

на правах рукописи

Миронов Сергей Андреевич

**Особенности возмущений в конформной
космологии и массивной гравитации**

специальность 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат

*диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук*

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, академик РАН,
Рубаков Валерий Анатольевич.

Официальные оппоненты:

Верходанов Олег Васильевич, доктор физико-математических наук, Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН), ведущий научный сотрудник,

Постнов Константин Александрович, доктор физико-математических наук, Государственный астрономический институт имени Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), профессор.

Ведущая организация:

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна

Защита состоится в часов на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

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

Автореферат разослан

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 002.119.01

доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

На нынешнем этапе развития теоретической космологии и наблюдательных методов можно многое с уверенностью сказать не только о современной Вселенной, но и о ее прошлом. Основой космологии служит модель горячего Большого взрыва, которая описывает эволюцию Вселенной, по крайней мере начиная с температур порядка 1 МэВ, и во всем согласуется с экспериментом. Однако, если рассматриваются совсем ранние этапы развития Вселенной, в такой модели обнаруживаются внутренние теоретические проблемы, связанные с тонкой подстройкой начальных данных.

В первую очередь, Вселенная, по крайней мере видимая ее часть, раньше состояла из 10^{89} причинно не связанных областей, так что априори на небе должно было бы наблюдаться большое количество сильно непохожих областей. Однако хорошо известно, что температура микроволнового фона изотропна с высокой точностью. В данном противоречии заключается суть проблемы горизонта.

Кроме того, современная Вселенная является с хорошей точностью плоской: из данных WMAP 2007 года, например, следует следующее ограничение на вклад кривизны в уравнение Фридмана:

$$-0.0178 < \Omega_k < 0.0063 ,$$

на уровне достоверности 95%. Принимая во внимание то, что относительный вклад кривизны растет на материально- и на радиационно-доминированной стадиях, можно заключить, что в планковскую эпоху плоскостность находилась на уровне $\Omega_k < 10^{-60}$. В теории горячего Большого взрыва это число не имеет естественного объяснения. В этом заключается суть проблемы плоскостности.

Современное значение энтропии Вселенной оценивается величиной 10^{88} . В теории горячего Большого взрыва эволюция, грубо говоря, яв-

ляется равновесной, так что энтропия существенно не менялась. Это означает, что столь огромное значение энтропии было изначальным, что, опять же, не находит естественного объяснения в рамках теории горячего Большого взрыва.

Последней, наиболее важной для нас проблемой является наличие первичных неоднородностей. Их существование не объясняется в теории горячего Большого взрыва. Более того, эти возмущения имеют ряд нетривиальных свойств. Например, они с хорошей точностью описываются единственной случайной величиной $\zeta(x)$. Кроме того, эта случайная величина оказывается практически гауссовой, а ее спектр мощности – практически плоским.

Чтобы избежать этих проблем, приходится предположить, что начальная стадия эволюции Вселенной сильно отличалась от той, что предполагается в теории горячего Большого взрыва. В частности, на этой стадии должна происходить генерация первичных возмущений. Учитывая их гауссовость, естественно предположить, что эти возмущения являются усиленными вакуумными флуктуациями. Наиболее известной моделью ранней Вселенной является инфляция (Старобинский'1979, Гут'1981, Линде'1982, Альбрехт и Стейнхардт'1982). Основная ее идея заключается в том, что до начала горячей стадии была эпоха почти экспоненциального расширения. Это позволяет решить проблему горизонта и плоскостности, а приближенная симметрия де Ситтера, которой обладает пространство-время на этой стадии, ответственна за плоскостность спектра (Муханов и Чибисов'1981). Наиболее просто инфляция реализуется в модели с одним дополнительным скалярным полем ϕ , которое медленно скатывается вдоль своего потенциала $V(\phi)$. Впоследствии реализуется стадия разогрева, после которой следует стандартная горячая стадия.

На данный момент модель инфляции находится в согласии с экспериментальными данными. Тем не менее, имеет смысл рассматривать аль-

тернативные теории. Другой моделью, менее популярной, но также решающей проблемы теории горячего Большого взрыва, является модель экпирозиса. В этой модели горячей стадии предшествовала эпоха медленного сжатия со сверхжестким уравнением состояния $p \gg \rho$ (Кхури и др.'2001). В рамках моделей экпирозиса сгенерировать первичные возмущения немного сложнее, чем в инфляции, но тоже возможно. Для этого вводится дополнительное поле, которое после определенной подстройки параметров приобретает плоский спектр.

