент раньше или позже в эволюции Вселенной. Обязательное существование нестабильности в некоторый момент — это то, что мы называем проблемами *глобальной* устойчивости, которые были установлены как запрещающие теоремы в теории Хорндески [15; 16]. Более того, некоторые анализы предполагали, что нарушение NEC потенциально приводит к проблемам, таким как существование возмущений, распространяющихся со скоростью, превышающей скорость света,

даже если сингулярности удаётся обойти [31]. Таким образом, глобальная устойчивость действительно кажется насущной проблемой, которую необходимо конкретно решить.

Среди возможных вариантов решения проблемы глобальной устойчивости в теории Хорндески можно рассмотреть, что либо модель не содержит скалярных возмущений на несингулярном фоне FLRW — что может быть неудовлетворительно, поскольку мы ожидаем малые отклонения от FLRW на космологических масштабах — либо скалярные возмущения распространяются на пространства-времени Минковского [32]. Второй вариант — рассмотреть нестандартные асимптотики [16; 33]. Наконец, третий вариант, обсуждаемый в литературе, — существенно пересмотреть теорию Хорндески. А именно, переформулировать её на плоском пространстве-времени только с кручением и дополнительными членами. А именно, написать новый тип теории Хорндески с телепараллельной связностью. Для этой теории обычные запрещающие теоремы нарушаются [34; 35].

В этой работе мы показываем новое возможное решение проблем глобальной устойчивости теории Хорндески при сохранении обычной структуры на искривлённом пространстве-времени и допущении стандартных асимптотик. Новое решение в этой работе получено с обычной структурой теории Хорндески (1), но с рассмотрением пространства-времени и с кривизной, и с кручением. В частности, это первое исследование теории Хорндески с кручением в формализме *второго* порядка, в котором связность записывается вне массовой поверхности как сумма символов Кристоффеля (выраженных через метрику) и тензора кручения, так что уравнения движения для метрики остаются *второго* порядка. Это аналогично введению кручения в ОТО в так называемую теорию Эйнштейна–Картана. Таким образом, мы называем модели с кривизной и кручением в этой работе теориями Хорндески–Картана.

С другой стороны, второй проблемной характеристикой скалярно-тензорных модификаций гравитации является скорость их тензорных мод. Действительно, после измерения скорости гравитационных волн

от события GW170817 [1; 2] и его электромагнитного аналога, гамма-всплеска GRB170817A [3; 4], было высказано мнение, что ограничение $|c_g/c - 1| \leq 5 \times 10^{-16}$, исключает почти все скалярно-тензорные теории с не минимальными производными связями скаляра с кривизной — такие как теория Хорндески (1) с ненулевыми $G_{4,X}$ или $G_{5,X}$, $G_{5\phi}$ [2; 36–41]. Действительно, большинство этих модификаций гравитации подразумевают скорость гравитационных волн (GW, от английского выражения Gravitational Waves), отличную от скорости света (мы принимаем $c = 1$ в этой работе).

Другими словами, наиболее общая скалярно-тензорная теория, где мы могли бы в принципе отождествить скалярную моду со скаляром тёмной энергии, это теория типа Бранса–Дикке с k -эссенцией и членом Хорндески \mathcal{L}_3 [2; 36–42]. Более того, эти аргументы также исключили более широкий класс модифицированных теорий гравитации, называемых Расширенные теории Хорндески (ВН, от английского выражения Beyond Horndeski) или теория Глезе–Ланлуа–Пьяцца–Верницци (GLPV) и их обобщение - Вырожденные высшего порядка скалярно-тензорные теории (DHST, от английского выражения Degenerate-Higher-Order-Scalar-Tensor) [43–46]. Эти две теории фактически содержат теорию Хорндески (1) как частный случай. Они подразумевают уравнения движения выше второго порядка для метрики и скалярного поля. Однако они разработаны так, что связи устраняют степень свободы духа.

Во второй части этой работы мы рассматриваем случай скалярно-векторно-тензорных теорий, таких как те, что анализировались в [47–50], чтобы предложить потенциальное решение этой проблемы. А именно, мы наблюдали в [49; 50], что существуют скалярно-векторные связи очень специфической формы, которые можно добавить к теории Хорндески так, что скорость векторной моды на космологическом фоне FLRW совпадает со скоростью GW. Мы показали, что это может выполняться по построению в большинстве теорий Хорндески, даже если $G_{4,X} \neq 0$ и $G_{5\phi} \neq 0$. Более того, такое действие для вектора $U(1)$ -калибровочно инвариантно. Эти два аспекта мотивировали в [49] интерпретацию векторной моды как

эффективного фотона на космологических масштабах. Теперь, в этой работе, мы показываем более широкий класс связей в более общей теории ВН и DHOST. Ключевой аспект заключается в том, что в этих теориях GW распространяются с той же скоростью, что и фотон, удовлетворяя $c_g(t)/c(t) = 1$ в ходе космической эволюции, по построению.

