

*На правах рукописи*

Иванов  
Михаил Михайлович

Первичные неоднородности  
в неминимальных космологических моделях  
и слабо-нелинейный режим  
формирования структур

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

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

**Научный руководитель:**

**Сибиряков Сергей Михайлович**, кандидат физико-математических наук, ИЯИ РАН, отдел теоретической физики, старший научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

**Зыбин Кирилл Петрович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма, Лаборатория проблем физики космоса, главный научный сотрудник.

**Верходанов Олег Васильевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, лаборатория радиоастрофизики, ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

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](http://www.inr.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.119.01  
доктор физико-математических наук,  
чл.-корр. РАН

С. В. Троицкий

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Космология является одной из наиболее бурно развивающихся областей современной физики. Прогресс в космологии обусловлен, главным образом, прецизионными измерениями анизотропии температуры реликтового излучения и неоднородностей в распределении материи во Вселенной, которые способствовали становлению стандартной космологической модели,  $\Lambda$ CDM ( $\Lambda$  — Cold Dark Matter). Данная модель предполагает, что только 5% плотности энергии Вселенной заключены в обычном веществе, в то время как основной вклад принадлежит темной материи ( $\sim 25\%$ ) и темной энергии ( $\sim 70\%$ ).

Темная материя (ТМ) — это вещество, аналогичное по своим свойствам обычной пылевидной материи, но не испытывающее электромагнитное взаимодействие, и поэтому невидимое для нас. Достоверно известно лишь то, что темная материя взаимодействует гравитационно. В настоящий момент имеется исчерпывающее количество независимых наблюдений, свидетельствующих о существовании ТМ: гравитационное линзирование, кривые вращения галактик, формирование структур и форма осцилляций в спектре анизотропии микроволнового излучения. Несмотря на обилие космологических данных, точная природа темной материи до сих пор неизвестна. Простейшая модель, описывающая весь спектр экспериментальных данных — это т.н. «холодная» темная материя, состоящая из тяжелых частиц, не имеющих зарядов по калибровочной группе Стандартной модели, которые при этом слабо взаимодействуют между собой или не взаимодействуют вовсе.

В отличие от темной материи, свойства темной энергии весьма экзотичны, в частности, она должна обладать отрицательным давлением. Такое давление необходимо для описания ускоренного расширения Вселенной, которое было независимо обнаружено из наблюдений удаленных сверхновых Ia, микроволнового излучения и барионных акустических осцилляций. Природа темной энергии также до сих пор надежно не установлена. Наиболее простая модель — космологическая постоянная, постоянный  $\Lambda$ -член в правой части уравнения Эйнштейна.

Еще одним феноменом, на который указывают последние наблюдения, является космическая инфляция. Теория космической инфляции предполагает, что в первые мгновения существования Вселенная испы тывала ускоренное расширение. Это расширение «разгладило»

пространственную кривизну и «растянуло» первоначально причинно-связанные области пространства до колоссальных размеров. В процессе инфляции флуктуации квантовых полей, существование которых гарантировано принципом неопределенности, превращаются в неоднородности классического поля и становятся источником первичных возмущений плотности. Инфляционное расширение характеризуется крайне высокими плотностями, которые могли достигать  $(10^{16} \text{ ГэВ})^4$ . Флуктуации, которые формируются на инфляционной стадии, представляют уникальную возможность исследовать физику при столь высоких энергиях с помощью космологических наблюдений.

Наиболее популярные инфляционные модели предполагают существование скалярного поля *инфлатона*, чей потенциал должен быть достаточно плоским в определенном диапазоне значений поля.

Фундаментом современной космологии является общая теория относительности (ОТО), основанная на принципах эквивалентности и инвариантности относительно локальных лоренцевых преобразований. В настоящее время нет ни одного экспериментального факта, который бы указывал на неполноту ОТО. Есть, однако, веские теоретические основания полагать, что ОТО всё же не является фундаментальной теорией гравитации. С квантовой точки зрения ОТО представляет собой эффективную теорию поля, которая справедлива при энергиях меньше энергии Планка ( $\sim 10^{19} \text{ ГэВ}$ ). Описание гравитации при энергиях выше планковской (т.е. ультрафиолетовое пополнение ОТО) является одной из важнейших проблем теоретической физики, известной также как проблема квантовой гравитации.

Исторически первая модель перенормируемой гравитации в четырех измерениях была предложена более 40 лет назад. Это теория с квадратичными инвариантами кривизны в действии (далее просто «квадратичная гравитация»), разработанная К. Стелле [1]. Для некоторой области параметров модель даже является асимптотически свободной, т.е. справедливой при любых энергиях [2]. Квадратичная гравитация — теория со старшими производными, которая подвержена неустойчивости Остроградского на классическом уровне. На квантовом уровне модель имеет дополнительную массивную степень свободы спина 2, кинетическая энергия которой имеет «неправильный» знак. При квантовании этой степени свободы обычным образом энергия возможных состояний данной частицы оказывается неограничен-

ной снизу, что указывает на неминуемый распад вакуума (неустойчивость любого состояния с конечной энергией). С другой стороны, данную частицу можно проквантовать таким образом, что энергия будет ограничена снизу и неустойчивости можно будет избежать, однако состояния частицы будут иметь отрицательную норму. Данная частица при этом называется *духом*. Наличие духов не позволяет интерпретировать теорию в рамках обычной квантовой механики, из-за чего квадратичная гравитация не приобрела широкой популярности. Однако, не так давно интерес к этой теории возобновился (см., к примеру, [3]). Даже если в текущем варианте квадратичная гравитация и не является окончательной теорией квантовой гравитации, она интересна с феноменологической точки зрения, в частности, можно ожидать интересные особенности инфляционной динамики.

