

На правах рукописи



**Хуршудян Мартирос Жораевич**

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ  
И УСКОРЕННОЕ РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ**

01.04.02 – Теоретическая физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный педагогический университет» на кафедре теоретической физики.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, доцент  
**Макаренко Андрей Николаевич**

**Официальные оппоненты:**

**Червон Сергей Викторович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И.Н. Ульянова», кафедра физики и технических дисциплин, профессор

**Казинский Петр Олегович**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра квантовой теории поля, доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Защита состоится 25 мая 2017 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.07, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (главный корпус СФТИ ТГУ, аудитория 211).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru).

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/KhurshudyanMZ25052017.html>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » марта 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Киреева Ирина Васильевна

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Ускоренное расширение крупномасштабной Вселенной является одной из основных проблем в современной теоретической физике и космологии. Согласно астрофизическим наблюдениям, темная энергия ( $\approx 70\%$ ) с отрицательным давлением обеспечивает желаемое решение проблемы ускоренного расширения крупномасштабной Вселенной. С другой стороны, согласно тем же наблюдениям, темная материя необходима для того, чтобы, например, сформировались структуры и для того, чтобы, кривая вращения галактики была плоской. Минимальная модель в современной космологии известна как  $\Lambda$ CDM, где космологическая постоянная вместе с нерелятивистской холодной темной материей составляет основную часть энергетического источника Вселенной, а динамика фона определяется согласно теории относительности. Эта модель может объяснить наблюдаемые данные, однако в этом случае возникает проблема известная как проблема космологической постоянной. Одна из первых попыток решения этой проблемы была связана с понятием динамической темной энергии: квинтэссенция, фантом, квинтом и различные голографические модели. Объяснить укоренное расширение можно и с помощью так называемых темных жидкостей, например, газ Чаплыгина (и его модификации) или газ Ван - дер - Ваальса. Решение проблемы можно достичь благодаря вязкости. Подход внедрения моделей темной энергии широко используется в современной космологии, однако, различные модификации уравнений поля на лагранжевом уровне имеют более фундаментальный характер, где темная энергия возникает естественным образом. Другая важная тема в современной космологии - взаимодействие между темными компонентами крупномасштабной Вселенной. С одной стороны, наблюдения показывают возможность взаимодействия, а с другой стороны, отсутствует фундаментальная теория, отвечающая на вопрос, почему взаимодействие должно существовать и как возникла эта связь. Наблюдаемое ускоренное расширение крупномасштабной Вселенной - непервая фаза ускоренного расширения в истории Вселенной. Однако надо помнить, что физика и механизм инфляции в ранней Вселенной полностью отличаются от физики ускоренного расширения крупномасштабной Вселенной.

**Степень разработанности.** Описанию различных этапов расширения Вселенной в последние годы было посвящено достаточно большое количество работ. Однако предложить модель, которая бы реалистично описывала всю эволюцию Вселенной, до сих пор не удается. В рамках настоящего диссертационного исследования обсуждаются новые космологические модели с участием различной вариативной призрачной темной энергии, позволяющей объяснить ускоренное расширение крупномасштабной Вселенной, а также переход к ускоряющейся Вселенной. Проведено детальное сравнение теоретических результатов с имеющимися наблюдательными данными и ограничениями на параметры моделей, что позволило сделать сравнительный анализ предложенных моделей. Кроме того, было продемонстрировано, что для расширяющейся Вселенной находящейся в фазе преобладания излучения возможно рождение безмассовых частиц. Также обсуждаются различные альтернативные феноменологические модели, в частности, космологические модели, включающие новые формы взаимодействия и новые параметризации уравнения состояния темной энергии, в именно, новую модель меняющегося политропного газа и взаимодействующую обобщенную темную энергию с обрезаниями Ноджири - Одинцова. Во всех случаях для космологических проблем присущих подобным теориям либо находятся решения, либо показано, что проблема не возникает.

**Цель работы.** Построение новых феноменологических моделей, описывающих ускоренное расширение крупномасштабной Вселенной для вариативной призрачной темной энергии, меняющегося политропного газа и новых нелинейных взаимодействий между темной энергией и темной материей.

**Научная новизна.** Представлены новые космологические модели, где общая теория относительности рассматривалась как теория для описания динамики Вселенной

и включающие новые феноменологические модификации призрачной темной энергии. В этих моделях наблюдается рождение безмассовых частиц, что делает предложенные модификации более интересными для изучения ранней Вселенной. Построены новые космологические модели с участием новых форм нелинейных взаимодействий между темной энергией и темной материей, а также новой параметризации уравнения состояния темной энергии, включая новую модель меняющегося политропного газа и взаимодействующую обобщенную темную энергию с обрезаниями Ноджири - Одинцова. Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми и опубликованы в ведущих международных журналах.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для разработки аналоговой системы, позволяющей изучать физику крупномасштабной Вселенной и основы квантовой космологии и гравитации в лабораториях. Следует отметить, что в рассматриваемых моделях космологические проблемы решаются либо за счет существования взаимодействия, либо проблемы не возникают вообще. Кроме того, модели могут быть использованы для объяснения ускоренного расширения крупномасштабной Вселенной.