В целом, модель ВН со скалярно-векторными связями, представленная в конце этой работы, может быть альтернативой в отношении последней проблемы. Более того, как хорошо известно, теории ВН не страдают от проблем глобальной устойчивости, обсуждавшихся в первой части этой работы [18–20; 51; 52]. Однако важно отметить, что помимо двух уже рассмотренных эффектов, эти скалярно-фотонные связи требуют обширного анализа их наблюдательных следствий — например, в присутствии сильных магнитных полей — и большинство из них ещё нуждаются в ограничениях [53–55].

Цели и задачи диссертации

Общая цель данной диссертации — изучить свойства возмущений в двух новых скалярно-векторно-тензорных модификациях гравитации. В частности, первое — исследовать теорию Хорндески на пространстве-времени с кривизной и кручением и определить условия устойчивости несингулярных космологических решений. Во второй части диссертации основная цель — рассмотреть теории DHOST на пространстве-времени без кручения — обобщение теории Хорндески — и определить скалярно-фотонные связи, таким образом чтобы скорость гравитационных волн совпадала со скоростью света по построению — то есть без ограничения скалярных потенциалов.

Более подробно, задачи разделены следующим образом:

- Определить обобщение теории Хорндески с кручением, содержащее вторые производные скалярного поля вплоть до второй степени (теория Хорндески–Картана второго порядка). Затем определить число степеней свободы в рамках разложения первого порядка на

фоне FLRW.

- Вторая задача — сформулировать запрещающую теорему для несингулярных космологических решений в теории Хорндески–Картана второго порядка. Поскольку мы обнаруживаем, что в присутствии кручения требуется дополнительное предположение о скорости гравитационных волн, мы ставим задачу построить устойчивый космологический отскок, нарушающий это предположение.
- Следующая задача — обобщить предыдущие результаты на полную теорию Хорндески–Картана, содержащую до третьей степени вторых производных скалярного поля. Поскольку мы обнаруживаем, что в этой значительно более общей теории запрещающая теорема не может выполняться, мы ставим финальную задачу для этой части диссертации: построить космологический отскок, устойчивый во все времена, и такой, что все моды распространяются со скоростями, не превышающими скорость света, ни в какой момент времени.
- Что касается второй части диссертации, вычислить компактификацию Калуцы–Клейна для теории DHOST, сформулированной в пяти измерениях. Идентифицировать скалярно-векторные связи в DHOST такие, чтобы векторная мода распространялась со скоростью, равной скорости гравитационных волн.

Научная новизна и практическая ценность

Все основные результаты, выносимые на защиту, являются новыми. Классификация теорий Хорндески–Картана вплоть до квадратичной степени проведена впервые в данной работе. Также доказана новая запрещающая теорема, которая выполняется при новом предположении. Важно отметить, что метод, использованный в доказательстве, аналогичен предыдущим запрещающим теоремам без кручения [15; 16]. Кроме того, новым результатом является тот факт, что в полной теории Хорндески–Картана, содержащей до кубической степени вторых производных скалярного поля,

не существует запрещающей теоремы.

Более того, наши предыдущие работы по скалярно-векторным связям в теории Хорндески [49; 50] и связанные исследования в [55] расширены до новых результатов в DHOST. Кроме того, новым результатом является тот факт, что теория ВН со скалярно-фотонными связями, представленная в данной диссертации — которая является расширением моделей, рассмотренных в [55] — может удовлетворять дополнительным ограничениям на распад гравитационных волн.

Результаты первой части данной диссертации имеют теоретическое значение. Они по существу показывают, что запрещающую теорему можно обойти, если существует смешивание метрики и скалярного поля с кручением. Устойчивый космологический отскок в теории Хорндески–Картана может служить отправной точкой для построения таких моделей с обычной асимптотикой. Более того, они мотивируют другие исследования на менее симметричных фонах, таких как космологии Бьянки, или также возмущения высшего порядка на FLRW, чтобы определить, не является ли теория сильно связанной.

Результаты второй части по теории DHOST имеют в основном теоретическое значение, однако они также могут быть полезны для более феноменологических исследований. В частности, теория ВН со скалярно-фотонными связями, представленная в данной диссертации, может быть использована для исследования других “ортогональных” ограничений на эти модифицированные теории гравитации. Действительно, поскольку ограничения на скорость и условие нераспада уже могут быть удовлетворены, новые вычисления на других фонах и в присутствии сильных магнитных полей могут выявить новые ограничения на эти скалярно-фотонные связи и пролить свет на их полезность.

Положения, выносимые на защиту

1. Условия устойчивости и дисперсионные соотношения в теории Хорндески–Картана второго порядка и в одном специальном подклассе третьего порядка.