Другой альтернативой служит класс моделей с конформной инвариантностью (Рубаков'2009, Креминелли и др.'2010). В этих моделях предполагается, что до горячей стадии была эпоха, когда действие было конформно инвариантным. В обеих моделях главной компонентой является скалярное поле, эволюционирующее во Вселенной. В первой модели это комплексное скалярное поле со стандартным кинетическим членом и отрицательным потенциалом четвертой степени, а во второй – два действительных скалярных поля, одно из которых имеет необычный кинетический член с производными второго порядка. Несмотря на существенное различие в мотивации и динамическом описании, эти две модели приводят к одному и тому же механизму генерации скалярных космологических возмущений. С этой точки зрения все сводится к модели с двумя скалярными полями ρ и Θ с лагранжианом

$$L = L_\rho + \frac{1}{2}\rho^2 (\partial_\mu \Theta)^2 , \quad (1)$$

где L_ρ определяет динамику поля ρ . Требуется, чтобы при растяжениях поле ρ преобразовывалось следующим образом: $\rho(x) \rightarrow \lambda\rho(\lambda x)$; предполагается, что имеет место нетривиальный фон ρ_c . Поле Θ растягивается тривиально, $\Theta(x) \rightarrow \Theta(\lambda x)$; возмущения поля Θ являются предшественниками адиабатических мод. Нужно потребовать, чтобы на протяжении всего периода генерации возмущений Θ влияние гравитационных эффектов на динамику этих двух полей было незначительным, и предположить

пространственную однородность фона ρ_c . Тогда можно однозначно найти эволюцию поля ρ :

$$\rho_c(x_0) = -\frac{1}{x_0}, \quad x_0 < 0, \quad (2)$$

где $x_0 = \eta$ – конформное время в модели с конформным скатыванием и $x_0 = t$ – физическое время в модели генезиса. В обеих моделях после эпохи конформной эволюции предполагается отскок или разогрев, после которого наступает горячая стадия. В целом, концепция похожа на инфляционную, однако динамика сильно отличается. Столь же естественно, как и в инфляции, в моделях с конформной симметрией возмущения скалярного поля приобретают плоский спектр мощности, причем предполагается, что спектр не искажается на стадии разогрева при переработке возмущений скалярного поля в адиабатические возмущения. Однако, более тонкие экспериментальные следствия этих моделей сильно отличаются от инфляционных. Во-первых, в моделях с конформной инвариантностью скалярные возмущения получают негауссовость необычной формы; во-вторых, как было показано ранее (Либанов и Рубаков’2010), они становятся анизотропными; в-третьих, в конформных моделях практически не генерируются гравитационные волны. Основной задачей данной диссертации является изучение специфических свойств первичных возмущений в конформных моделях, которые позволяют отличить эти модели от инфляционных.

Модели с псевдоконформной инвариантностью могут приводить к эволюции, похожей на экпирозис (Кхури и др. 2012). Простейшим примером служит теория с действием

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} |\partial_\mu \phi|^2 + \frac{\lambda}{4} |\phi|^4 \right]. \quad (3)$$

В такой модели на ранних этапах происходит медленное сжатие со сверхжестким эффективным уравнением состояния. Спектр скалярных возмущений в этой модели хорошо изучен, более того, в этом режиме известен спектр тензорных возмущений. Одним из результатов диссертации

является нахождение другого, быстрого режима эволюции на поздних временах и вычисление спектра тензорных возмущений на нем.

В последнее время вновь привлекает внимание теория массивной гравитации (Фирц и Паули'1939), отчасти из-за того, что современная Вселенная расширяется с ускорением. Ускоренное расширение может интерпретироваться как проявление темной энергии, но может указывать и на инфракрасную модификацию гравитации. Однако, нарушение общей ковариантности, как давно известно, дает ряд нетривиальных эффектов, таких как появление духов или выход из режима слабой связи на малых расстояниях. Более того, при попытке избавиться от духов появляются скачки ван Дама-Велтмана-Захарова (DVZ) и нестабильности Бульвара-Дезера. На самом деле, по-видимому, от этих проблем можно избавиться, если пожертвовать Лоренц-инвариантностью (Дубовский'2004, Рубаков и Тиняков'2008), что позволяет расширить количество возможных массовых членов и обойти все сингулярности в пространстве параметров. Следует отметить, что эти члены могут быть очень малы (например, порядка космологической постоянной) и не проявляться в эксперименте. Возможность избежать патологий была показана для линеаризованной гравитации с квадратичным действием