**Методология и методы исследования.** Результаты, представленные в Главе 2 и в п. 3.3, получены с помощью численного анализа. Результаты, представленные в пп. 3.1 и 3.2, получены с помощью аналитических расчетов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Построены космологические модели на основе новых моделей вариативной призрачной темной энергии. Кроме того, было продемонстрировано рождение безмассовых частиц для расширяющейся Вселенной в эпоху преобладания излучения.
2. Построены космологические модели, основанные на новых формах взаимодействия между темной энергией и темной материей.
3. Построены космологические модели с новым меняющимся политропным газом.
4. Построены космологические модели на основе взаимодействующей обобщенной темной энергии с обрезаниями Ноджири - Одинцова. Все построенные модели реалистично описывают ускоренное расширение крупномасштабной Вселенной.

**Степень достоверности.** Научные положения и выводы полностью обоснованы. Достоверность результатов обеспечиваются: корректностью построения математических моделей, внутренней согласованностью и согласием полученных в диссертации результатов с известными результатами, процитированными в диссертации.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты получены лично автором. Совместно с научным руководителем были сформулированы цели и задачи исследования.

**Апробация работы.** Основные результаты, представленные в диссертации, систематически докладывались на различных семинарах в Германии, Франции, Польше и Армении. Результаты были представлены на конференциях: Quantum Field Theory and Gravity 2016 (Томск, 2016), International Workshop Siberian Cosmology Days (Томск, 2016) и Workshop on Current Problems in Physics: Zielona Gora - Lviv (Зелена - Гура, Польша, 2015).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах [1] - [6] в журналах, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 78 страниц с 12 рисунками и 15 таблицами. Библиография содержит 106 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** содержится краткое описание проблем в современной космологии, которые мотивировали на данную работу. Также в кратком формате представляются результаты и структура диссертации.

В **первой главе** рассматриваются основные идеи, связанные с современной космологией, которые активно освещаются в научной литературе. В п. 1.1 обсуждаются уравнения Фридмана, описывающие фоновую динамику крупномасштабной Вселенной для метрики Фридмана - Робертсона - Уокера. Идее космической инфляции, являющейся теоретической основой для описания ускоренного расширения ранней Вселенной, посвящен п. 1.2. В п. 1.3 и 1.4 обсуждаются задачи ускоренного расширения крупномасштабной Вселенной с возможными решениями, включающими динамические модели темной энергии и модификации общей теории относительности. Геометрические методы анализа космологических моделей и алгоритмы используются при ограничении теоретических моделей. В частности, в п. 1.5 представлены различные инструменты, способные отличить феноменологические модели друг от друга. Одним из таких инструментов является анализ уравнений состояния с двумя параметрами

$$r = \frac{\ddot{a}}{aH^3} \quad \text{и} \quad s = \frac{r-1}{3(q-1/2)} \quad (1)$$

где  $q$  является параметром замедления и определяется как

$$q = -1 - \frac{\dot{H}}{H^2}. \quad (2)$$

Данный анализ был успешно применен для многих космологических моделей. Другими возможностями, позволяющими различать модели темной энергии, являются  $(\omega'_{de}, \omega_{de})$ ,  $Om$ ,  $Om3$  и иерархические анализы уравнений состояния. Анализ  $(\omega'_{de}, \omega_{de})$  предполагает изучение поведения темной энергии в  $\omega'_{de} - \omega_{de}$  плоскости, где  $\omega'_{de}$  является производной от параметра уравнения состояния темной энергии по  $N = \log a$ . Анализ  $Om$  предполагает изучение следующего параметра:

$$Om = \frac{x^2 - 1}{(1+z)^3 - 1}, \quad (3)$$

где  $x = H/H_0$ ,  $H_0$  - это значение параметра Хаббла при  $z = 0$ . Трехточечная диагностика  $Om3$  предполагает рассмотрение следующего параметра:

$$Om3 = \frac{Om(z_2, z_1)}{Om(z_3, z_1)}, \quad (4)$$

где

$$Om(z_2, z_1) = \frac{x(z_2)^2 - x(z_1^2)}{(1+z_2)^2 - (1+z_1)^2}. \quad (5)$$

С другой стороны, иерархический анализ уравнений состояния требует вычислить и изучить следующие параметры:

$$S_3^{(1)} = A_3, \quad S_4^{(1)} = A_4 + 3(1+q), \quad (6)$$

и т.д., где

$$A_n = \frac{a^{(n)}}{aH^n} \quad \text{и} \quad a^{(n)} = \frac{d^n a}{dt^n}. \quad (7)$$

Иерархический анализ уравнения состояния для модели  $\Lambda$ CDM равен 1. Тем не менее, для моделей с динамической темной энергией  $S_n^{(1)}$  принимает различные значения. Модель  $\Lambda$ CDM может быть выбрана в качестве отправной точки, чтобы выявить возможные отклонения. В случае анализа уравнений состояния надо использовать отклонения масштабного фактора второго, третьего и более высоких порядков. *От* полагается только на производную первого порядка и объединяет в себе параметр Хаббла и красное смещение. Следовательно, *От* является более простым методом диагностики. Принято считать, что различные поведения обсуждаемых параметров указывают на различие этих моделей. В научной литературе существует четкое определение поведения этих параметров, которое дает возможность понять природу темной энергии.