2. В квадратичной теории Хорндески-Картана существует запрещающая теорема для несингулярных и устойчивых космологических решений без сверхсветовых скоростей звука. В данном подклассе существует устойчивое решение в виде космологического отскока, но со сверхсветовым (в течение короткого времени) гравитоном.
3. Запрещающая теорема нарушается в кубическом подклассе теории Хорндески-Картана: существует устойчивое отскоковое решение без возмущений, распространяющихся со сверхсветовыми скоростями, на протяжении всей эволюции.
4. Существует новая скалярно-векторно-тензорная теория, содержащая скалярно-тензорный сектор вырожденных теорий высшего порядка, в которой тензорные и векторные моды распространяются с одинаковой скоростью на космологическом фоне. Подкласс таких теорий, в котором векторный сектор связан со скалярным сектором “Расширенных теорий Хорндески”, позволяет обойти проблему распада гравитонов на скаляры тёмной энергии.

Апробация результатов

Основные результаты данной диссертации были представлены на следующих конференциях, семинарах и симпозиумах:

1. Семинар в Институте теоретической и математической физики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия. 03.12.2025
2. Двадцать вторая конференция имени Ломоносова по физике элементарных частиц, Московский государственный университет имени Ломоносова, Москва, Россия. 21 - 27.07.2025
3. Международный симпозиум по космологии и физике частиц и астрофизике: CosPA 2025, Center for Theoretical Physics of the Universe (CTPU), Cosmology, Gravity and Astroparticle Physics Group (CGA), Тэджон, Южная Корея. 7 - 11.07.2025

4. 18-я Российская гравитационная конференция: Международная конференция по гравитации, астрофизике и космологии, Казанский федеральный университет, Казань, Россия. 25 - 29.11.2024
5. 27-я Международная конференция по физике частиц и космологии, Cosmo'24 Kyoto University, Киото, Япония. 21 - 25.10.2024
6. QUARKS 2024 XXII Международный семинар по физике высоких энергий, Переславль-Залесский, Россия. 19 - 24.05.2024
7. Международная конференция по физике частиц и космологии, посвященная памяти Валерия Рубакова, Alikhanyan National Laboratory, Ереван, Армения. 02 - 07.10.2023
8. Семинар в Институте теоретической и математической физики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия. 27.09.2023

Результаты также были представлены 27 октября 2025 г. на семинаре отдела теоретической физики Института ядерных исследований Российской академии наук.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** были рассмотрены основные мотивации и две ключевые проблемы, возникающие в модификациях Общей Теории Относительности (ОТО): а именно, неустойчивость космологического фона по отношению к возмущениям и модификация скорости тензорных мод в свете последних экспериментальных наблюдений. Теория Хорндески была представлена и использована в качестве основного примера для обсуждения этих вопросов.

В частности, была пояснена важность изотропного условия энергодоминантности (NEC). Было подчёркнуто, что в большинстве решений в рамках ОТО это условие выполняется, тогда как в модифицированных теориях гравитации, таких как теория Хорндески, оно может нарушаться. Было объяснено, что нарушение изотропного условия энергодоминантности позволяет строить несингулярные космологические решения. Однако также было отмечено, что в теории Хорндески существуют запрещающие теоремы, которые показывают, что несингулярные космологические решения, как правило, оказываются неустойчивыми при весьма общих предположениях.

Последнее послужило мотивацией к рассмотрению теории Хорндески в более общем пространстве-времени, также обладающем кручением, в попытке решить проблемы неустойчивости.

С другой стороны, была подробно рассмотрена проблема со скоростью тензорных мод в скалярно-тензорной гравитации. Было пояснено, как измерение скорости гравитационных волн от события GW170817 [1; 2] и его электромагнитного аналога — гамма-всплеска GRB170817A [3; 4] — практически исключило все приложения к тёмной энергии для скалярно-тензорных теорий с неминимальными связями. На основе этого обсуждения были перечислены связанные с этим теоретические ограничения в теории Хорндески и, в более общем случае, в теориях DHOST. Кроме того, была также объяснена проблема распада гравитационных волн на тёмную энергию.

В целом, эти проблемы послужили основанием для введения в лагран-

жиан дополнительного скалярно-векторного сектора в качестве возможного решения.

В **Главе 1** теория Хорндески была обобщена на пространство-время, обладающее одновременно кривизной и кручением, а также исследована устойчивость космологических решений в этой теории.

Более подробно, в **разделе 1.1** теория Хорндески до второго порядка — то есть с лагранжианом, содержащим члены \mathcal{L}_2 , \mathcal{L}_3 , \mathcal{L}_4 из выражения (1) — была обобщена до однопараметрического (c) семейства теорий Хорндески–Картана до второго порядка. Были выписаны квадратичные действия для тензорных, векторных и скалярных возмущений на FLRW-фоне. Определено число степеней свободы: ими, как и обычно, оказались две тензорные моды гравитона и одна скалярная мода.