$$\begin{aligned}
& K_{\mu\nu,\alpha\beta} h^{\mu\nu} h^{\alpha\beta} = \\
& = \left\{ \frac{1}{2} \left(k_\mu k_\alpha \eta_{\beta\nu} + k_\mu k_\beta \eta_{\alpha\nu} + k_\nu k_\alpha \eta_{\beta\mu} + k_\nu k_\beta \eta_{\alpha\mu} \right) - \right. \\
& - \left. \left(k_\mu k_\nu \eta_{\alpha\beta} + k_\alpha k_\beta \eta_{\mu\nu} \right) - \frac{1}{2} k^2 \left(\eta_{\mu\alpha} \eta_{\nu\beta} + \eta_{\nu\alpha} \eta_{\mu\beta} \right) + k^2 \eta_{\mu\nu} \eta_{\alpha\beta} \right\} h^{\mu\nu} h^{\alpha\beta} + \\
& + m_0^2 h_{00}^2 + 2m_1^2 h_{0i}^2 - m_2^2 h_{ij}^2 + m_3^2 h_{ii}^2 - 2m_4^2 h_{00} h_{ii}, \tag{4}
\end{aligned}$$

где первая и вторая строки являются квадратичным приближением действия Гильберта-Эйнштейна, а третья строка содержит пять различных массовых членов, нарушающих и калибровочную (общееординатную), и лоренцеву $SO(d-1, 1)$ инвариантность, но сохраняющих пространственные вращения $SO(d-1)$. Теория имеет также симметрию относительно

отражений P и T , так что все скалярные физические величины зависят от квадратов ω^2 и \vec{k}^2 частот и пространственных импульсов. Лоренц-инвариантность восстанавливается, если пять массовых параметров выражаются через две независимые величины A и B :

$$\begin{aligned} m_0^2 &= B - A, \\ m_1^2 &= m_2^2 = A, \\ m_3^2 &= m_4^2 = B, \end{aligned}$$

а $\mathcal{K}_{\mu\nu,\alpha\beta}$ в (4) приводится к

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \left(k_\mu k_\alpha \eta_{\beta\nu} + k_\mu k_\beta \eta_{\alpha\nu} + k_\nu k_\alpha \eta_{\beta\mu} + k_\nu k_\beta \eta_{\alpha\mu} \right) - \left(k_\mu k_\nu \eta_{\alpha\beta} + k_\alpha k_\beta \eta_{\mu\nu} \right) - \\ &\quad - \frac{1}{2} (k^2 + A) \left(\eta_{\mu\alpha} \eta_{\nu\beta} + \eta_{\nu\alpha} \eta_{\mu\beta} \right) + (k^2 + B) \eta_{\mu\nu} \eta_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (5)$$

Лоренц-инвариантная массивная гравитация без духов отвечает случаю $A = B$ (массивная гравитация Паули-Фирца). Этот случай, однако, тоже имеет вышеперечисленные проблемы, и потому не выглядит жизнеспособным. Лоренц-нарушающие теории (4) могут не иметь духов при $m_0 = 0$ или $m_1 = 0$, и второй выбор сейчас является наиболее предпочтительным с точки зрения феноменологии.

Лоренц-нарушение ломает многие привычные свойства моделей квантовой теории поля и выглядит необычным во многих отношениях. Оно порождает многообразие нетривиальных квазичастиц, которые могут быть духами или сверхсветовыми частицами, или могут совсем не быть похожими на частицы. Одной из задач диссертации является проведение подробного анализа теории (4) с использованием нового метода изучения квадратичных теорий. Этот метод, разработанный в данной диссертации, основан на исследовании структуры собственных значений и позволяет эффективно выявлять патологии различных типов.

Цель работы состоит в изучении конформных механизмов генерации первичных космологических возмущений, исследовании их нетривиальных свойств, а также изучении свойств возбуждений в теории массивной гравитации.

Научная новизна и практическая ценность.