Во **второй** главе рассматриваются различные новые феноменологические модификации призрачной темной энергии, которые используются для построения космологических моделей и решения проблем крупномасштабной Вселенной. Для описания динамики крупномасштабной Вселенной, которая включает излучение, вариативную призрачную темную энергию, взаимодействующую с темной материей, когда динамика фона определена согласно общей теории относительности, надо учесть следующие уравнения:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P), \quad (8)$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = 0, \quad (9)$$

$$\dot{\rho}_{de} + 3H(\rho_{de} + P_{de}) = -Q, \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_{dm} + 3H\rho_{dm} = Q. \quad (11)$$

Кроме этого, для двух космологических моделей (п. 2.1 и 2.2) надлежащим образом был рассмотрен вопрос о рождении безмассовой частицы в радиационно-доминированной расширяющейся Вселенной. Каковы условия для рождения частиц в случае динамических фонов? Считается, что частицы рождаются, так как положительные и отрицательные частотные части полей смешиваются в процессе расширения Вселенной (согласно Гейзенбергу). Рождение частиц - очень важная тема в современной космологии. Рождение материи в расширяющейся Вселенной широко обсуждается с макроскопических, а также с микроскопических точек зрения. Один из самых интересных выводов из общей теории относительности заключается в том, что безмассовые частицы (фотоны, гравитоны или другие безмассовые частицы) не появляются в радиационно-доминированной Вселенной, потому что положительные и отрицательные частотные функции для безмассовых полей не смешиваются в процессе расширения в связи с конформной инвариантностью метрики. Тем не менее, картина может быть изменена, если рассматривать модифицированные теории гравитации, например, теорию  $f(R)$  - гравитации. Рождение частиц в расширяющихся условиях происходит из-за квантования поля, однако, отсутствие симметрии группы Пуанкаре в искривленном пространстве - времени приводит к проблеме определения частиц и вакуумных состояний. Проблема может быть решена с помощью метода диагонализации гамильтонова оператора через трансформацию Боголюбова, а также с подходящим граничным условием для получения конечных результатов для числа созданных частиц. Общее количество рожденных частиц  $N_k$  и античастиц  $\bar{N}_k$  в соответствии с этим методом определяется следующим образом:

$$N_k = \bar{N}_k = |\beta_k(\eta)|^2 = \frac{1}{4\omega_k(\eta)}|\chi'_k|^2 + \frac{\omega_k(\eta)}{4}|\chi_k|^2 - \frac{1}{2}, \quad (12)$$

где

$$\omega^2(\eta) = k^2 + m^2 a^2(\eta) - \frac{a''(\eta)}{a(\eta)}, \quad (13)$$

и  $\omega_k$  - это частота частицы,  $k$  - это число Фурье или число волн частицы, а  $\eta = \int dt/a$  - это конформное время. Уравнение движения для разделенных состояний  $\chi_k(\eta)$  является дифференциальным уравнением второго порядка с двумя независимыми решениями и выглядит следующим образом:

$$\chi''(\eta) + \omega_k^2(\eta)\chi_k(\eta) = 0. \quad (14)$$

Кроме того, каждое из решений уравнения (14) должно быть нормировано:

$$W_k(\eta) = \chi_k(\eta)\chi_k'^*(\eta) - \chi_k'(\eta)\chi_k^*(\eta) = -2i. \quad (15)$$

С другой стороны, если предположить, что скалярное поле находится в состоянии вакуума в определенный начальный момент времени  $\eta_i$ , следует принять во внимание следующие начальные условия для  $\eta_i$ :

$$\chi_k(\eta_i) = 1/\sqrt{\omega_k(\eta_i)} \quad \text{и} \quad \chi_k'(\eta_i) = i\sqrt{\omega_k(\eta_i)}. \quad (16)$$

В п. 2.1 представлены космологические последствия при условии, когда вариативная призрачная темная энергия определенного типа взаимодействует с холодной темной материей. Плотность вариативной призрачной темной энергии имеет следующий вид [1]:

$$\rho_{de} = \alpha H + \beta a^m H^2, \quad (17)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $m$  постоянные. С другой стороны, было сделано предположение о существовании следующего типа взаимодействия

$$Q = 3Hb\rho, \quad (18)$$

В (18)  $\rho$  - это полная плотность энергии эффективной темной жидкости, которая состоит из рассматриваемой вариативной призрачной темной энергии и темной материи, а  $b$  - постоянная. Для соответствующих значений параметра  $m$  космологическая модель, содержащая невзаимодействующую вариативную призрачную темную энергию, темную материю и излучение, дает переходную Вселенную и уменьшение  $m$  влечет за собой уменьшение шансов получить переходную Вселенную. В частности, когда  $m = 0$ , что относится к обычной призрачной темной энергии, появление переходной Вселенной невозможно. Это прямо указывает на то, что предполагаемое изменение призрачной темной энергии делает модель очень гибкой в отношении будущих данных наблюдений. С другой стороны, рассмотрев параметр замедления  $q$ , можно увидеть некоторые ограничения накладываемые на параметр  $m$ . В частности, поскольку  $0 < q \leq -1$ , то  $0 < m \leq 1.5$ . Можно увидеть, что для соответствующих значений параметров также возможно пересечение фантомной линии. Значения  $\Omega_{de}$  и  $\Omega_{dm}$  при  $z = 0$  показывают, что модель свободна от проблемы космологических совпадений. Ограничения, полученные из сравнения модуля расстояния с данными наблюдений в случае невзаимодействующей модели дали:  $\beta = 1.7$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $m = 1.0$ ,  $H_0 = 0.72$ ,  $\Omega_{dm} \approx 0.3$  и  $\Omega_r \approx 7 \times 10^{-5}$ , в то время как красное смещение  $z_{tr} \approx 0.42$ . Таким образом, вариативная призрачная темная энергия в расширяющейся Вселенной будет иметь только квинтэссенциальный характер и при  $z = 0$  будет космологической постоянной с  $\omega_{de} = -1$ . Плотность энергии темной материи в случае взаимодействующей модели согласно (11) и (18) выглядит следующим образом:

