

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Рамазанов Сабир Рамазанович

**Начальные этапы развития Вселенной:
статистические свойства первичных
возмущений**

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук,
академик
В. А. Рубаков

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук и Институте Нильса Бора в Копенгагене.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, профессор, академик

В.А. Рубаков

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор

О.В. Верховданов (САО)

кандидат физ.-мат. наук

Р.А. Буренин (ИКИ)

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт имени Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита состоится 20 июня 2014 г. в 16:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН.

Автореферат разослан

2014 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Теория Большого Взрыва, хотя и находится в прекрасном согласии с современными экспериментами, является очевидным образом неполной. Так, она существенно опирается на ряд важных предположений о начальных данных, которые весьма трудно назвать естественными. В первую очередь, это затрагивает такие очевидные свойства, как однородность и изотропия Вселенной. В стандартной космологической картине делается неявное предположение о том, что Вселенная, видимая сейчас, произошла от слияния кусков, которые, казалось бы, не были в причинном контакте друг с другом на далеких временах. Однако, как хорошо известно, температура микроволнового фона изотропна с хорошей точностью. В данном противоречии состоит суть проблемы горизонта.

Также теория горячего Большого Взрыва приводит к выводу о крайне малой пространственной плоскостности на ранних этапах. Вклад кривизны в уравнение Фридмана падает с масштабным фактором как $\Omega_k \sim 1/a^2$. С другой стороны, величина Ω_k сильно ограничена экспериментальными данными. Например, из данных WMAP седьмого года следует, что

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

на уровне достоверности 95%. Ввиду того, что относительный вклад кривизны рос на радиационно- и материально-доминированной стадиях, мы необходимо заключаем, что Вселенная должна была быть исключительно плоской в планковскую эпоху, $\Omega_k \lesssim 10^{-60}$. Столь малое число приходится закладывать в теорию горячего Большого Взрыва руками, что составляет сущность проблемы плоскостности.

Аналогично, в рамках горячего Большого Взрыва отсутствует естественное объяснение современного значения энтропии. Действительно, на большей части эволюции Вселенная находилась, грубо говоря, в состоянии термодинамического равновесия, а потому ее энтропия не менялась существенным обра-

зом. Так, современное значение энтропии видимой части Вселенной оценивается величиной $S_0 \sim 10^{88}$. В теории Большого Взрыва столь огромное число опять же приходится закладывать “руками” в качестве начального условия.

Существование первичных неоднородностей плотности в ранней Вселенной также является неразрешимой проблемой в рамках стандартной космологической модели. Ситуация несколько “усугубляется” тем, что свойства начальных возмущений далеко не самоочевидны. Например, с хорошей точностью их можно охарактеризовать единственной случайной величиной $\zeta(\mathbf{x})$, постоянной в режиме за горизонтом. Возможность такого описания подразумевает, что мы имеем дело с *адиабатическими* возмущениями. Отклонение от этого свойства означало бы присутствие небольшой примеси энтропийных возмущений. Такая возможность, однако, сильно ограничена современными экспериментальными данными.

Согласно данным экспериментов WMAP и Planck, возмущение $\zeta(\mathbf{x})$ *гауссова* случайная величина. На языке теории поля, это означает, что выполнена теорема Вика. Другими словами, статистические свойства величины ζ определяются ее двухточечной функцией, допускающей представление в виде

$$\langle \zeta(\mathbf{x})\zeta(\mathbf{y}) \rangle = \frac{1}{(2\pi)^3} \int d\mathbf{k} P(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}(\mathbf{x}-\mathbf{y})} .$$

Функция $P(\mathbf{k})$, стоящая в правой части, есть спектр мощности первичных скалярных возмущений. Обычно предполагается, что она не зависит от направления вектора \mathbf{k} , или, другими словами, статистически изотропна. Насколько такое допущение согласуется с экспериментальными данными, подробно обсуждается в Главе 4 диссертации. Одним из ключевых свойств первичных возмущений является плоскостность их спектра мощности $\mathcal{P}_\zeta(k) \equiv \frac{2\pi^2}{k^3} P(k)$, или, иначе говоря, независимость последнего от величины импульса k . Важно подчеркнуть приблизительный характер этого свойства. Более того, согласно последним данным Planck (WMAP седьмого года), в точности плоский спектр мощности исключен на уровнях достоверности более 5σ (2σ).