Основным отличием, выявленным между теорией Хорндески–Картана и теорией Хорндески без кручения, являются дисперсионные соотношения для тензорных и скалярных мод. В частности, было показано, что параметр c теории влияет на дисперсионное соотношение скалярной моды. Теория со значением параметра $c = 0$ была идентифицирована как наиболее физически осмысленная. Также было показано, что в данной теории векторные моды не распространяются.

В **разделе 1.2** первой главы были определены свойства устойчивости несингулярных космологических решений в теории Хорндески–Картана с параметром $c = 0$. Результатом является запрещающая теорема, применимая к теориям Хорндески–Картана до второго порядка, которая обобщает ранее известную теорему для теории без кручения. Теорема формулируется следующим образом:

Для “наиболее общей” теории Хорндески–Картана до второго порядка в пространстве-времени с кручением следующие предположения, касающиеся решений в линейном порядке теории возмущений относительно FLRW-фона, являются взаимно несовместимыми:

1. Существование несингулярной космологии.
2. Отсутствие духов и градиентных неустойчивостей у гравитона и

скалярной моды.

3. Скорость распространения гравитона всегда меньше или равна скорости света.
4. Космологическое решение имеет стандартную асимптотику без проявлений «сильной гравитации» как в далёком прошлом, так и в далёком будущем.

В данной формулировке под “наиболее общей” теорией Хорндески–Картана до второго порядка понимаются теории, для которых специфическая комбинация функций Лагранжа, Θ (в стандартной терминологии космологических возмущений в теории Хорндески), не обращается в ноль.

Таким образом, предположение о скорости гравитона оказывается ключевым отличием, влияющим на устойчивость в теории Хорндески–Картана по сравнению с теорией Хорндески без кручения до второго порядка. Следовательно, в разделе 1.2 мы строим несингулярное космологическое решение, устойчивое во все времена, однако обладающее тем свойством, что скорость гравитона превышает скорость света в течение короткого интервала времени, непосредственно предшествующего отскоку. Как явствует из известных запрещающих теорем, подобное решение является совершенно новым и не может быть построено в теории Хорндески без кручения. Это также показывает, что включение кручения ослабляет запрещающую теорему в квадратичной теории Хорндески, поскольку для её выполнения требуется больше исходных предположений.

Действительно, в **разделе 1.3** первой главы была рассмотрена наиболее общая форма теории — полная теория Хорндески–Картана вплоть до кубического порядка (включая член \mathcal{L}_5 в действии) — и было обнаружено, что запрещающая теорема в этом случае нарушается. Было проведено детальное исследование квадратичного действия для возмущений первого порядка на фоне FLRW и подробно объяснены различия, позволившие получить решения без очевидных патологий. Также была явно построена конкретная модель полной теории Хорндески–Картана, представляющая собой глобально устойчивое несингулярное космологическое решение, в

котором все моды распространяются со скоростями, не превышающими скорость света.

В целом, это показало, что предположение о нулевом кручении в теории Хорндески лишь способствует математической простоте, но за счёт «искусственного» возникновения проблем глобальной устойчивости. Однако также было отмечено, что полученные результаты относятся к первому порядку теории возмущений, и в высших порядках могут обнаружиться существенные поправки. Таким образом, были намечены направления для дальнейших исследований, такие как анализ на менее симметричных фонах (например, в космологиях Бьянки) или изучение высших порядков возмущений.

В **Главе 2** для разрешения противоречия между теоретическими предсказаниями и экспериментальными измерениями скорости гравитационных волн в модифицированную теорию гравитации с неминимальными связями был введён скалярно-векторный сектор.

В качестве скалярно-тензорного сектора была рассмотрена теория DHOST, а именно, наиболее общая скалярно-тензорная теория, не содержащая духов Остроградского и включающая в лагранжиан вторые производные скалярного поля вплоть до кубической степени. Также было пояснено, как теория DHOST включает в себя теорию Хорндески и расширенные теории Хорндески в качестве частных случаев.

Далее, для построения скалярно-векторного сектора, та же самая теория DHOST была сформулирована в пяти измерениях. Затем была проведена компактификация Калуцы–Клейна, в результате которой была получена скалярно-векторно-тензорная (SVT) теория в четырёх измерениях. В этой теории скалярно-тензорный сектор представляет собой стандартную теорию DHOST, а скалярно-векторный сектор является новой теорией, ранее не представленной в литературе в такой общности. В частности, по построению векторное поле инвариантно относительно $U(1)$ калибровочных преобразований. Таким образом, SVT-теории, представленные в данной диссертации, представляют собой новое и значительное обобщение нашей предыдущей работы по теории Хорндески [49; 50] на

случай теории DHOST.