$$\dot{\rho}_{dm} + 3H(1-b)\rho_{dm} = 3Hb\rho_{de}. \quad (19)$$

Уравнение (19) вместе с (8), (9) и (10) позволяют получить и изучать поведение космологических параметров. В этом случае параметр  $m$  оказывает значительное влияние на состояние параметра замедления  $q$  и параметр уравнения состояния вариативной призрачной темной энергии, представленный в (17) (см. рис. 3 из [1]). Последующее

сравнение теоретических результатов с данными наблюдения показывает, что максимальное соответствие возможно при  $\beta = 0.7$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $b = 0.03$ ,  $m = 0.5$ ,  $\Omega_{dm} \approx 0.3$ ,  $\Omega_r \approx 7 \times 10^{-5}$ ,  $H_0 = 0.72$ , а красное смещение  $z_{tr} \approx 0.42$ . Наблюдая за поведением  $\Omega_{dm}$  и  $\Omega_{de}$  и значениями при  $z = 0$  можно видеть, что эта модель также свободна от проблемы совпадений (рис. 4 из [1]). В нижней части рисунков 3 и 4 из [1] представлена поведения  $q$ ,  $\omega_{de}$ ,  $\omega_{tot}$  и  $\Omega_i$  в зависимости от параметра взаимодействия  $b$  для фиксированных значений параметра  $m$ . В таблицах 2 и 3 из [1] представлены нынешние значения параметров  $(r, s)$ ,  $(\omega'_{de}, \omega_{de})$  и  $q$ . В результате сравнения теоретических результатов с данными наблюдения осталось лишь квинтэссенциальное состояние темной энергии и суммарной эффективной жидкости. Кроме того, были выявлены соответствующие ограничения на параметры моделей, необходимые для радиационно-доминированной Вселенной. Для каждого из космологических сценариев путем численного анализа возможно получить общее число появляющихся безмассовых частиц. Кроме того, общее число появившихся безмассовых частиц для обеих моделей это возрастающая функция. В ходе анализа выяснилось, что рождение безмассовых частиц согласно рассматриваемым космологическим моделям принимает периодический характер в нынешней крупномасштабной Вселенной.

В п. 2.2 рассматривается другая модель вариативной призрачной темной энергии, дающая модель Вселенной, для которой теоретические результаты согласуются с последними данными наблюдений. В этой модели эффективная жидкость является радиационной жидкостью в ранней Вселенной и переходит в темную энергию в крупномасштабной Вселенной. Предложенная модель вариативной призрачной темной энергии имеет следующую плотность энергии [2]:

$$\rho_{de} = \alpha H + \beta \rho_{dm}^m H^2, \quad (20)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $m$  являются постоянными, а  $\rho_{dm}$  является плотностью темной материи. Такая модификация открывает более глубокое понимание предпосылок для формирования темной энергии в ранней Вселенной ввиду существования темной материи. В связи с тем, что будет рассматриваться вопрос о рождении частиц в радиационно-доминированной Вселенной, то конфигурация модели, которая соответствует нынешней Вселенной, должна быть фиксированной, принимая во внимание данные наблюдения. Легко увидеть, что (20), (10) с (18) позволяют получить параметр замедления:

$$q = -1 - \frac{\dot{H}}{H^2} = \frac{1}{2} (2 - (1 - 3\omega_{de})\Omega_{de} - \Omega_{dm}). \quad (21)$$

В этом случае увеличение  $m$  ведет к увеличению переходного красного смещения и увеличению нынешних значений параметра замедления  $q$  и  $\omega_{de}$ . В нынешней Вселенной параметр  $b$  оказывает существенное влияние на эти параметры. Более того, увеличение  $b$  ведет к увеличению переходного красного смещения для переходной Вселенной и к увеличению значений  $q$  и  $\omega_{de}$  для нынешней Вселенной. Стоит отметить, что конфигурация нынешней Вселенной закрепляется через  $\Omega_{de} \approx 0.7$ ,  $\Omega_{dm} \approx 0.3$  и  $\Omega_r \approx 0.3 \times 10^{-5}$ . Это значит, что в нынешней Вселенной отсутствует проблема космологического совпадения, поэтому минимальной моделью будет являться невзаимодействующая модель. Однако, взаимодействия предоставляют относительно простой механизм для получения радиационно-доминированной Вселенной. Сравнение модуля расстояния с данными наблюдений с целью добиться лучшего соответствия привело к следующим ограничениям на параметры модели:  $b = 0.01$ ,  $\alpha = 0.75$  and  $\beta = 0.85$ ,  $m = -0.2$ ,  $H_0 = 0.69$ ,  $\Omega_{de} \approx 0.7$ ,  $\Omega_{dm} \approx 0.3$  и  $\Omega_r \approx 0.3 \times 10^{-5}$ . Значения  $(r, s)$ ,  $(\omega'_{de}, \omega_{de})$  и  $q$  для нынешней Вселенной представлены в таблице 1 из [2]. Начиная с первого закона термодинамики и предполагая, что темная энергия, темная материя, радиация и горизонт событий в тепловом равновесии и имеют одинаковую температуру, можно получить термодинамику призрачной темной энергии. На рис. 3 из [2] отображено поведение  $S_3^{(1)}$ . Легко увидеть, что  $S_3^{(1)}$  является хорошим индикатором для этой модели, который показывает возможные отклонения от модели  $\Lambda$ CDM. В рамках космографического анализа пока-