Отмеченные проблемы явно указывают на то, что горячий Большой Взрыв вряд ли являлся отправной точкой в эволюции Вселенной, и радиационно-доминированной стадии предшествовала какая-то другая стадия. Самым успешным кандидатом на роль теории ранней Вселенной является инфляция (Старобинский'1979, Гут'1981, Линде'1982, Альбрехт и Стейнхардт'1982, Линде'1983). Основная идея инфляции состоит в том, что горячему Большому Взрыву предшествовал период очень быстрого расширения Вселенной. За короткий промежуток времени Вселенная раздулась из области планковских размеров до масштабов, намного превышающих видимую сегодня область Вселенной. Таким образом, проблема горизонта уверенно разрешается. Также инфляция крайне эффективно справляется с проблемой маленькой пространственной плоскостности. В ускоренно расширяющейся Вселенной вклад пространственной кривизны быстро падает со временем и представляет крайне малую величину к началу горячей эпохи.

Наиболее просто инфляция реализована в моделях с одним скалярным полем ϕ , медленно скатывающимся вдоль склона своего потенциала $V(\phi)$. При определенных условиях на потенциал, называемых условиями медленного скатывания, Вселенная, доминируемая *инфлатоном* ϕ , быстро выходит на режим ускоренного расширения, характеризующегося почти постоянным параметром Хаббла. Возмущения инфлатона, эволюционирующие на фоне пространства-времени де Ситтера, служат источником первичных скалярных возмущений (Муханов и Чибисов'1981). Вкратце механизм состоит в следующем. На очень ранних временах, соответствующих $k/a \gg H$, вакуумные возмущения инфлатона находятся под горизонтом. Гравитационные эффекты пренебрежимо малы в этом режиме, и возмущения инфлатона осциллируют в эффективно плоском пространстве-времени. С течением времени, масштабный фактор быстро растет, а физические импульсы, соответственно, падают. В какой-то момент времени, определяемый из условия $k/a \sim H$, возмущения инфлатона выходят за горизонт. Их осцилляции прекращаются, а амплитуда

замораживается на значении $\delta\phi \sim \frac{H}{2\pi}$; при этом характерные длины волн экспоненциально растут за горизонтом. В этом по сути и состоит механизм усиления вакуумных флуктуации скалярного поля во Вселенной де Ситтера. За горизонтом возмущения инфлатона эффективно ведут как классическое поле, которое несколько смещает фоновое значение инфлатонного поля $\phi(t)$. В итоге, поле инфлатона становится слегка неоднородным, что ведет к некоторому сдвигу во времени окончания инфляции в разных областях Вселенной. Те из них, которые вышли из инфляции несколько раньше, имели больше времени для эволюции на горячей стадии, и, соответственно, для остывания. Отсюда, и плотность энергии оказалась в них несколько ниже. Так образовались первичные возмущения плотности энергии. Эти возмущения плотности адиабатические, характеризуются почти плоским спектром и подчиняются гауссовой статистике с хорошей точностью.

Как мы уже сказали, инфляция, по крайней мере в ее простейших версиях, находится в прекрасном согласии с имеющимися на данный момент наблюдательными данными. Тем не менее, законен вопрос об альтернативных теориях. Логической (но отнюдь не единственной!) альтернативой является картина сжимающейся Вселенной. Отметим, что интерес к такого рода моделям в научной литературе заметно ниже, чем к инфляции. Объяснить эту тенденцию можно рядом характерных проблем, присущих картине сжимающейся Вселенной. Во-первых, переход со стадии сжатия на привычную стадию расширения представляет собой определенные трудности с точки зрения квантовой теории поля. Дело в том, что параметр Хаббла отрицателен на стадии сжатия и положителен на стадии расширения. Отсюда следует, что производная параметра Хаббла должна быть положительной на временах, соответствующих отскоку. Из уравнения