Еще одним интересным кандидатом на роль квантовой гравитации является гравитация Хоржавы—Лифшица, представленная в 2009 г. П. Хоржавой [4] и основанная на идеях, заимствованных из физики конденсированных сред, которые были предложены Е.М. Лифшицем в 1941 г. [5]. Хоржава предложил, что ценой отказа от лоренцевой симметрии на высоких энергиях возможно ультрафиолетовое пополнение ОТО в рамках перенормируемой квантовой теории. Стоит отметить что перенормируемость первоначальной модели Хоржавы (т.н. проектируемая гравитация Хоржавы—Лифшица) была доказана на строгом уровне странительно недавно [6, 7]. Вскоре после пионерской работы Хоржа вы выяснилось, что проектируемая модель не является феноменологически приемлимой при малых энергиях [8]. В том же 2009 г. Д. Блас, О. Пужолас и С. Сибиряков предложили расширенную модель, называемую «непроектируемой гравитацией Хоржавы—Лифшица», которая имеет низкоэнергетический предел, близкий к ОТО [9]. Ключевой особенностью является то, что в этом пределе непроектируемая гравитация Хоржавы—Лифшица не воспроизводит ОТО в точности, следовательно нарушение лоренцевой симметрии должно иметь следствия и при низких энергиях. Предел непроектируемой гравитации Хоржавы—Лифшица, справедливый при энергиях много меньше массы Планка, известен как «хронометрическая гравитация».

Хронометрическая гравитация построена в терминах скалярного поля *хронона*, описывающего выделенное расслоение времени (по сути, выделенную систему отсчета). Хронометрическая теория может

быть рассмотрена как частный случай т.н. «Эйнштейн—эфир гравитации», — наиболее общей эффективной теории описывающей нарушение лоренцевой симметрии присутствием единичного времениподобного векторного поля, названного *эфиром* [10].

Подход Хоржавы к квантовой гравитации предполагает, что лоренц-инвариантность (ЛИ) не является точной симметрией природы. В этой связи важно заметить, что справедливость ЛИ была проверена с высокой точностью только для частиц Стандартной модели [11], в то время как ограничения в других секторах (гравитации, темной материи, темной энергии) либо весьма слабы, либо вовсе отсутствуют. При этом ЛИ в секторе Стандартной модели может быть динамически возникающим свойством, характерным для низких энергий [12, 13] и нарушенным при высоких. Что же касается других секторов, то в зависимости от их динамики они могут характеризоваться существенными отклонениями от ЛИ даже при низких энергиях.

Изучение следствий отклонений от ЛИ в секторах гравитации, инфлатона, темной материи и темной энергии интересно по ряду причин. Во-первых, это дает весьма заманчивую возможность протестировать модели квантовой гравитации Хоржавы—Лифшица с помощью космологических наблюдений. Во-вторых, любое экспериментальное указание на отклонение от ЛИ будет иметь революционное значение для развития фундаментальной физики. Если же таковых отклонений не будет обнаружено, то можно будет говорить об экспериментальной верификации ЛИ в соответствующих секторах.

Наиболее важной космологической наблюдаемой, позволившей на дежно установить справедливость стандартной космологической модели, является анизотропия температуры микроволнового реликтового излучения. Несмотря на впечатляющие успехи, количество информации, которое может быть получено с помощью наблюдений микроволнового излучения, ограничено. Этот предел обусловлен тем, что информация о температуре и поляризации реликтового излучения собирается с небесной сферы, которая является двумерной поверхностью. С другой стороны, распределение материи (например, галактик) во Вселенной представляет собой трехмерный объём данных (еще одно измерение дано красным смещением), что в итоге даёт доступ к значительно большему количеству Фурье-гармоник, позволяющему уменьшить статистическую ошибку определения космологиче-

ских параметров. Таким образом, есть все основания утверждать, что распределение материи, называемое крупномасштабной структурой Вселенной (КСВ), имеет потенциал стать основным источником новой информации о космологии в ближайшем будущем.