В данной диссертации исследован механизм генерации первичных скалярных возмущений в моделях с конформной инвариантностью. В частности, впервые проведено сравнение возмущений в модели с конформным скатыванием и модели генезиса и сделан вывод об их эквивалентности вплоть до первого нелинейного порядка. Одним из основных способов экспериментально отличить модели ранней Вселенной с конформной инвариантностью от инфляции является поиск негауссовости космического микроволнового фона. В данной диссертации впервые рассчитана негауссовость в модели с конформным скатыванием на уровне четырехточечной корреляционной функции полей (трехточечная равна нулю). Проведено ее сравнение с негауссовостями локальных форм и негауссовостью, получаемой в простейших моделях инфляции, отмечены особенности, позволяющие экспериментально отличить класс моделей с конформной симметрией от инфляции.

Подробно изучена псевдоконформная модель. В частности, в этой модели впервые найден классический режим эволюции, соответствующий быстрому сжатию Вселенной. Кроме этого, изучены тензорные возмущения. Впервые найден спектр мощности тензорных возмущений, генерируемых в быстром режиме, и на этой основе поставлены ограничения на параметры модели.

Кроме того, в данной диссертации разработан новый метод анализа теории массивной гравитации. Метод основан на анализе собственных значений кинетической матрицы. Это позволяет просто определять дисперсионные соотношения линейных возбуждений и, следовательно, быстро выявлять патологии различных типов (духи, тахионы или сверхсветовые частицы). Следует отметить, что метод эффективен для изучения любых квадратичных теорий и легко реализуется алгоритмически.

Апробация диссертации.

Основные результаты, полученные в диссертации, были доложены на

научных семинарах в ИЯИ РАН и ИТЭФ, международной конференции "2th Workshop on Geometric Methods in Theoretical Physics"(SISSA Триест, 2009), международной школе "International School for Subnuclear Physics"(Erice, 2011), международной конференции "4th Workshop on Geometric Methods in Theoretical Physics"(SISSA Триест, 2011), конкурсе им. Хохлова (МГУ, 2012), на международных конференциях "5th Workshop on Geometric Methods in Theoretical Physics"(SISSA Триест, 2012) и "2nd Workshop on Aspects of Non-Associative and Non-Commutative Geometries in String Theory"(Стамбул, 2013). По результатам диссертации опубликовано пять работ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из Введения, трех глав основного текста, Заключения и Приложения, содержит 114 страниц машинописного текста, в том числе 16 рисунков и список литературы из 141 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во Введении кратко обсуждаются проблемы теории горячего Большого взрыва, в особенности проблема первичных скалярных возмущений, и способы их решения. Объясняются общие свойства лагранжиана и фона для возмущений в конформных моделях. На примере модели с конформным скатыванием кратко приводятся основные известные свойства скалярных возмущений, в частности, спектр мощности фазы и модуля и статистическая анизотропия. Кроме того, изложен метод, который впоследствии используется для расчета триспектра. Также во Введении кратко определяется псевдоконформная модель ранней Вселенной и задачи в ее рамках. В последней части Введения упоминается концепция массивной гравитации и проблемы, к которым приводит Лоренц-инвариантный случай. Кратко описан Лоренц-нарушающий случай.

В Главе 2 подробно изучаются свойства возмущений в модели с конформным скатыванием (Разделы 2.1, 2.2, 2.3 и 2.5), а также проводится

сравнение этой модели и модели генезиса (Раздел 2.4). В разделах 2.1, 2.2 и 2.3 кратко излагаются известные ранее, но необходимые для понимания результаты. В разделе 2.1 речь идет о линейном приближении для возмущений модуля и фазы. В этом разделе выписаны уравнения и решения для возмущений и спектры мощности полей фазы и модуля. В разделах 2.2 и 2.3 обсуждается влияние инфракрасных радиальных мод на возмущения фазы и выводится статистическая анизотропия возмущений фазы.

В разделе 2.4 подробно изучается связь между возмущениями в модели с конформным скатыванием и в модели генезиса. В части 2.4.1 эти возмущения изучаются явно через уравнения движения. В частности, модуль скалярного поля в модели с конформным скатыванием имеет фоновое решение

$$\chi_c(\eta) = \frac{1}{h(\eta_* - \eta)} .$$

Такой же фон имеет следующая комбинация в модели генезиса:

$$\rho = \sqrt{2} f e^\pi .$$

Легко увидеть, что уравнения для возмущений $\delta\chi$ и $\delta\rho$ над этим фоном также совпадают. Более того, после добавления в модель генезиса скалярного поля нулевой конформной размерности (это делается как раз с целью генерации космологических возмущений) его уравнения совпадают с уравнениями для поля фазы в модели с конформным скатыванием. Это означает, что в линейном приближении возмущения идентичны. В первом порядке гамильтонианы взаимодействия тоже одинаковые:

$$\mathcal{H}_I = -L_{\text{int}} = -h\rho_c \delta\rho (\partial_\mu \Theta)^2 .$$