$$\dot{H} = -4\pi G(\rho + p)$$

тогда вытекает, что вещество, дающее наибольший вклад в эволюцию Все-

ленной, определяется уравнением состояния $p < -\rho$. Выполнение последнего в рамках квантовой теории поля в большинстве случаев приводит к проблеме нестабильности вакуума. Известны, однако, примеры моделей, в которых данную проблему удастся избежать. В первую очередь речь идет о модели “духового конденсата” (Н. Аркани-Хамед и др.’2003) и сравнительно недавно разработанных теориях с галилеонами (А. Николис и др.’2008). Таким образом, переход со стадии сжатия на стадию расширения, представляет хоть и трудную, но отнюдь не неразрешимую задачу с точки зрения квантовой теории поля. В частности, в литературе представлен ряд моделей, в которых удастся “сшить” фазу сжатия с фазой расширения без привлечения патологий.

Второй проблемой в картине сжимающейся Вселенной является рост хаотических флуктуаций метрики с уменьшением масштабного фактора. Это—результат работы Белинского–Халатникова–Лифшица (Белински и др.’1970). Можно показать, что соответствующий вклад в уравнение Фридмана описывается плотностью энергии ρ , изменяющейся как $\rho \sim 1/a^6$ с масштабным фактором a . Ясно, что в сжимающейся Вселенной такой источник начинает доминировать в космологической эволюции, если типы вещества материи подчиняются стандартным уравнениям состояния. В такой ситуации свойства однородности и изотропии Вселенной должны быть сильно нарушены к началу горячего Большого Взрыва. Тем не менее, проблему удастся избежать введением вещества со сверхжестким уравнением состояния, то есть $p \gg \rho$. Подобное уравнение состояния естественным образом возникает в моделях с экпирозисом (Дж. Кхури и др.’2001; см. также обзор Ж.-Л. Лехнерс’2008). Последние появились в рамках многомерных теорий с двумя бранами. Предполагается, что вещество живет на одной из этих бран, тогда как гравитация может свободно распространяться в многомерном пространстве. Сближение бран в такой картине ассоциируется с фазой сжатия Вселенной. Столкновение, глубоко неупругий процесс, приводит к разогреву, а последующее уда-

ление бран друг от друга соответствует расширению Вселенной.

Замечательно, что модели с экпирозисом допускают эффективное четырехмерное описание вдали от точки столкновения бран. Главный вклад в эволюцию Вселенной в этой картине дает радион, который характеризуется самодействием в виде отрицательного экспоненциального потенциала. Такой выбор потенциала приводит к сверхжесткому уравнению состояния у поля радиона, и проблемы роста нестабильностей удается избежать. Конкретно, уравнения состояния имеет вид $p = w\rho$, где $w = \text{const} \gg 1$. Соответствующая ему эволюция плотности энергии с масштабным фактором описывается уравнением $\rho \propto 1/a^{3(1+w)}$. Ясно, что в сжимающейся Вселенной поле радиона в какой-то момент начинает доминировать над вкладом анизотропии и кривизны в уравнение Фридмана. Последнее, в частности, означает, что проблема плоскостности также находит свое разрешение в моделях экпирозиса, по крайней мере если фаза сжатия продолжается в течение достаточно большого времени.

Генерация скалярных возмущений в рамках моделей с экпирозисом возможна, но происходит несколько сложнее, чем в инфляции. Во-первых, одного скалярного поля оказывается явно недостаточно, чтобы объяснить имеющиеся экспериментальные данные. Формально возмущения радионного поля в режиме за горизонтом характеризуются плоским спектром. Сами по себе, однако, они не имеют непосредственного физического смысла, так как не являются калибровочно-инвариантными. В терминах инвариантной величины ζ , включающей возмущения метрики, результат кардинальным образом меняется: предсказываемый спектр первичных возмущений является сильно синим с $n_s - 1 \approx 2$. Выход из ситуации состоит в добавлении второго скалярного поля, дающего пренебрежимо малый вклад в эволюцию Вселенной. В этом случае, возмущения в системе можно разделить на адиабатическую моду и моду постоянной кривизны, или энтропийную моду. В эволюции последней возмущения метрики не играют существенной роли, и, как было показано

в ряде работ (Ж.-Л. Лехнерс и др.'2007, Толли и Уэсли'2007), они приобретают плоский спектр. Однако, здесь есть одна тонкость. Дело в том, что вывод о плоском спектре существенно зависит от выбора траектории в пространстве адиабатических и энтропийных возмущений. В частности, траектория, которая приводит к правильному виду первичного спектра, опирается на нестабильность, что подразумевает значительную подстройку начальных условий для фазы экпирозиса (Кояма и Вондс'2007). Данная подстройка, однако, может происходить автоматически в так называемых моделях циклической Вселенной, в которых фазе сжатия предшествует стадия ускоренного расширения, аналогичное тому, которое мы наблюдаем сейчас (Ж.-Л. Лехнерс и П. Стейнхардт'2008).