зано, что предложенная космологическая модель является подходящей для нынешней Вселенной. Более того, эффективная жидкость является радиационно-подобной жидкостью в радиационно-доминированной Вселенной и развивается в квинтэссенциальную модель темной энергии для нынешней Вселенной. Описанная в начале этой главы математическая формулировка рождения безмассовых частиц демонстрирует их рождение в радиационно-доминированной Вселенной в соответствии с рассматриваемой космологической моделью (см. рис. 4 из [2]).

В п. 2.3 была выработана космографическая модель, относящаяся к крупномасштабной Вселенной, которая включает другую модель вариативной призрачной темной энергии ( $\rho_{de} = \alpha\rho_{dm}^m H + \beta H^2$ ) [3]. Рассмотренная вариативная призрачная темная энергия является еще одной феноменологической модификацией призрачной темной энергии. Эта модификация связана с физикой, которая выступает в роли связующего звена между холодной темной материей и геометрией (с точки зрения параметра Хаббла). Изучение рождения безмассовых частиц в случае этой новой модели является темой для отдельного разговора, в частности, когда будет выполнено детальное сравнение теоретических результатов с данными наблюдений, а также будут найдены соответствующие ограничения на параметры. С другой стороны, исследование показывает, что невзаимодействующие модели призрачной темной энергии для соответствующих значений параметра  $m$  дают теоретические результаты, которые в целом не противоречат данным наблюдения. Было рассмотрено влияние различных форм взаимодействия на космологию с учетом взаимодействия между темной энергией и нерелятивистской холодной темной материей. Ввиду активного обсуждения знакозменяющего взаимодействия, были рассмотрены соответствующие сценарии, включающие подобные взаимодействия. Всего было рассмотрено 3 вида знакозменяющего взаимодействия ( $Q = 3bHq(\rho_{de} + \rho_{dm})$  и  $Q = 3|b|H(\rho_{dm} - \rho_{de})$ ). С другой стороны, в случае невзаимодействующей и взаимодействующей модели, изучив поведение параметров замедления, была установлена фаза перехода от замедленной расширяющейся Вселенной к крупномасштабной Вселенной. Кроме этого, были установлены значения  $(r, s)$  и  $(\omega'_{de}, \omega_{de})$  параметров для нынешней Вселенной, которые дополняют анализ моделей путем анализа От и иерархического анализа уравнения состояния. Как и ожидалось, этих двух анализов оказалось достаточно, чтобы выявить различие между новыми моделями и стандартной моделью  $\Lambda$ CDM. Помимо этого, эти анализы показали, как рассмотренные взаимодействия влияют на поведение взаимодействующих моделей. Рассмотренные ограничения космологических параметров, полученные в результате эксперимента PLANCK 2015, были дополнены ограничения на параметры модели для лучшего соответствия теоретическим результатам с модулю расстояния.

Цель **третьей главы** “Альтернативный Подход” заключается в представлении различных космологических моделей, обеспечивающих альтернативный взгляд на проблему ускоренного расширения крупномасштабной Вселенной, когда динамика фона согласуется с общей теорией относительности, однако используются экзотические формы уравнения состояния и взаимодействия между темной энергией и темной материей. Вместо непосредственного решения уравнений поля для этих моделей (п. 3.1 и 3.2) был выполнен анализ фазового пространства. Для анализа динамической системы взаимодействующих политропных газов были введены новые параметры

$$x = \frac{\rho_p}{3H^2}, \quad (22)$$

$$y = \frac{P_p}{3H^2}, \quad (23)$$

$$z = \frac{\rho_m}{3H^2}, \quad (24)$$

и

$$N = \ln a. \quad (25)$$

С другой стороны, для того, чтобы получить рациональные решения, должны быть

использованы следующие ограничения:  $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq z \leq 1$  и  $x + z = 1$ . Параметр состояния для газа принимает следующую форму:  $\omega_p = y/x$ . Нетрудно догадаться, что в этом случае параметр замедления принимает следующую форму:  $q = (1 + 3y)/2$ . В этой части представлены аттракторы, которые относятся к взаимодействующим политропным моделям темной энергии. В целях исследования была предположена явная форма взаимодействия  $Q$  [4]. Для первой модели в п. 3.1.1 рассматривается следующее взаимодействие:

$$Q = 3Hb \left( \rho_p + \rho_m + \frac{\rho_m^2}{\rho_p + \rho_m} \right). \quad (26)$$

В этом случае существует только одна физически стабильная и приемлемая критическая точка

$$(x, y) = \left( \frac{2b - 1 + \sqrt{1 - 4b^2}}{2b}, -1 \right), \quad (27)$$

когда

$$n \leq -1, \quad 0 < b < \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2n^2 - 1}{n^2}} - \frac{1}{4n}, \quad (28)$$

или

$$-1 < n < 0, \quad 0 < b < \frac{1}{2}. \quad (29)$$

Это решение – масштабирующийся аттрактор, так как

$$r = \frac{\Omega_m}{\Omega_p} = \frac{\sqrt{1 - 4b^2}}{2(1 - 2b^2)} - \frac{1}{2}, \quad (30)$$