Таким образом, сделан вывод о том, что при адекватном соотношении динамических переменных, возмущения генерируются идентично (вплоть до первого нелинейного порядка), и свойства возмущений, такие как негауссовость, одинаковы в этих двух моделях. В части 2.4.2 приводится

симметричное доказательство того, что две модели являются одинаковыми с точки зрения генерации возмущений, и этот вывод обобщается на весь класс конформно инвариантных моделей. При этом одной масштабной симметрии без инверсии недостаточно, а требуется полная конформная инвариантность.

Раздел 2.5 посвящен вычислению негауссовости. В первых трех частях проводятся подготовительные вычисления, в частности, находятся гамильтониан взаимодействия, функции спаривания и T-произведения полей. Там же выписывается четырехточечная корреляционная функция (триспектр) в координатном представлении. Для расчета триспектра используется техника Келдыша-Швингера, позволяющая находить одно-временные корреляторы операторов в представлении взаимодействия:

$$\langle \mathcal{O} \rangle = \left\langle \left[\bar{T} \exp \left(i \int_{-\infty}^0 dx_0 H_I \right) \right] \mathcal{O}_{(I)} \left[T \exp \left(-i \int_{-\infty}^0 dx_0 H_I \right) \right] \right\rangle .$$

В нашем случае мы находим четырехточечную (трехточечная равна нулю) корреляционную функцию полей фазы, так как именно возмущения фазы на стадии разогрева перерабатываются в адиабатические возмущения. В части 2.5.4 описан переход в импульсное представление и найден триспектр в режиме малого переданного импульса (k_{12}). Этот режим связан с усилением негауссовости, что является одной из основных отличительных черт конформных моделей. Основной вклад в этом режиме выглядит следующим образом:

$$\langle \theta(\mathbf{k}_1)\theta(\mathbf{k}_2)\theta(\mathbf{k}_3)\theta(\mathbf{k}_4) \rangle = \frac{h^2\pi^2}{16} \frac{1}{k_{12}Q^4P^4} \left[1 - 3 \left(\frac{\mathbf{k}_{12}\mathbf{Q}}{k_{12}Q} \right)^2 \right] \left[1 - 3 \left(\frac{\mathbf{k}_{12}\mathbf{P}}{k_{12}P} \right)^2 \right] , \quad (6)$$

где $2\mathbf{Q} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$, $2\mathbf{P} = \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4$, $\mathbf{k}_{12} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$. В части 2.5.6 аналитически вычисляется триспектр в импульсном представлении без каких-либо приближений. Несмотря на то, что вычисления проводятся в рамках модели с конформным скатыванием, этот результат является общим для всех

моделей с конформной симметрией. Он используется в разделе 2.5.5, где обсуждаются величина и форма негауссовости с точки зрения феноменологии. Там же негауссовость представляется графически в различных режимах и сравнивается с локальными формами. Сделан вывод о том, что основной вклад, практически всегда определяется формулой (6), а оставшаяся часть триспектра дает небольшие поправки.

В Главе 3 изучается псевдоконформная модель ранней Вселенной. Сначала обсуждаются классические режимы эволюции (раздел 3.1): медленный режим сжатия, аналогичный модели экпирозиса, и быстрый режим коллапса. Эти режимы найдены аналитически, а после этого вся эволюция Вселенной смоделирована численно. Показано, что два режима действительно присутствуют и описывают классическую эволюцию Вселенной, причем переходная область между ними практически отсутствует. В разделе 3.2 проведено вычисление спектров мощности тензорных возмущений в обоих режимах. На их основе поставлены ограничения на параметры модели. При этом использованы ограничения на дополнительные релятивистские степени свободы, получаемые из нуклеосинтеза, а также результаты прямого поиска гравитационных волн. В обоих случаях ограничения на параметры модели оказываются слабыми.