Альтернативный способ генерации скалярных возмущений с плоским спектром был предложен в рамках модели конформного скатывания (Рубаков'2009). Строго говоря, последняя не имеет непосредственного отношения к моделям с экпирозисом. Более того, она не опирается существенно на особенности эволюции Вселенной на временах, предшествовавших горячей эпохе. Главным ингредиентом модели является безмассовое комплексное поле ϕ , конформно связанное с гравитацией. Поле ϕ скатывается вдоль склона отрицательного четверичного потенциала,

$$V(\phi) = -h^2|\phi|^4 .$$

Благодаря конформной связи с гравитацией, в модели существует инвариантность относительно преобразований метрики, дополненных преобразованием скалярного поля $\phi \rightarrow \chi = a\phi$. В итоге динамика поля χ дается эволюцией на фоне пространстве-времени Минковского, независимо от фоновой метрики Вселенной в это время. Однородные решения для поля χ быстро стремятся к динамическому аттрактору

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

который может быть выбран вещественным без ограничения общности. Это—следствие инвариантности модели относительно глобальных преобразований группы $U(1)$. На фоне этого решения возмущения фазы ведут себя так же, как возмущения инфлатона на фоне метрики де Ситтера. Это гарантирует, что в режиме “за горизонтом” они характеризуются плоским спектром. При достаточно больших значениях поля χ конформная инвариантность явно нарушается. Начиная с этого момента, фаза поля χ ведет себя как самостоятельное поле и его дальнейшая судьба определяется космологической эволюцией Вселенной на этих временах. Так, если космологически интересные моды находятся за горизонтом на момент окончания конформного скатывания, тогда фаза θ остается постоянной (“замораживается”) вплоть до начала горячего Большого Взрыва, когда ее энтропийные возмущения превращаются в адиабатические возмущения радиации. В противном случае, фаза продолжает эволюционировать на так называемой промежуточной стадии, которая длится от момента окончания конформного скатывания и вплоть до начала горячей эпохи. Этот случай будет наиболее интересен для нас в этой диссертации.

Цель работы: состоит в изучении новых механизмов генерации первичных скалярных возмущений, исследовании их нетривиальных свойств и поиске соответствующих сигналов в спектре температурных флуктуаций космического микроволнового фона.

Научная новизна и практическая ценность: в данной диссертации в деталях исследован качественно новый механизм генерации первичных скалярных возмущений с плоским спектром. В частности, разработана модель конформного скатывания с промежуточной стадией. Полученные результаты легко обобщаются на более широкий класс моделей псевдо-конформной Вселенной.

В диссертационной работе подробно исследованы феноменологические

следствия модели конформного скатывания с промежуточной стадией. Ключевым предсказанием в этом смысле является статистическая анизотропия. Последняя представлена всеми четными мультиполями в разложении по сферическим гармоникам, что является качественно новым предсказанием по сравнению с моделями инфляции и моделью конформного скатывания без промежуточной стадии. Другие следствия модели—негауссовость в 4-точечной функции и небольшой отрицательный наклон спектра первичных возмущений. Строго говоря, 3-точечная функция равна нулю в модели конформного скатывания (в обеих версиях). Однако, незначительное расширение модели (в частности, отказ от $U(1)$ инвариантности) может привести к ненулевому биспектру. В диссертации мы показали, что получающаяся 3-точечная функция характеризуется нетривиальным поведением в гармоническом l -пространстве, качественно новым по сравнению с аналогичными предсказаниями инфляционных моделей. Также отмечено, что наиболее отличительные особенности 3-точечной функции обязаны своим происхождением наличию промежуточной стадии, нежели особенностями эволюции в конформную эпоху. Данное наблюдение опять же предполагает обобщение на более широкий класс моделей, в которых космологические возмущения распространяются как свободное скалярное поле до начала горячей эпохи.