В полученной SVT-теории были проанализированы возмущения первого порядка на космологическом фоне. Были явно выписаны квадратичные действия для тензорных и векторных мод и вычислена их скорость распространения. Затем были идентифицированы теории, в которых скорости тензорных и векторных мод в точности совпадают на космологическом фоне.

Наконец, SVT-теория была применена к космологии поздней Вселенной. Как это принято в литературе, скалярная мода была отождествлена с возмущением тёмной энергии. В свою очередь, $U(1)$ -инвариантное векторное поле было отождествлено с фотоном. Следовательно, по построению в этих SVT-теориях гравитационные волны распространяются со скоростью, в точности равной скорости фотона. Также было показано, что данная теория обладает достаточной свободой для выполнения ограничения [42] на распад гравитационных волн в скаляр тёмной энергии.

В **Заключении** кратко изложены полученные результаты. Они сводятся к следующему:

1. Была построена квадратичная теория Хорндески на пространстве-времени с кривизной и кручением (теория Хорндески–Картана). Выделено однопараметрическое семейство таких теорий. Было представлено квадратичное действие для возмущений на космологическом FLRW-фоне. Более точно, показано, что кручение в формализме второго порядка не вводит новых степеней свободы в рассмотренных теориях Хорндески–Картана, по крайней мере, в первом порядке разложения по возмущениям. Идентифицированы степени свободы: существуют две тензорные моды и одна скалярная мода, динамика которой зависит от параметра теории. Найдены условия устойчивости и дисперсионные соотношения.
2. Для квадратичной теории Хорндески–Картана доказана запрещающая теорема. В ней утверждается, что невозможно построить несингулярное космологическое решение, для которого FLRW-фон остаётся

устойчивым по отношению к возмущениям первого порядка, распространяющимся со скоростями, меньшими или равными скорости света.

В этом подклассе было построено устойчивое решение в виде космологического отскока, однако с гравитоном, скорость которого становится сверхсветовой в течение короткого промежутка времени.

3. Запрещающая теорема не выполняется в кубической теории Хорндески–Картана (т.е. в теории, лагранжиан которой содержит вторые производные скалярного поля вплоть до кубической степени). Был идентифицирован ключевой механизм, обеспечивающий устойчивость космологического решения в этой теории: смешивание возмущений кручения и метрического поля. Это смешивание приводит к формированию двух существенно различных действий для тензорного и скалярного секторов, что позволяет независимо наложить условия несингулярности, устойчивости и ограничения на скорости в двух секторах без возникновения противоречий в какой-либо момент эволюции.

В соответствии с этим, в рамках кубической теории Хорндески–Картана было построено устойчивое отскоковое решение без возмущений, распространяющихся со скоростями, превышающими скорость света.

4. Построена новая скалярно-векторно-тензорная теория, обладающая следующими свойствами: она содержит скалярно-тензорный сектор теории DHOST; её векторный сектор инвариантен относительно $U(1)$ калибровочных преобразований; скорость распространения тензорных и векторных мод одинакова на космологическом фоне. В подклассе таких теорий, где скалярный сектор соответствует “Расширенной теории Хорндески”, удаётся обойти проблему распада гравитационных волн на скаляры тёмной энергии.

Основные публикации по теме диссертации

Основные результаты данной диссертации были опубликованы в четырёх статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. S. Mironov and **M. Valencia-Villegas**, “Quartic Horndeski-Cartan theories in a FLRW universe,” *Phys.Rev.D* 108 (2023), 024057.
2. S. Mironov and **M. Valencia-Villegas**, “Stability of nonsingular cosmologies in Galileon models with torsion: A No-Go theorem for eternal subluminality,” *Phys.Rev.D* 109 (2024), 044073.
3. S. Mironov and **M. Valencia-Villegas**, “Healthy Horndeski cosmologies with torsion,” *JCAP* 07 (2024) 030.
4. S. Mironov, A. Shtennikova and **M. Valencia-Villegas**, “Luminal scalar-tensor theories for a not so dark dark energy,” *Phys.Rev.D* 111, (2025) L101501

а также в материалах конференций:

5. **M. Valencia-Villegas**, “Quartic Horndeski-Cartan theories: a review on the stability of nonsingular cosmologies,” *PoS ICPPCRubakov2023* (2024) 033.