В Главе 4 обсуждается теория массивной гравитации. В разделе 4.1 подробно изложен метод, используемый в этой главе. Он заключается в диагонализации кинетической матрицы и поиске ее собственных значений. Равенство нулю собственного значения означает полюс пропагатора, то есть определяет дисперсионное соотношение. Наиболее важной характеристикой для определения типа возбуждения является зависимость собственного значения от пространственного импульса и частоты. Поведения собственных значений, соответствующие духам, тахионам, сверхсветовым частицам и DVZ скачкам, приведены в конце раздела 4.1. В разделе 4.2 рассматривается случай Лоренц-нарушающей массивной гравитации. В первой части для примера рассматривается относительно

простой, вырожденный случай, при нулевом массовом параметре m_4 в системе покоя. После этого вырождение постепенно снимается – это позволяет отследить поведение собственных значений и описать процедуру поиска патологий на примере, допускающем двумерную визуализацию. Во второй части рассмотрено все пространство параметров в Лоренц-нарушающей массивной гравитации. Определены условия на области, в которых отсутствуют патологии. Кроме того, рассмотрены частные случаи, в которых эти условия могут быть разрешены аналитически. В разделе 4.3 кратко обсуждается и исследуется на предмет патологий простейшая модель Калуцы-Клейна. Такая модель не имеет патологий, так как является стандартной безмассовой гравитацией в пространстве-времени большей размерности, однако с точки зрения четырехмерной теории она является массивной гравитацией с дополнительными полями.

В приложение вынесено подробное обсуждение структуры собственных значений на пространстве параметров в массивной гравитации, там же приведены соответствующие графики.

В заключении перечислены основные результаты исследований, представленных в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

Для защиты выдвигаются следующие результаты:

1. Изучены свойства скалярных космологических возмущений в модели с конформным скатыванием. В частности, исследована негауссовость на уровне четырехточечной корреляционной функции. Сделаны предсказания для формы негауссовости, которые могут представлять существенный интерес с точки зрения экспериментального обнаружения негауссовости. Выполнено сравнение полученных форм негауссовости с имеющимися в литературе локальными формами, обнаружены существенные различия. Сделан вывод

о том, что исследование негауссовости в принципе позволяет отличить конформные модели от других космологических моделей, в частности, инфляционных.

2. Модель с конформным скатыванием сопоставлена с моделью генезиса с галилеоном. Сделан вывод о тождественности предсказаний свойств космологических возмущений вплоть до первого нелинейного порядка. Показано, что эти предсказания основаны исключительно на свойстве конформной инвариантности и поэтому справедливы для целого класса моделей.
3. Изучена модель псевдоконформной Вселенной. В ней найден новый режим классической эволюции, следующий за известным режимом экпирозиса и качественно от него отличающийся. Аналитические результаты, представляющие поведение Вселенной в этой модели от начала до горячей стадии, проверены с помощью численного моделирования.
4. В модели псевдоконформной Вселенной найдены спектры тензорных возмущений, генерируемых как в первом, так и во втором режиме. Сделан вывод о невозможности получения сильных ограничений на параметры модели на основе изучения тензорных возмущений.
5. Разработан эффективный метод изучения квадратичных теорий, позволяющий сравнительно просто определять все дисперсионные соотношения и выявлять патологии. Метод алгоритмический и легко программируется.
6. Изучена Лоренц-нарушающая массивная гравитация, в частности, получены зависимости дисперсионных соотношений от массовых параметров. Найдены области пространства параметров, свободные от патологий.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. M.Libanov, S.Mironov, V.Rubakov, Properties of scalar perturbations generated by conformal scalar field // Prog. Theor. Phys. Suppl. (2011) **190**, 120-134, arXiv:1012.5737.
2. M.Libanov, S.Mironov, V.Rubakov, Non-Gaussianity of scalar perturbations generated by conformal mechanisms // Phys. Rev. D (2011) **84**, 083502, arXiv:1105.6230.
3. S.Mironov, Pseudo-conformal Universe: late-time contraction and generation of tensor modes // Phys. Rev. D (2013) **87**, 043526, arXiv:1211.0262.
4. A.Mironov, S.Mironov, A.Morozov and And.Morozov, Resolving Puzzles of Massive Gravity with and without violation of Lorentz symmetry // Class. Quant. Grav. (2010) **27**, 125005, arXiv:0910.5243.
5. A.Mironov, S.Mironov, A.Morozov and And.Morozov, Linearized Lorentz-Violating Gravity and Discriminant Locus in the Moduli Space of Mass Terms // J. Phys. (2010) A **43**, 055402, arXiv:0910.5245.