является постоянной. Дальнейший анализ показывает, что масштабирующийся аттрактор описывает состояние Вселенной, где параметр уравнения состояния эффективной жидкости  $\omega_{eff} = -1$ , параметр замедления  $q = -1$ , а параметр уравнения состояния политропного газа показывает фантомное поведение (квинтэссенциальное поведение невозможно) при

$$\omega_p = -\frac{2b}{2b + \sqrt{1 - 4b^2} - 1}, \quad (31)$$

когда

$$n \leq -1, \quad 0 < b \leq \frac{1}{2\sqrt{2}}, \quad (32)$$

или

$$-1 < n < 0, \quad 0 < b < \frac{1}{2}, \quad (33)$$

или

$$-\sqrt{\frac{1 - 4b^2}{(1 - 8b^2)^2}} + \frac{2b}{1 - 8b^2} < n \leq -1, \quad \frac{1}{2\sqrt{2}} < b < \frac{1}{2}, \quad (34)$$

Во второй модели в п. 3.1.2 рассматривается следующая форма взаимодействия:

$$Q = 3Hb \left( \rho_p + \rho_m + \frac{\rho_p^2}{\rho_p + \rho_m} \right). \quad (35)$$

Для этой модели существует только один масштабирующийся аттрактор, который имеет форму:

$$(x, y) = \left( \frac{\sqrt{1 - 4(b-1)b} - 1}{2b}, -1 \right), \quad (36)$$

Как видно  $\omega_{eff} = -1$ ,  $q = -1$ , в то время как

$$\omega_p = -\frac{2b}{\sqrt{1 - 4(b-1)b - 1}}, \quad (37)$$

и

$$r = \frac{\Omega_m}{\Omega_p} = \frac{2b + \sqrt{1 - 4(b-1)b}}{2(1-b)}. \quad (38)$$

Рассматриваемый масштабирующийся аттрактор представляет Вселенную, где политропный газ является фантомной энергией, при выполнении одного из следующих условий:

$$n \leq -1, \quad 0 < b < \frac{n-1}{2n}, \quad (39)$$

или

$$-1 < n < 0, \quad 0 < b < 1. \quad (40)$$

В п. 3.1.3 рассматривается космологическая модель, в которой используется взаимодействие следующего вида:

$$Q = 3Hb \left( \rho_p + \rho_m + \frac{\rho_p \rho_m}{\rho_p + \rho_m} \right). \quad (41)$$

Среди четырех полученных решений из автономной системы только одно является физически целесообразным и принимает следующую форму:

$$(x, y) = \left( \frac{1+b - \sqrt{1+(5b-2)b}}{2b}, -1 \right), \quad (42)$$

Соответствующий анализ показывает, что данное решение является масштабирующимся аттрактором и политропный газ фантомной энергией, когда

$$n \leq -1, \quad 0 < b < \frac{2n-5}{10n} + \frac{1}{10} \sqrt{\frac{5+4n^2}{n^2}}, \quad (43)$$

или

$$-1 < n < 0, \quad 0 < b < 1. \quad (44)$$

Для этой модели  $\omega_{eff} = -1$ ,  $q = -1$ ,  $\omega_p = -2b / \left( 1+b - \sqrt{1+(5b-2)b} \right)$  и

$$r = \frac{\Omega_m}{\Omega_p} = \frac{3b + \sqrt{1+(5b-2)b} - 1}{2(1-b)}. \quad (45)$$

Взаимодействия, рассмотренные в 3.1.1 – 3.1.3, отображают исключительно переход от темной энергии в темную материю. Недавно было обнаружено, что во время эволюции Вселенной направления этого перехода может меняться. Это значит, что обмен между темной материей и темной энергией имел место в истории Вселенной. Знакоменяющее взаимодействие, рассмотренное в этом пункте, построено с использованием параметра замедления из взаимодействия, рассмотренного в 3.1.1 – 3.1.3. В частности, рассматриваются следующие формы для  $Q$ :

$$Q = 3Hbq \left( \rho_p + \rho_m + \frac{\rho_m^2}{\rho_p + \rho_m} \right), \quad (46)$$

$$Q = 3Hbq \left( \rho_p + \rho_m + \frac{\rho_p^2}{\rho_p + \rho_m} \right), \quad (47)$$

и

$$Q = 3Hbq \left( \rho_p + \rho_m + \frac{\rho_p \rho_m}{\rho_p + \rho_m} \right). \quad (48)$$

В ходе анализа выяснилось, что полученные критические точки нестабильны.