Был проведен анализ данных WMAP 7 и 9 годов на вопрос наличия в них сигнала статистической анизотропии. Полученные результаты достаточно имеют широкую область применений: помимо модели конформного скатывания с промежуточной стадией, были рассмотрены другие космологические сценарии, приводящие к зависимости от направления в спектре первичных скалярных возмущений. В частности, для случая данных 9-го года было получено ограничение на полное число e -фолдингов в инфляционных моделях, предсказывающих статистическую анизотропию. Проведенный анализ легко обобщается на случай данных Planck, что представляет собой большую ценность в смысле будущих поисков статистической анизотропии.

Исследован ряд аномалий, наблюдающихся в спектре низших мультиполей космического микроволнового фона. Предложена модель, которая позволяет объяснить сильную сонаправленность квадруполь и октуполь, а также асимметрию в спектре мощности четных и нечетных мультиполей. Так, рассмотрено влияние излучение пояса Койпера на низшие мультиполи. Показано, что существует область модельных параметров, для которых сильная сонаправленность пропадает, а также исчезает асимметрия четности.

Апробация диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, были доложены на научных семинарах ИЯИ РАН, ГАИШ МГУ, Института Нильса Бора (Копенгаген), Свободного Университета Брюсселя, Университета Людвиг-Максимилиана в Мюнхене, Университета Монса, международном семинаре “Кварки-2012” (Ярославль), международной конференции New Frontiers in Physics (Крит, 2012). По результатам диссертации опубликовано пять работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав основного текста и Заключения, содержит 142 страницы машинописного текста, в том числе 22 рисунка и список литературы из 123 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обсуждаются основные проблемы теории горячего Большого Взрыва: проблема плоскостности Вселенной на очень ранних временах, проблемы горизонта, энтропии и первичных скалярных возмущений. Показывается, что предположении об инфляционной стадии на временах, предшествовавших горячей стадии, приводит к элегантному разрешению указанных трудностей. Кратко обсуждаются альтернативные модели, а именно модели с экпирозисом. Последние очень эффективны в смысле разрешения проблем плоскостности и горизонта, но генерация первичных скалярных возмущений в них вызывает некоторые трудности. Вводится понятие о гипотетической фазе конформного скатывания, которая могла иметь место на очень ранних временах. Данная гипотеза позволяет избежать проблему генерации первичных скалярных возмущений, независимо от космологической эволюции на этой стадии.

В Главе 2 подробно разбирается эволюция полей на стадии конформного скатывания (Раздел 2.1) и в последующую промежуточную эпоху (2.2). В качестве поля, ответственного за генерацию первичных скалярных возмущений с плоским спектром, выступает фаза θ безмассового комплексного поля ϕ . Поле ϕ характеризуется самодействием в виде отрицательного потенциала четвертой степени и конформной связью с гравитацией. Соответствующие классические уравнения движения допускают нетривиальное однородное решение для радиальной части поля ϕ , а именно $|\phi| \sim a^{-1}(\eta_* - \eta)^{-1}$. Здесь η конформное время, тогда как η_* имеет смысл времени окончания скатывания. Главный вывод, следующий из раздела 2.1, состоит в том, что возмущения фазы, эволюционирующие на фоне нетривиального радиального решения, приобретают плоский спектр по окончании конформного скатывания. В подразделах 2.1.1 и 2.1.2 подробно исследовано влияние возмущений радиального поля и приведены соответствующие формулы для возмущений фазы по

окончании конформного скатывания. В частности, показано, что возмущения радиального поля эффективно могут быть “поглощены” во время окончания скатывания η_* , так что последнее становится слегка неоднородным. При этом поправки к возмущениям фазы могут быть выражены в терминах производных величины $\eta_*(\mathbf{x})$, а именно $v_i \equiv -\partial_i \eta_*$, $\partial_i \partial_j \eta_*$ и т.д.