Список литературы

1. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral / B. P. Abbott [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Т. 119, № 16. — С. 161101. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.161101. — arXiv: 1710.05832 [gr-qc].
2. Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies / E. Abdalla [и др.] // JHEAp. — 2022. — Т. 34. — С. 49–211. — DOI: 10.1016/j.jheap.2022.04.002. — arXiv: 2203.06142 [astro-ph.CO].
3. An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A / A. Goldstein [и др.] // Astrophys. J. Lett. — 2017. — Т. 848, № 2. — С. L14. — DOI: 10.3847/2041-8213/aa8f41. — arXiv: 1710.05446 [astro-ph.HE].
4. INTEGRAL Detection of the First Prompt Gamma-Ray Signal Coincident with the Gravitational-wave Event GW170817 / V. Savchenko [и др.] // Astrophys. J. Lett. — 2017. — Т. 848, № 2. — С. L15. — DOI: 10.3847/2041-8213/aa8f94. — arXiv: 1710.05449 [astro-ph.HE].
5. Penrose R. Gravitational collapse and space-time singularities // Phys. Rev. Lett. — 1965. — Т. 14. — С. 57–59. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.14.57.
6. Hawking S. Occurrence of singularities in open universes // Phys. Rev. Lett. — 1965. — Т. 15. — С. 689–690. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.15.689.

7. *Rubakov V. A.* The Null Energy Condition and its violation // *Phys. Usp.* — 2014. — T. 57. — C. 128–142. — DOI: 10.3367/UFNe.0184.201402b.0137. — arXiv: 1401.4024 [hep-th].
8. *Horndeski G. W.* Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space // *Int. J. Theor. Phys.* — 1974. — T. 10. — C. 363–384. — DOI: 10.1007/BF01807638.
9. *Kobayashi T., Yamaguchi M., Yokoyama J.* Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations // *Prog. Theor. Phys.* — 2011. — T. 126. — C. 511–529. — DOI: 10.1143/PTP.126.511. — arXiv: 1105.5723 [hep-th].
10. *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. — T. 85. — C. 4438–4441. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.4438. — arXiv: astro-ph/0004134.
11. *Brans C., Dicke R. H.* Mach’s principle and a relativistic theory of gravitation // *Phys. Rev.* / под ред. J.-P. Hsu, D. Fine. — 1961. — T. 124. — C. 925–935. — DOI: 10.1103/PhysRev.124.925.
12. *Dvali G. R., Gabadadze G., Porrati M.* 4-D gravity on a brane in 5-D Minkowski space // *Phys. Lett. B.* — 2000. — T. 485. — C. 208–214. — DOI: 10.1016/S0370-2693(00)00669-9. — arXiv: hep-th/0005016.
13. *Easson D. A., Sawicki I., Vikman A.* G-Bounce // *JCAP.* — 2011. — T. 11. — C. 021. — DOI: 10.1088/1475-7516/2011/11/021. — arXiv: 1109.1047 [hep-th].
14. *Rubakov V. A.* More about wormholes in generalized Galileon theories // *Theor. Math. Phys.* — 2016. — T. 188, № 2. — C. 1253–1258. — DOI: 10.1134/S0040577916080080. — arXiv: 1601.06566 [hep-th].
15. *Libanov M., Mironov S., Rubakov V.* Generalized Galileons: instabilities of bouncing and Genesis cosmologies and modified Genesis // *JCAP.* —

2016. — Т. 08. — С. 037. — DOI: 10.1088/1475-7516/2016/08/037. — arXiv: 1605.05992 [hep-th].
16. *Kobayashi T.* Generic instabilities of nonsingular cosmologies in Horndeski theory: A no-go theorem // Phys. Rev. D. — 2016. — Т. 94, № 4. — С. 043511. — DOI: 10.1103/PhysRevD.94.043511. — arXiv: 1606.05831 [hep-th].
 17. *Kolevatov R., Mironov S.* Cosmological bounces and Lorentzian wormholes in Galileon theories with an extra scalar field // Phys. Rev. D. — 2016. — Т. 94, № 12. — С. 123516. — DOI: 10.1103/PhysRevD.94.123516. — arXiv: 1607.04099 [hep-th].
 18. *Cai Y., Piao Y.-S.* A covariant Lagrangian for stable nonsingular bounce // JHEP. — 2017. — Т. 09. — С. 027. — DOI: 10.1007/JHEP09(2017)027. — arXiv: 1705.03401 [gr-qc].
 19. Stability of Geodesically Complete Cosmologies / P. Creminelli [и др.] // JCAP. — 2016. — Т. 11. — С. 047. — DOI: 10.1088/1475-7516/2016/11/047. — arXiv: 1610.04207 [hep-th].
 20. Cosmological bounce and Genesis beyond Horndeski / R. Kolevatov [и др.] // JCAP. — 2017. — Т. 08. — С. 038. — DOI: 10.1088/1475-7516/2017/08/038. — arXiv: 1705.06626 [hep-th].
 21. *Mironov S., Rubakov V., Volkova V.* In hot pursuit of a stable wormhole in beyond Horndeski theory // Phys. Rev. D. — 2023. — Т. 107, № 10. — С. 104061. — DOI: 10.1103/PhysRevD.107.104061. — arXiv: 2212.05969 [gr-qc].
 22. *Volkova V. E., Mironov S. A.* Nonsingular cosmological scenarios in scalar-tensor theories and their stability // Usp. Fiz. Nauk. — 2025. — Т. 195, № 2. — С. 163–176. — DOI: 10.3367/UFNR.2024.12.039826. — arXiv: 2409.16108 [gr-qc].
 23. *Mironov S., Volkova V.* Complete stability for spherically symmetric backgrounds in beyond Horndeski theory // Int. J. Mod. Phys. A. —