В настоящее время уже функционирует ряд глубоких обзоров (напр. SDSS, DES, 2MASS, PAU). В ближайшие годы их количество ещё больше возрастёт с введением в строй новых спутников и телескопов, таких как «Евклид» (запуск в 2020 г.), DESI (начало работы в 2019), LSST (начало работы в 2023). Эти обзоры покроют колоссальный объём Вселенной и дадут много новой информации о её эволюции и физике. Извлечение этой информации из наблюдательных данных является весьма сложной задачей и требует, в частности, точного описания процесса нелинейного сгущивания. Наиболее прямолинейный подход к этой задаче — численное моделирование методом частиц (N-body method). Несмотря на существенный прогресс в этой области, обусловленный непрерывным ростом вычислительной мощности, метод частиц всё ещё является достаточно ресурсозатратным и не позволяет расширить понимание физических процессов, ответственных за формирование наблюдаемых сигналов. Кроме того, представляется затруднительным использование численного моделирования для выявления наиболее эффективных стратегий поиска эффектов за рамками стандартной космологической модели. Эти факторы мотивируют развитие аналитических методов описания формирования структур в нелинейном режиме.

Важный класс составляют методы, основанные на теории возмущений. Эти методы опираются на тот факт, что на космологических масштабах больше нескольких десятков мегапарсек формирование структур обусловлено ТМ, которая может быть описана как почти идеальная жидкость без давления [14, 15]. Начальные возмущения ТМ малы и подчиняются гауссовой статистике, т.е. их статистические свойства полностью определены двухточечной корреляционной функцией (или её Фурье-образом, спектром мощности). Нелинейные эффекты при этом описываются при помощи разложения полей скорости и плотности ТМ в ряд Тейлора по степеням начальных возмущений. В предположении отсутствия давления и вихревой компоненты скорости ТМ, данный метод известен как стандартная эйлерова теория возмущений (СТВ) [16]. Дальнейшее усреднение по статистическому

ансамблю приводит к петлевому разложению для нелинейных корреляторов космологических полей.

СТВ является простым и естественным методом учета нелинейностей, однако она имеет ряд недостатков. Эти недостатки так или иначе связаны с чувствительностью к коротковолновым («ультрафиолетовым», УФ) или длинноволновым («инфракрасным», ИК) возмущениям. Вклады в петлевые интегралы от соответствующих областей интегрирования оказываются достаточно большими, что существенно ограничивает предел применимости теории возмущений.

Ультрафиолетовая чувствительность петлевых интегралов в СТВ приводит к тому, что результаты вычислений начинают сильно зависеть от физики на малых масштабах, на которых приближение идеальной жидкости для темной материи неприменимо. Было предложено решение данной проблемы путем применения к КСВ идей эффективной теории поля [17]. В этом подходе УФ вклады петлевых интегралов должны быть перенормированы, а эффекты динамики на малых масштабах параметризованы различными эффективными операторами в уравнениях движения для темной материи. Данные операторы, называемые также «контрчленами», проблематично вывести из первых принципов, и поэтому они должны быть фиксированы из наблюдательных данных или при помощи численного моделирования. В свою очередь, результаты численного моделирования [18] свидетельствуют, что зависимость от мелкомасштабной динамики должна быть существенно слабее, чем предсказывается СТВ, что подтверждает качественные аргументы о разделении масштабов [14]. Последнее указывает на то, что аккуратное описание КСВ в рамках теории возмущений может быть возможным при достаточно общих предположениях о динамике на коротких масштабах.

С другой стороны, появление ИК расходимостей в СТВ является следствием использования начального распределения полей для вычисления их корреляторов на поздних временах. Это приводит к большим секулярным вкладам из-за смещения частиц ТМ за счет крупномасштабных потоков. Хорошо известно, что при вычислении корреляторов плотностей, взятых в один и тот же момент сопутствующего времени, ИК расходимости, возникающие в петлевых интегралах СТВ, сокращаются после полного суммирования всех вкладов данного порядка теории возмущений [19]. Иными словами, сильная

чувствительность отдельных петлевых интегралов СТВ к ИК модам нефизична. Эта чувствительность, однако, сильно затрудняет как численные вычисления, так и анализ физических эффектов, создаваемых крупномасштабными потоками. Последние оказывают сильное влияние на барионные акустические осцилляции [20], аккуратное описание которых требует пересуммирования инфракрасных эффектов [21].

Барионные акустические, или сахаровские осцилляции (СО) — это осцилляционная особенность в распределении материи на больших масштабах ( $\sim 150$  Мпк), которая используется для получения точной информации об истории расширения Вселенной. Глубокие обзоры неба ближайшего будущего измерят двухточечную корреляционную функцию материи на масштабах сахаровских осцилляций (СО) с точностью лучше одного процента, поэтому её теоретическое описание с учетом нелинейных эффектов является весьма актуальной задачей. Давно известно, что низшие нелинейные поправки СТВ не могут воспроизвести поведение СО, наблюдаемое в результатах численного моделирования [20]. Источником этого несогласия является приливной эффект крупномасштабных потоков, который, в отличие от ИК расходимостей, сокращающихся вследствие принципа эквивалентности [19], является физическим [21]. Можно показать, что соответствующий (инфракрасный) вклад в корреляционные функции оказывается существенно усиленным, иными словами, эффективный параметр разложения в вычислениях по стандартной теории возмущений становится большим, и, таким образом, нарушается само условие применимости теории возмущений.