В п. 3.2 рассматривается новая феноменологическая модель темной жидкости, способная объяснить ускоренное расширение нынешней Вселенной и фазовый переход к этой ускоренно расширяющейся Вселенной [5]. Недавние открытия в современной космологии, нацеленные на понимание ускоренного расширения крупномасштабной Вселенной, включают различные сценарии и подходы. Один из известных и признанных подходов заключается в моделировании содержания Вселенной с помощью темной жидкости. Примером темной жидкости является газ Чаплыгина, и в современной космологии существует ряд важных исследований с использованием уравнения газа Чаплыгина. Политропный газ и газ Чаплыгина обеспечивают явную функциональную зависимость давления от энергетической плотности газа. Более того, эта зависимость нелинейна. Здесь рассматриваемая модель меняющегося политропного газа выстроена аналогично меняющемуся газу Чаплыгина следующего вида:

$$P_c = A\rho_c - \frac{BH^{-k}}{\rho^\alpha}, \quad (49)$$

и имеет следующее уравнение состояния [5]

$$P_{de} = AH^{-k} \rho_{de}^{1+1/n}, \quad (50)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $k$  и  $n$  являются постоянными. Космологические модели, рассмотренные в этом разделе, содержат холодную темную материю без давления в качестве второго компонента нынешней Вселенной. Кроме того, предполагается, что существует взаимодействие между этими компонентами. Соответствующие аттракторы могут быть обнаружены, когда форма взаимодействия между темной энергией и темной материей явно определена. В этом случае рассматриваются формы взаимодействия, которые получаются из следующей общей формы

$$Q = q^m (3Hb\rho_i + \gamma\dot{\rho}_i), \quad (51)$$

$m$ ,  $b$  и  $\gamma$  постоянные, а индекс  $i$  обозначает плотность энергии эффективной жидкости или одного из темных компонентов. Кроме того, соответствующие ограничения на параметр уравнения состояния меняющегося политропного газа, на параметр уравнения состояния эффективной жидкости и на параметр замедления позволяют отделить физически обоснованное поведение моделей от прочих. В случае рассматриваемых моделей все аттракторы можно вывести аналитическим путем. Поэтому возможно (заранее) наложить некоторые ограничения на параметры моделей и организовать исследование. Это сделано для того, чтобы упростить и сократить обсуждение проблемы. Аналитические формы аттракторов позволяют легко манипулировать налагаемыми ограничениями и обсуждать соответствующие последствия в свете новых данных наблюдений. Анализ начинается с моделей, которые содержат взаимодействия, относящиеся к  $m = 0$  в (51) с  $q \in [-1, 0)$ ,  $\omega_{de} \in [-1.05, 0)$ ,  $k \in (-2, 2)$  и  $n \in (-2, 2)$ . Нижний предел  $\omega_{de}$  согласуется с ограничениями эксперимента PLANCK 2015. Было сделано предположение о существовании двух классов взаимодействий между темными компонентами крупномасштабной Вселенной. Для каждого сценария был проведен анализ фазового пространства и с налагаемыми ограничениями на параметры модели, были обнаружены возможные космологические последствия для соответствующей Вселенной. Также были выявлены соответствующие аттракторы. Анализ фазового пространства в данном случае представлял из себя относительно простой математический подход, который позволил увидеть с аналитической точки зрения, что космологические модели с знакоменяющим взаимодействием также содержат аттракторы. Более того, анализ фазового пространства этих моделей показывает, что во всех случаях Вселенная с низким

красным смещением является Вселенной де Ситтера. Однако космологические взаимодействующие модели с фиксированным знаков обладают масштабирующимся аттрактором, т.е. включают решение проблемы космологического совпадения. Особый интерес представляют решения C.1.1

$$(x, y) = \left( \frac{1}{1+b}, -1 \right), \quad (52)$$

для  $Q = 3Hb\rho_{de} + \gamma\dot{\rho}_{de}$  и C.3.1 с  $(x, y) = (1-b, -1)$  для

$$Q = 3Hb(\rho_{dm} + \rho_{de}) + \gamma(\dot{\rho}_{dm} + \dot{\rho}_{de}). \quad (53)$$

Согласно этим решениям нынешняя Вселенная содержит фантомную темную энергию. В свете эксперимента PLANCK 2015 упомянутые решения следует оставить для дальнейшего рассмотрения. Были вычислены значения параметров  $(\omega'_{de}, \omega_{de})$  и  $(r, s)$  для нынешней Вселенной. График поведения параметра замедления  $q$  показывает, что все модели содержат фазовый переход от замедленной расширяющейся Вселенной к ускоряющейся расширяющейся Вселенной. Вычисление современных значений  $(\omega'_{de}, \omega_{de})$  и  $(r, s)$  соответствует представленным графикам поведения параметров  $q$ ,  $\Omega_{de}$  и  $\Omega_{dm}$ .

С другой стороны, в 3.3 были рассмотрены конкретные модели обобщенной голографической темной энергии с обрезаниями Ноджири - Одинцова, которая определяется как [6]

$$\rho_{de} = \frac{3c^2}{L^2}, \quad (54)$$

с

$$\frac{c}{L} = \frac{1}{L_f} [\alpha_0 + \alpha_1 L_f + \alpha_2 L_f^2] \quad (55)$$

где  $L_f$  это горизонт будущего, который определяется как

$$L_f = a \int_t^\infty \frac{dt}{a}, \quad (56)$$

где  $c$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  постоянные. Форма представленная в (55), можно рассматривать как частный случай общей формы