2024. — T. 39, № 35. — C. 2443011. — DOI: 10.1142/S0217751X24430115. — arXiv: 2404.06297 [gr-qc].
24. *Babichev E., Charmousis C., Lehébel A.* Black holes and stars in Horndeski theory // *Class. Quant. Grav.* — 2016. — T. 33, № 15. — C. 154002. — DOI: 10.1088/0264-9381/33/15/154002. — arXiv: 1604.06402 [gr-qc].
 25. *Babichev E., Charmousis C.* Dressing a black hole with a time-dependent Galileon // *JHEP.* — 2014. — T. 08. — C. 106. — DOI: 10.1007/JHEP08(2014)106. — arXiv: 1312.3204 [gr-qc].
 26. *Evslin J., Qiu T.* Closed Timelike Curves in the Galileon Model // *JHEP.* — 2011. — T. 11. — C. 032. — DOI: 10.1007/JHEP11(2011)032. — arXiv: 1106.0570 [hep-th].
 27. *Sawicki I., Vikman A.* Hidden Negative Energies in Strongly Accelerated Universes // *Phys. Rev. D.* — 2013. — T. 87, № 6. — C. 067301. — DOI: 10.1103/PhysRevD.87.067301. — arXiv: 1209.2961 [astro-ph.CO].
 28. *Mironov S.* Mathematical Formulation of the No-Go Theorem in Horndeski Theory // *Universe.* — 2019. — T. 5, № 2. — C. 52. — DOI: 10.3390/universe5020052.
 29. *Ijjas A., Steinhardt P. J.* Classically stable nonsingular cosmological bounces // *Phys. Rev. Lett.* — 2016. — T. 117, № 12. — C. 121304. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.121304. — arXiv: 1606.08880 [gr-qc].
 30. Unbraiding the Bounce: Superluminality around the Corner / D. A. Dobre [и др.] // *JCAP.* — 2018. — T. 03. — C. 020. — DOI: 10.1088/1475-7516/2018/03/020. — arXiv: 1712.10272 [gr-qc].
 31. Null energy condition and superluminal propagation / S. Dubovsky [и др.] // *JHEP.* — 2006. — T. 03. — C. 025. — DOI: 10.1088/1126-6708/2006/03/025. — arXiv: hep-th/0512260.
 32. *Mironov S., Shtennikova A.* Stable cosmological solutions in Horndeski theory // *JCAP.* — 2023. — T. 06. — C. 037. — DOI: 10.1088/1475-7516/2023/06/037. — arXiv: 2212.03285 [gr-qc].

33. *Ageeva Y., Petrov P., Rubakov V.* Nonsingular cosmological models with strong gravity in the past // *Phys. Rev. D.* — 2021. — T. 104, № 6. — C. 063530. — DOI: 10.1103/PhysRevD.104.063530. — arXiv: 2104.13412 [hep-th].
34. Stable bouncing solutions in teleparallel Horndeski gravity / B. Ahmedov [и др.] // *Phys. Dark Univ.* — 2025. — T. 50. — C. 102100. — DOI: 10.1016/j.dark.2025.102100.
35. Reviving Horndeski theory using teleparallel gravity after GW170817 / S. Bahamonde [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2020. — T. 101, № 8. — C. 084060. — DOI: 10.1103/PhysRevD.101.084060. — arXiv: 1907.10057 [gr-qc].
36. Speed of Gravitational Waves and the Fate of Scalar-Tensor Gravity / D. Bettoni [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2017. — T. 95, № 8. — C. 084029. — DOI: 10.1103/PhysRevD.95.084029. — arXiv: 1608.01982 [gr-qc].
37. *Ezquiaga J. M., Zumalacárregui M.* Dark Energy After GW170817: Dead Ends and the Road Ahead // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — T. 119, № 25. — C. 251304. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.251304. — arXiv: 1710.05901 [astro-ph.CO].
38. *Sakstein J., Jain B.* Implications of the Neutron Star Merger GW170817 for Cosmological Scalar-Tensor Theories // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — T. 119, № 25. — C. 251303. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.251303. — arXiv: 1710.05893 [astro-ph.CO].
39. Strong constraints on cosmological gravity from GW170817 and GRB 170817A / T. Baker [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — T. 119, № 25. — C. 251301. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.251301. — arXiv: 1710.06394 [astro-ph.CO].
40. *Creminelli P., Vernizzi F.* Dark Energy after GW170817 and GRB170817A // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — T. 119, № 25. — C. 251302. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.251302. — arXiv: 1710.05877 [astro-ph.CO].