Различные методы были предложены для учета нелинейного воздействия крупномасштабных потоков. В частности, хорошей моделью для СО является приближение Зельдовича [22] в лагранжевой теории возмущений [23]. Не очевидно, однако, как систематически учесть поправки за рамками данного приближения в рамках лагранжевого подхода [24]. Альтернативным подходом является рассмотрение задачи в переменных эйлеровой гидродинамики, выделение усиленных инфракрасных вкладов и их дальнейшее пересуммирование.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

Данная диссертационная работа имеет две основных цели: с одной стороны, — это изучение наблюдательных следствий космологических

моделей, мотивированных описанными выше подходами к квантовой гравитации; с другой — разработка адекватных методов учета нелинейного сгущения темной материи для описания формирования структур. Для достижения поставленных целей требуется решить следующие задачи:

1. Изучить феноменологические следствия квадратичной гравитации в космологии и сопоставить их с наблюдательными данными о Вселенной.

2. Изучить следствия нарушения лоренцевой симметрии в секторах гравитации, инфлатона и темной материи. Поставить ограничения на соответствующие параметры исходя из последних данных о микроволновом излучении и крупномасштабной структуры Вселенной.

3. Разработать новый аналитический подход для учета нелинейного сгущения материи, который позволит избежать недостатков стандартных методов.

### **Научная новизна и практическая значимость**

В диссертации исследована эволюция Вселенной в модели квадратичной гравитации. Изучен режим, в котором взаимодействие духовой степени свободы и частиц Стандартной модели подавлено, что имеет место если дух легче 10 МэВ. В этой ситуации духи производятся исключительно благодаря гравитационным эффектам на инфляционной стадии. Показано, что данная модель не может описывать наблюдаемую Вселенную. Это ставит ограничения на параметры теории и указывает на то, что пренебречь рождением духа невозможно. Таким образом, для построения реалистичных феноменологических моделей в рамках квадратичной гравитации с необходимостью требуется предварительно решить проблему нарушения унитарности.

Предложена модель инфляции с нарушенной ЛИ. В рамках этой модели удалось осуществить ультрафиолетовое пополнение *духовой инфляции* [25] — популярной эффективной теории для описания следствий нарушения ЛИ на инфляционной стадии. Таким образом, изучение этих следствий было поставлено на твердую теоретическую основу. Показано, что предсказания модели возможно протестировать с помощью наблюдательных данных уже в ближайшем будущем.

Исследованы ограничения на нарушение ЛИ в гравитации и ТМ, следующие из космологических наблюдений. Выявлены и исследованы интересные с наблюдательной точки зрения эффекты, которые затем были ограничены с использованием данных спутника «Планк» по реликтовому излучению и обзора крупномасштабной структуры Вселенной «ВигглЗ» (WiggleZ). Таким образом получены сильнейшие на данный момент космологические ограничения на параметры нарушения ЛИ в гравитации. Кроме того, впервые получены ограничения на нарушение ЛИ в ТМ.

Предложен новый подход для описания формирования крупномасштабной структуры Вселенной в слабо-нелинейном режиме. Данный подход основан на изучении зависящей от времени функции распределения космологических полей, позволяющей вычислить их корреляторы на фиксированных красных смещениях. В предложенном подходе, названном *теория возмущений на временных расщеплениях* (ТВВР), удалось естественным образом разделить временную эволюцию и статистическое усреднение, что позволило избежать нелокальности во времени, присутствующей в стандартных подходах.

Метод ТВВР применён для точного описания нелинейных эффектов длинноволновых возмущений, которые влияют на сахаровские осцилляции, присутствующие в распределении материи на больших расстояниях. В рамках ТВВР это осуществляется посредством систематического инфракрасного пересуммирования, имеющего простое диаграммное представление. Показано, что корреляционная функция материи, вычисленная в рамках данного метода, хорошо согласуется с данными численного моделирования на масштабах сахаровских осцилляций. Получена надежная оценка смещения пика этих осцилляций в координатном пространстве.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации доложены на конференциях: «Ломоносов–2012» (МГУ, 9-13 апреля 2012), «Прогресс в старых и новых вопросах космологии» (Авиньон, Франция, 14-18 апреля 2014), «Зельдович–100» (ИКИ РАН, Москва, 16-20 июня 2014), «КОСМО–2015» (Варшава, Польша, 7-11 сентября 2015), «Техасский симпозиум по релятивистской астрофизике» (Женева, Швейцария, 13-18 декабря 2015), «Морион Космология 2016» (Ла Тюиль, Ита-

лия, 19-26 марта 2016), «Современная космология и гравитационно-волновая астрономия» (Москва, ГАИШ, 16-18 ноября 2016), «Швейцарские космологические встречи» (Базель, Швейцария, 6-7 февраля 2017);

на международных семинарах: «Кварки-2012» (Ярославль, 4-10 июня 2012), «Кварки-2014» (Суздаль, 2-8 июня 2014), «Кварки-2016» (Пушкин, 29 мая-4 июня 2016);

на международных школах: «Зимняя школа ИТЭФ» (Отрадное, 14-21 февраля 2012), «4-я Бюраканская летняя школа» (Армения, 14-28 сентября 2012), «6-я школа по космологии в Пассо-Тонале» (Италия, 9-12 декабря 2012), «За рамками Эйнштейновской теории гравитации» (о. Парос, Греция, 23-28 сентября 2013);