Прежде чем переходить к дальнейшему обзору диссертации, отметим, что существуют две разные версии модели конформного скатывания. В одной из них возмущения фазы, интересные с космологической точки зрения, находятся за горизонтом на момент окончания конформного скатывания. В этом случае фаза остается замороженной вплоть до начала горячего Большого Взрыва, где ее возмущения превращаются в обычные возмущения горячей компоненты среды. В настоящей диссертации нас в первую очередь интересовала другая возможность, а именно космологических возмущений, которые все еще находятся под горизонтом на момент окончания скатывания. В этом случае они продолжают эволюционировать на так называемой промежуточной стадии. Важно, что пространственно-временная метрика на данной стадии должна быть близка к метрике Минковского—иначе, сильно нарушится свойство плоскостности первичных скалярных возмущений, сгенерированных к концу конформной стадии. Возмущения фазы к концу промежуточной стадии вычислены в приближении длительной промежуточной стадии, намного превышающей характерные космологические масштабы. Соответствующие аналитические вычисления проведены методом седловой точки. Опуская дальнейшие технические детали, отметим лишь, что конкретная мода фазового поля представима в виде суммы двух волн, распространяющихся вблизи направлений $\hat{\mathbf{k}}$ и $-\hat{\mathbf{k}}$. Теоретические аспекты модели с промежуточной стадией обсуждаются в деталях в разделе 2.1.

Результаты Главы 2 служат отправной точкой для обсуждения нетривиальной феноменологии версии конформного скатывания в **Главе 3**. Пожалуй, наиболее необычным предсказанием модели является статистическая

анизотропия, или зависимость от направления спектра первичных скалярных возмущений (Раздел 3.1). Данное свойство является непосредственным следствием взаимодействия фазы с радиальным полем в конформную эпоху. Показано, что разложение спектра мощности по сферическим гармоникам включает в себя все четные мультиполи, начиная с квадрупольного общего вида. Это предсказание модели является критическим в смысле отличия от предсказаний других моделей. Например, статистическая анизотропия в версии конформного скатывания без промежуточной стадии содержит только квадрупольную зависимость от направления (подраздел 3.1.1). Большинство моделей инфляции приводит к статистически изотропному спектру первичных возмущений. Существуют, однако, классы моделей, в которых удается добиться анизотропной космологической эволюции. Возмущения инфлатона, эволюционирующие на фоне анизотропной метрики, приобретают зависящий от направления спектр возмущений. Краткий обзор такого рода моделей с векторными полями приведен в подразделе 3.1.2.

Другим нетривиальным предсказанием модели с промежуточной стадией является негауссовость в 4-точечной функции. Негауссовость проявлена в режиме, когда импульсы, характеризующие фазовые возмущения, коллинеарны. В этом случае имеется (небольшое) логарифмическое усиление. Негауссовость на уровне триспектра подробно обсуждается в Разделе 3.2.

Взаимодействие фазы с радиальным полем в конформную эпоху также приводит к небольшому наклону спектра первичных скалярных возмущений (см. Раздел 3.3). Интересно, что наклон, получающийся в этом случае, отрицательный, в согласии с имеющимися экспериментальными данными. Однако, величина наклона опирается на малую константу конформного скатывания h^2 , а потому является ненаблюдаемой. Такая ситуация, однако, отнюдь не является безнадежной. Действительно, как было показано в работе Рубакова и Осипова'2010, небольшой наклон можно сгенерировать, если предположить малое нарушение конформной инвариантности. Альтернативно можно

допустить, что фазовое поле характеризуется нетривиальным самодействием (Хинтербихлер и Кхури'2011).

Последняя возможность представляет интерес также в следующем смысле. В рамках модели с промежуточной стадией предсказываемая трехточечная функция первичных скалярных возмущений равна нулю. Данное утверждение верно, однако, только в случае, если сохранена $U(1)$ инвариантность. В обратном случае, естественным образом генерируется ненулевой биспектр. В диссертации было показано, что получающийся биспектр разительным образом отличается от аналогичных предсказаний инфляции. В частности, он испытывает характерные осцилляции в гармоническом l пространстве космического микроволнового фона с амплитудой и частотой, близкими к постоянным. Указанные особенности оставляют надежду на то, что имеющиеся ограничения на негауссовость, полученные из данных Planck, неприменимы к нашему биспектру. С другой стороны, биспектр сильно убывает с длиной промежуточной стадии. Поэтому остается сравнительно узкая область модельных параметров, в которой биспектр может иметь наблюдаемую величину. Наконец, стоит отметить, что форма биспектра в гармоническом пространстве существенно независима от конкретного вида модели ранней Вселенной. Важно—предположение о наличии промежуточной стадии, в течение которой космологические возмущения распространяются как свободное скалярное поле. Свойства 3-точечной функции подробно обсуждаются в разделе 3.4.