41. Scalar-tensor theories and modified gravity in the wake of GW170817 / D. Langlois [и др.] // Phys. Rev. D. — 2018. — Т. 97, № 6. — С. 061501. — DOI: 10.1103/PhysRevD.97.061501. — arXiv: 1711.07403 [gr-qc].
42. Gravitational Wave Decay into Dark Energy / P. Creminelli [и др.] // JCAP. — 2018. — Т. 12. — С. 025. — DOI: 10.1088/1475-7516/2018/12/025. — arXiv: 1809.03484 [astro-ph.CO].
43. *Langlois D., Noui K.* Degenerate higher derivative theories beyond Horndeski: evading the Ostrogradski instability // JCAP. — 2016. — Т. 02. — С. 034. — DOI: 10.1088/1475-7516/2016/02/034. — arXiv: 1510.06930 [gr-qc].
44. Degenerate higher order scalar-tensor theories beyond Horndeski up to cubic order / J. Ben Achour [и др.] // JHEP. — 2016. — Т. 12. — С. 100. — DOI: 10.1007/JHEP12(2016)100. — arXiv: 1608.08135 [hep-th].
45. Effective Description of Higher-Order Scalar-Tensor Theories / D. Langlois [и др.] // JCAP. — 2017. — Т. 05. — С. 033. — DOI: 10.1088/1475-7516/2017/05/033. — arXiv: 1703.03797 [hep-th].
46. *Langlois D.* Dark energy and modified gravity in degenerate higher-order scalar-tensor (DHOST) theories: A review // Int. J. Mod. Phys. D. — 2019. — Т. 28, № 05. — С. 1942006. — DOI: 10.1142/S0218271819420069. — arXiv: 1811.06271 [gr-qc].
47. *Tasinato G., Koyama K., Khosravi N.* The role of vector fields in modified gravity scenarios // JCAP. — 2013. — Т. 11. — С. 037. — DOI: 10.1088/1475-7516/2013/11/037. — arXiv: 1307.0077 [hep-th].
48. *Heisenberg L.* Scalar-Vector-Tensor Gravity Theories // JCAP. — 2018. — Т. 10. — С. 054. — DOI: 10.1088/1475-7516/2018/10/054. — arXiv: 1801.01523 [gr-qc].
49. *Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M.* Reviving Horndeski after GW170817 by Kaluza-Klein compactifications // Phys. Lett. B. — 2024. — Т. 858. — С. 139058. — DOI: 10.1016/j.physletb.2024.139058. — arXiv: 2405.02281 [hep-th].

50. *Mironov S., Shtennikova A., Valencia-Villegas M.* Higher derivative scalar-vector-tensor theories from Kaluza-Klein reductions of Horndeski theory // *Phys. Rev. D.* — 2025. — Т. 111, № 2. — С. 024028. — DOI: 10.1103/PhysRevD.111.024028. — arXiv: 2408.04626 [hep-th].
51. The Effective Field Theory of nonsingular cosmology / Y. Cai [и др.] // *JHEP.* — 2017. — Т. 01. — С. 090. — DOI: 10.1007/JHEP01(2017)090. — arXiv: 1610.03400 [gr-qc].
52. The Effective Field Theory of nonsingular cosmology: II / Y. Cai [и др.] // *Eur. Phys. J. C.* — 2017. — Т. 77, № 6. — С. 369. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4938-y. — arXiv: 1701.04330 [gr-qc].
53. *Brax P., Burrage C.* Constraining Disformally Coupled Scalar Fields // *Phys. Rev. D.* — 2014. — Т. 90, № 10. — С. 104009. — DOI: 10.1103/PhysRevD.90.104009. — arXiv: 1407.1861 [astro-ph.CO].
54. *Brax P., Burrage C., Englert C.* Disformal dark energy at colliders // *Phys. Rev. D.* — 2015. — Т. 92, № 4. — С. 044036. — DOI: 10.1103/PhysRevD.92.044036. — arXiv: 1506.04057 [hep-ph].
55. Horndeski speed tests with scalar-photon couplings / E. Babichev [и др.] // *JCAP.* — 2025. — Т. 01. — С. 041. — DOI: 10.1088/1475-7516/2025/01/041. — arXiv: 2407.20339 [gr-qc].

Научное издание
Валенсия Вильегас Хуан Маурисио
Свойства возмущений
в скалярно-векторно-тензорных
и Хорндески-Картановских космологиях
АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 18.03.2026

Ф-т 60х84/16 Уч.-изд.л. 1,3 Зак. № 007/26 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