на семинарах в ГАИШ МГУ (Москва, 25 сентября 2012, 15 марта 2016), ИЯИ РАН (Москва, 19 мая 2015, 17 марта 2016, 21 ноября 2016, 18 сентября 2017), университете Брюсселя (Бельгия, 5 сентября 2014), Женевском университете (Швейцария, 20 ноября 2015), ЦЕРНе (Женева, Швейцария, 10 февраля 2016), университете Гейдельберга (Германия, 25 октября 2016), университете Осло (Норвегия, 3 ноября 2016), университете Утрехта (Нидерланды, 19 января 2017).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 7 глав основного текста, заключения, библиографии и двух приложений. Общий объем диссертации 174 страницы, включая 20 рисунков. Библиография включает 161 наименование на 12 страницах.

### **Содержание работы**

Введение содержит обзор основных проблем, рассмотренных в диссертации.

**Первая глава** посвящена космологическим следствиям квадратичной гравитации. Рассматривается возможность описания инфляции и последующей эволюции Вселенной для параметров модели, при которых неунитарные процессы должны быть подавлены.

В разделе 1.2 показано, что на стадии инфляции производятся скалярные возмущения двух типов. Первый соответствует обычным адиабатическим возмущениям кривизны 3-х мерных гиперповерхностей постоянной плотности, а второй — возмущениям духа.

В разделе 1.3 получено, что после инфляции удельная плотность неадиабатических возмущений духа начинает возрастать и становится доминирующей над остальными компонентами плотности во Вселенной до наступления первичного нуклеосинтеза. Таким образом, предложенная модель не позволяет описать наблюдаемую Вселенную. Сделан вывод, что для построения реалистичной космологии на основе квадратичной гравитации необходимо предварительно решить проблему нарушения унитарности.

**Во второй главе** представлен обзор моделей гравитации с нарушенной ЛИ. Приведены уже имеющиеся ограничения на параметры отклонения от ЛИ в гравитации и поставлено новое ограничение, проистекающее из прямого детектирования гравитационных волн.

**Третья глава** посвящена модели инфляции в теории гравитации с нарушенной ЛИ.

В разделе 3.1 описана модель и получены уравнения фоновой динамики Вселенной. Качественно новой особенностью модели является возможность инфляционного расширения Вселенной за счет взаимодействия лоренц-нарушающих степеней свободы (эфира) и инфлатона. В этом случае инфляция может происходить даже при полном отсутствии потенциала инфлатона.

В разделе 3.2 проанализирована динамика малых возмущений над фоновой метрикой. Показано, что в длинноволновом пределе модель аналогична т.н. *духовой инфляции* — эффективной теории для описания следствий нарушения ЛИ на инфляционной стадии. Таким образом, предложенная модель осуществляет пополнение духовой инфляции до высоких энергий (вплоть до массы Планка).

В разделе 3.3 изучены негауссовы свойства первичных возмущений.

В разделе 3.4 проведено сравнение предсказаний модели в пределе отсутствия потенциала инфлатона с наблюдательными данными спутника «Планк».

**В четвертой главе** предложено эффективное описание нарушения ЛИ в секторе ТМ посредством взаимодействия эфира и ТМ.

В разделе 4.1 исследован нерелятивистский предел точечных частиц. Показано, что динамика существенно зависит от рассматриваемого масштаба. На коротких масштабах нарушение ЛИ в ТМ приводит к нарушению принципа эквивалентности, что в свою очередь

приводит к усилению гравитационного притяжения между частицами ТМ в пределах достаточно малых сгустков плотности (гало). На больших масштабах равенство между инертной и гравитационной массами ТМ восстанавливается, что приводит к полной экранировке нарушения ЛИ.

В разделе 4.2 развито релятивистское эффективное макроскопическое описание эффектов лоренц-нарушения (ЛН) в тёмной материи. Показано, что фоновая космологическая динамика не отличается от стандартного случая  $\Lambda$ CDM.

В разделе 4.3 проведен качественный анализ линейных космологических возмущений в рассматриваемой модели. Выделены основные эффекты, важные с точки зрения наблюдений: масштабно-зависимое усиление сгущивания ТМ и появления смещения между контрастами плотности ТМ и обычной материи. Качественно исследованы основные изменения в форме спектра мощности флуктуаций плотности.

**В пятой главе** проведено детальное численное исследование эффектов нарушения ЛИ в гравитации и тёмной материи с использованием бальцмановского кода CLASS [26].

В разделе 5.1 описаны и проиллюстрированы основные эффекты, влияющие на наблюдаемые.

В разделе 5.2 получены ограничения на параметры модели посредством статистического анализа методом Монте-Карло. Отклонения от лоренцевой симметрии в гравитации ограничены на уровне  $(0.1 \div 1)\%$  (в зависимости от модели), а в тёмной материи — на уровне 3%.

**В шестой главе** представлен новый метод для описания формирования структур в нелинейном режиме. Основная идея метода состоит в замене анализа эволюции космологических полей изучением их функции распределения.