$$\frac{c}{L} = \frac{1}{L_f} \sum_i \alpha_i L_f^i. \quad (57)$$

Легко заметить, что  $\dot{L}_f = HL_f - 1$ . Был проведен подробный анализ взаимодействующих и невзаимодействующих моделей и систематическое сравнение теоретических результатов с наблюдательными данными. Помимо космографического анализа для каждого случая были высчитаны и приведены в соответствующей таблице нынешние значения параметра замедления  $q$ ,  $(\omega_{de}, \omega'_{de})$ ,  $(r, s)$  и значения переходного красного смещения  $z_{tr}$  для нескольких значений параметра взаимодействия  $b$ . В ходе рассмотрения обобщенной голографической темной энергии с обрезком Ноджири - Одинцова (особая модель) на ранних этапах изучения была выявлена возможность объединенной ранней и поздней Вселенной на основе фантомной космологии. Более того, существующий интерес к этой модели темной энергии вызван вероятностью симметрии фантомного - нефантомного перехода, который проявляется таким образом, что Вселенная может иметь эффективное фантомное уравнение состояния как в ранний, так и в поздний период. В целом этот вопрос еще не изучен, но есть возможность, что Вселенная может иметь несколько фантомных и нефантомных фаз, которые делают такие модели очень привлекательными. В ходе исследования было выявлено, что для значений параметров модели при отсутствии взаимодействия между темной энергией и темной материей, когда имеется только лишь квинтэссенциальная модель темной энергии, соответствующая форма взаимодействия может интересным образом изменить положение вещей. В ходе изучения поведения параметра уравнения состояния было выявлено, что для

соответствующих значений параметров моделей для высокого красного смещения темная энергия характеризуется фантомным поведением в случае взаимодействий, описывающихся  $Q = 3Hb(\rho_{de} + \rho_{dm})$  и  $Q = 3Hb\rho_{dm}^2/(\rho_{de} + \rho_{dm})$ . С другой стороны, в случае невзаимодействующей модели темной энергии и подходящего взаимодействия,  $Q = 3Hb\rho_{dm}\rho_{de}/(\rho_{de} + \rho_{dm})$  и  $Q = 3Hb\rho_{de}^2/(\rho_{de} + \rho_{dm})$ , наблюдается квинтэссенциальная природа темной энергии при высоком красном смещении. Однако, независимо от наблюдаемой природы при высоких красных смещениях в ходе эволюции происходит изменение природы темной энергии, и при низком красном смещении существует либо квинтэссенциальная Вселенная, либо фантомная Вселенная, где значение параметра состояния находится в пределах ограничений, которые налагаются данными наблюдений. Получение изменения в поведении параметра состояния темной энергии указывают на вероятность определения формы взаимодействия между темной энергией и темной материей. Более того, каждая форма взаимодействия оставляет уникальный след на параметре состояния темной энергии, а также след на динамике других космологических параметров, переходном красном смещении и нынешних значениях этих параметров. Принимая во внимание возможность изучения моделей темной энергии через термодинамику, была проверена действенность второго закона термодинамики для всех рассмотренных феноменологических моделей. Это позволило завершить изучение моделей, используя  $Om$ ,  $Om3$ , тем самым подтверждая, что эти параметры позволяют ясно увидеть возможные отклонения от стандартной модели  $\Lambda$ CDM. Вдобавок эти инструменты хорошо подходят для того, чтобы отличать рассматриваемые модели друг от друга. С другой стороны, график поведения параметра  $S_3$  показывает, что этот параметр - хороший инструмент для изучения моделей для низких красных смещений. П. 2.4 и 3.4 содержат выводы относительно полученных результатов.

В **заключении** приведены основные результаты полученные в диссертации и обсуждаются направления дальнейшего исследования.

## Работы автора по теме диссертации

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

- [1] **Khurshudyan M.** Varying ghost dark energy and particle creation / M. Khurshudyan // European Physical Journal Plus. – 2016. – Vol. 131, is. 2. – 25. – 8 p. – DOI:10.1140/epjp/i2016-16025-7. – 0,5 п.л.
- [2] **Khurshudyan M.** Low redshift universe and a varying ghost dark energy / M. Khurshudyan // Modern Physics Letters A. – 2016. – Vol. 31, is. 9. – 1650055. – 11 p. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217732316500553>. – 0,69 п.л.
- [3] **Khurshudyan M. Z.** On a phenomenology of the accelerated expansion with a varying ghost dark energy / M. Z. Khurshudyan, A. N. Makarenko // Astrophysics and Space Science. – 2016. – Vol. 361, is. 6. – 187. – 13 p. – DOI:10.1007/s10509-016-2775-3. – 0,76/0,53 п.л.
- [4] **Khurshudyan M.** A varying polytropic gas universe and phase space analysis / M. Khurshudyan // Modern Physics Letters A. – 2016. – Vol. 31, is. 16. – 1650097. – 15 p. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217732316500978>. – 0,33 п.л.
- [5] **Khurshudyan M.** On a holographic dark energy model with a Nojiri - Odintsov cut-off in general relativity / M. Khurshudyan // Astrophysics and Space Science. – 2016. – Vol. 361, is. 7. – 232. – 12 p. – DOI:10.1007/s10509-016-2821-1. – 0,88 п.л.
- [6] **Khurshudyan M.** Some non linear interactions in polytropic gas cosmology: Phase space analysis / M. Khurshudyan // Astrophysics and Space Science. – 2015. – Vol. 360, is.1. – 33. – 6 p. – DOI:10.1007/s10509-015-2540-z. – 0,72 п.л.



**Издательство Томского государственного  
педагогического университета**

Усл.печ. л.: 0,8

Уч.изд. л.: 1,8

Сдано в печать: 01.03.2017 г.

Гарнитура: Times NR

**Заказ № 973/Н**

Отпечатано в Типографии ФГБОУ ВО «ТГПУ»

г. Томск, ул. Герцена, 49. Тел.: (382-2)31-14-84.

E-mail: [tipograf@tspu.edu.ru](mailto:tipograf@tspu.edu.ru)