В разделе 6.1 приведены основные уравнения динамики безстолкновительной идеальной жидкости, которая является исходным приближением для описания формирования структур на больших масштабах.

В разделе 6.2 представлен новый метод вычисления нелинейных корреляторов в рамках теории возмущений. Центральным объектом является зависящая от времени функция распределения космологических полей. Её зависимость от времени определяется уравнением Лиувилля статистической физики, которое, при использовании пер-

турбативного разложения функции распределения, принимает форму бесконечной цепочки уравнений на вершинные функции. Показано, что уравнения этой цепочки могут быть решены точно без необходимости её обрезания. Сформулированы правила диаграммного разложения производящего функционала и представлены подробности вычисления петлевых поправок к корреляционным функциям полей скорости и плотности. Развитый формализм весьма близок технически к трехмерной евклидовой теории поля, в которой время играет роль внешнего параметра, что обосновывает название «теория возмущений на временных расслоениях» (ТВВР). Все результаты этого раздела получены для динамических уравнений наиболее общего типа.

В разделе 6.3 предложенный формализм применен к двум частным случаям: космологической теории возмущений, основанной на зйлеровой гидродинамике и приближению Зельдовича.

В разделе 6.4 проанализирован предел мягких импульсов для вершинных функций ТВВР и явно доказано отсутствие инфракрасных расходимостей для всех элементов диаграммного разложения. Также приведено обсуждение этого свойства в контексте принципа эквивалентности: показано, что соответствующие тождества Уорда гарантируют отсутствие лидирующих инфракрасных расходимостей; этот аргумент справедлив и вне приближения идеальной жидкости.

**В седьмой главе** разработанный формализм применен для аккуратного и систематического описания нелинейной эволюции сахаровских осцилляций в распределении материи. Показано, что для этого необходимо пересуммирование инфракрасно-усиленных петлевых вкладов, которые легко идентифицируются в ТВВР благодаря простой структуре вершинных функций в пределе мягких импульсов.

В разделе 7.1 описано разделение пропагатора и вершинных функций ТВВР на монотонную и осциллирующие части. Это разделение необходимо, поскольку ИК усиление имеет место лишь для осциллирующих частей корреляционных функций, которые в свою очередь являются следствием сахаровских осцилляций в передаточных функциях.

В разделе 7.2 продемонстрировано существенное усиление осциллирующих вершинных функций ТВВР в пределе мягких импульсов, что указывает на необходимость пересуммирования соответствующих вкладов для самосогласованного применения теории возмущений. В данном разделе также приведены правила подсчета

степеней, которые позволяют получить порядок величины вклада любой диаграммы пертурбативного разложения.

В разделе 7.3 ИК — усиленные вклады в нелинейный спектр мощности и многоточечные корреляционные функции пересуммированы в лидирующем порядке по правилам подсчета степеней. Показано, что со ответствующие вклады соответствуют диаграммам типа ромашка, и приводят к экспоненциальному подавлению осциллирующих частей корреляционных функций.

В разделе 7.4 пересуммированы мягкие петлевые поправки к жестким петлевым вкладам. Сформулирован простой алгоритм для ИК пересуммирования корреляционных функций с произвольным количеством жестких петель.

В разделе 7.5 систематически пересуммированы инфракрасные поправки первого порядка малости. Показано, что их эффект весьма мал, но его необходимо учесть для точного описания смещения пика сахаровских осцилляций в корреляционной функции.

В разделе 7.6 показано, как реализовать процедуру инфракрасного пересуммирования алгоритмически для численного вычисления корреляционных функций материи. Предложенный метод сравнивается с другими известными в литературе методами, основное внимание уделено систематическому характеру пересуммирования и надежной оценке теоретических ошибок. Проведено сравнение предсказаний развитого метода с данными численного моделирования крупномасштабной структуры. Показано, что предложенный метод позволяет описать эти данные с точностью до 1%. В последней части раздела исследовано смещение пика сахаровских осцилляций в координатном пространстве, которое может достигать  $\sim 0.4\%$  при нулевом красном смещении.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы и обсуждаются перспективы дальнейшего исследования рассмотренных в диссертации вопросов.

## Заключение

Основные результаты, полученные в диссертации и выносимые на защиту:

1. Изучены производство и эволюция космологических возмущений в модели квадратичной гравитации, где взаимодействие духовой

степени свободы и частиц Стандартной модели подавлено, что имеет место если масса духа достаточно мала. Показано, что при таком рассмотрении с неизбежностью наступает фаза, при которой расширение Вселенной до минировано духом. Данная фаза несовместима с наблюдаемой картиной Вселенной, что указывает на необходимость решения проблемы неунитарности квадратичной гравитации для построения самосогласованных феноменологических моделей.

2. Поставлено ограничение сверху на скорость распространения гравитационных волн в теориях гравитации с нарушенной лоренцевой симметрией.

3. Предложена модель инфляции, основанная на теории гравитации с нарушенной лоренцевой симметрией. Ускоренное расширение Вселенной просходит за счет взаимодействия эфира и инфлатона. Благодаря этому взаимодействию инфлатон приобретает постоянное вакуумное значение скорости, которое может быть весьма большим в отличие от известного сценария с быстрым скатыванием. На уровне длинноволновых возмущений предложенная модель оказывается аналогична духовой инфляции. Таким образом, эта модель осуществляет ультрафиолетовое пополнение духовой инфляции и, в отличие от традиционного подхода в рамках эффективной теории инфляции, также описывает фоновую динамику инфлатона.

4. Изучена возможность того, что лоренцева симметрия нарушена в секторе тёмной материи и гравитации. Показано, что однородная эволюция Вселенной в предложенной модели не отличается от стандартного случая  $\Lambda$ CDM. Однако нетривиальная динамика проявляется на уровне космологических возмущений. Выделены четыре основных эффекта: (1) усиление гравитационного притяжения между неоднородностями плотности, (2) новый вклад в анизотропное натяжение, (3) ускоренный рост гравитационных потенциалов тёмной материи вследствие нарушения принципа эквивалентности и (4) появление масштабного-зависимого смещения между флуктуациями плотностей барионов и тёмной материи. Данные эффекты и их влияние на крупномасштабную структуру Вселенной и анизотропию реликтового излучения изучены как аналитически, так и численно.

5. Используя наблюдательные данные спутника «Планк» и глубокого обзора «ВигглЗ», получены ограничения на параметры нарушения ЛИ в гравитации и тёмной материи. Отклонения от ЛИ в секторе

тёмной материи ограничены на уровне 3%, в то время как ЛН в гравитации ограничено на уровне  $(0.1 \div 1)\%$  в зависимости от модели.

6. Предложен новый аналитический подход для описания формирования крупномасштабной структуры Вселенной в слабо-нелинейном режиме, названный теория возмущений на временных расслоениях (ТВВР). Главным элементом данного метода является зависящая от времени функция распределения вероятности полей плотности и скорости, которая производит космологические корреляторы на фиксированных красных смещениях. Пертурбативное разложение функции вероятности вокруг гауссова веса приводит к диаграммному разложению, аналогичному соответствующему разложению в трехмерной евклидовой квантовой теории поля, в котором время играет роль внешнего параметра. Показано явно, что все элементы разложения свободны от инфракрасных расходимостей. Продемонстрирована связь этого свойства с принципом эквивалентности, являющимся симметрией ТВВР.

7. В рамках ТВВР изучены инфракрасные эффекты, влияющих на нелинейную эволюцию сахаровских осцилляций в корреляционных функциях плотности материи. Разработана техника пересуммирования инфракрасно-усиленных диаграмм в главном и первом сублидирующем порядках малости. Показано, что теоретические предсказания для двух точечной корреляционной функции согласуются с данными численного моделирования с процентной точностью.

### Список публикаций

1. Ivanov M. M., Tokareva A. A. Cosmology with a light ghost // JCAP. 2016. Vol. 1612. P. 018. arXiv:1610.05330.
2. Blas D., Garny M., Ivanov M. M., Sibiryakov S. Time-Sliced Perturbation Theory II: Baryon Acoustic Oscillations and Infrared Resummation // JCAP. 2016. Vol. 1607. P. 028. arXiv:1605.02149.
3. Blas D., Garny M., Ivanov M. M., Sibiryakov S. Time-Sliced Perturbation Theory for Large Scale Structure I: General Formalism // JCAP. 2016. Vol. 1607. P. 052. arXiv:1512.05807.
4. Blas D., Ivanov M. M., Sibiryakov S., Sawicky I. On constraining the speed of gravitational waves following GW150914 // JETP Lett. 2016. Vol. 103. P. 624. arXiv:1602.04188.
5. Audren B., Blas D., Ivanov M. M., Lesgourgues J., Sibiryakov S. Cosmological constraints on deviations from Lorentz invariance in

- gravity and dark matter // JCAP. 2015. Vol. 1503. P. 016. arXiv:1410.6514.
6. Ivanov M. M. and Sibiryakov S. UV-extending Ghost Inflation // JCAP. 2014. Vol. 1405. P. 045 arXiv:1402.4964.
  7. Blas D., Ivanov M. M., Sibiryakov S. Testing Lorentz invariance of Dark Matter // JCAP. 2012. Vol. 1210. P. 057. arXiv:1209.0464.
  8. Ivanov M. M. Systematic treatment of non-linear effects in Baryon Acoustic Oscillations // EPJ Web Conf. 2016. Vol. 125. P. 03006. arXiv:1607.05329.

### **Цитированная литература**

1. Stelle K. S. Renormalization of Higher Derivative Quantum Gravity // Phys. Rev. 1977. Vol. D16. P. 953–969.
2. Avramidi I. G., Barvinsky A. O. Asymptotic freedom in higher derivative quantum gravity // Phys. Lett. 1985. Vol. B159. P. 269–274.
3. Salvio Alberto, Strumia Alessandro. Agravity // JHEP. 2014. Vol. 06. P. 080. arXiv:hep-ph/1403.4226.
4. Horava Petr. Quantum Gravity at a Lifshitz Point // Phys. Rev. 2009. Vol. D79. P. 084008. arXiv:hep-th/0901.3775.
5. Lifshitz E. M. // Zh. Eksp. Teor. Phys. 1941. Vol. 11. P. 255.
6. Barvinsky Andrei O., Blas Diego, Herrero-Valea Mario et al. Renormalization of Hořava gravity // Phys. Rev. 2016. Vol. D93, no. 6. P. 064022. arXiv:hep-th/1512.02250.
7. Barvinsky Andrei O., Blas Diego, Herrero-Valea Mario et al. Renormalization of gauge theories in the background-field approach. 2017. arXiv:hep-th/1705.03480.
8. Blas D., Pujolas O., Sibiryakov S. On the Extra Mode and Inconsistency of Horava Gravity // JHEP. 2009. Vol. 10. P. 029. arXiv:hep-th/0906.3046.
9. Blas D., Pujolas O., Sibiryakov S. Consistent Extension of Horava Gravity // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 104. P. 181302. arXiv:hep-th/0909.3525.
10. Jacobson Ted, Mattingly David. Gravity with a dynamical preferred frame // Phys. Rev. 2001. Vol. D64. P. 024028. arXiv:gr-qc/gr-qc/0007031.
11. Mattingly David. Modern tests of Lorentz invariance // Living Rev. Rel. 2005. Vol. 8. P. 5. arXiv:gr-qc/gr-qc/0502097.
12. Groot Nibbelink Stefan, Pospelov Maxim. Lorentz violation in supersymmetric field theories // Phys.Rev.Lett. 2005. Vol. 94. P. 081601. arXiv:hep-ph/hep-ph/0404271.
13. Pujolas Oriol, Sibiryakov Sergey. Supersymmetric Aether // JHEP. 2012. Vol. 1201. P. 062. arXiv:hep-th/1109.4495.
14. Peebles Phillip James Edwin. The Large-scale Structure of the Universe // Princeton University Press. 1980.

15. Gurevich, Aleksandr V. and Zybin, Kirill P. Large-scale structure of the Universe. Analytic theory. // *Physics-Uspekhi*. 1995. Vol. 38, no. 7. P. 687. URL: <http://stacks.iop.org/1063-7869/38/i=7/a=A02>.
16. Bernardeau F., Colombi S., Gaztanaga E., Scoccimarro R. Large scale structure of the universe and cosmological perturbation theory // *Phys. Rept.* 2002. Vol. 367. P. 1–248. arXiv:astro-ph/astro-ph/0112551.
17. Carrasco John Joseph M., Hertzberg Mark P., Senatore Leonardo. The Effective Field Theory of Cosmological Large Scale Structures // *JHEP*. 2012. Vol. 09. P. 082. arXiv:astro-ph.CO/1206.2926.
18. Nishimichi Takahiro, Bernardeau Francis, Taruya Atsushi. Response function of the large-scale structure of the universe to the small scale inhomogeneities // *Phys. Lett.* 2016. Vol. B762. P. 247–252. arXiv:astro-ph.CO/1411.2970.
19. Blas Diego, Garny Mathias, Konstandin Thomas. On the non-linear scale of cosmological perturbation theory // *JCAP*. 2013. Vol. 1309. P. 024. arXiv:astro-ph.CO/1304.1546.
20. Eisenstein Daniel J., Seo Hee-jong, White Martin J. On the Robustness of the Acoustic Scale in the Low-Redshift Clustering of Matter // *Astro phys. J.* 2007. Vol. 664. P. 660–674. arXiv:astro-ph/astro-ph/0604361.
21. Baldauf Tobias, Mirbabayi Mehrdad, Simonovic Marko, Zaldarriaga Matias. Equivalence Principle and the Baryon Acoustic Peak // *Phys. Rev.* 2015. Vol. D92, no. 4. P. 043514. arXiv:astro-ph.CO/1504.04366.
22. Zeldovich Ya. B. Gravitational instability: An Approximate theory for large density perturbations // *Astron. Astrophys.* 1970. Vol. 5. P. 84–89.
23. Matsubara Takahiko. Resumming Cosmological Perturbations via the Lagrangian Picture: One-loop Results in Real Space and in Red shift Space // *Phys. Rev.* 2008. Vol. D77. P. 063530. arXiv:astro-ph/0711.2521.
24. Vlah Zvonimir, Seljak Uros, Baldauf Tobias. Lagrangian perturbation theory at one loop order: successes, failures, and improvements // *Phys. Rev.* 2015. Vol. D91. P. 023508. arXiv:astro-ph.CO/1410.1617.
25. Arkani-Hamed Nima, Creminelli Paolo, Mukohyama Shinji, Zaldarriaga Matias. Ghost inflation // *JCAP*. 2004. Vol. 0404. P. 001. arXiv:hep-th/hep-th/0312100.
26. Blas Diego, Lesgourgues Julien, Tram Thomas. The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS) II: Approximation schemes // *JCAP*. 2011. Vol. 1107. P. 034. arXiv:astro-ph.CO/1104.2933.

Научное издание

Иванов  
Михаил Михайлович

Первичные неоднородности  
в неминимальных космологических моделях  
и слабо-нелинейный режим формирования структур

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,05 Зак. № 22419 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