Глава 4 посвящена поиску статистической анизотропии в спектре космического микроволнового фона. В частности, исследованы данные эксперимента WMAP седьмого и девятого годов. При анализе данных мы не ограничивались предсказаниями модели конформного скатывания с промежуточной стадией, но также рассмотрели анизотропные модели инфляции, а также модель конформного скатывания без промежуточной стадии. За основу были взяты эstimаторы, предложенные Хансоном и Льюисом в 2009 году. Основная идея состоит в минимизации функции правдоподобия температур-

ных флуктуаций микроволнового фона по параметрам статистической анизотропии. Естественным предположением при этом является малость данных параметров. Получающиеся при этом эstimаторы отвечают всем желаемым критериям: они несмещенные и характеризуются минимальной дисперсией. Основываясь на данных эstimаторах, мы построили эstimаторы для параметров моделей, предсказывающих статистическую анизотропию (разделы 4.2.2 и 4.2.3).

В разделе 4.3 мы применили построенные эstimаторы к данным WMAP. Получившиеся результаты существенно различаются для карт седьмого и девятого годов. В случае данных седьмого года было обнаружено указание на сильное нарушение статистической изотропии на уровне квадруполья. Подчеркнем, что аналогичный результат был получен другими учеными при анализе карт пятого года. Отметим также, что обнаруженный сигнал носит скорее систематический характер, нежели является указанием на нетривиальную космологию на ранних временах. Действительно, направление квадруполья сильно сонаправлено с полюсами эклиптики. Кроме того, хорошо просматривается частотная зависимость сигнала: ярко выраженный в W частотной полосе, он значительно слабее в V полосе. Наконец, не было найдено указаний на нарушение статистической анизотропии в альтернативных экспериментах, а именно в данных по распределению галактик. Как было показано в работе Хансона и др. 2010, аномальный сигнал может быть объяснен асимметрией функции сглаживания луча. Действительно, при учете последнего аномальный сигнал исчезает.

К настоящему времени асимметрия функции сглаживания учитывается в экспериментальных данных, в частности, в данных WMAP 9. Это замечательное обстоятельство позволило нам существенно улучшить ограничения, полученные ранее на основе данных WMAP 7. Пожалуй, наиболее интересные ограничения получились для модели конформного скатывания с промежуточной стадией и анизотропных моделей инфляции. Для первой

было поставлено ограничение на параметр h^2 : $h^2 < 0.045$ (WMAP 7) и $h^2 < 0.006$ (WMAP 9), на уровне достоверности 95%. Для случая анизотропной инфляции мы поставили ограничение на полное число e -фолдингов, $N_{tot} < N_{CMB} + 82$ и $N_{tot} < N_{CMB} + 14$ на уровнях достоверности 95% и 68%, соответственно. При этом мы ограничились использованием данных WMAP девятого года. Аналогичные ограничения оказываются существенно слабее в случае моделей без промежуточной стадии, и мы их здесь не приводим. Также в **Главе 4** приведены ограничения на параметр g_* статистической анизотропии специального квадрупольного вида. Замечательно, что на уровне достоверности 68% ограничение, $-0.048 < g_* < 0.046$, лишь в 2–3 раза слабее, чем аналогичное ограничение, полученные из данных Planck (Ким и Комацу, 2013).

В **Главе 5** мы рассматриваем важный вопрос аномалий в спектре низших мультиполей космического микроволнового фона. В частности, обсуждаются сильная сонаправленность квадруполья и октуполья, а также асимметрия в спектре мощности четных и нечетных мультиполей. Предложена модель, которая позволяет объяснить указанные аномалии. Основным ингредиентом модели является излучение пояса Койпера. Предполагается, что данное излучение достаточно сильное, а его частотные характеристики близки к частотным характеристикам экспериментов WMAP и Planck. В этом случае есть основания полагать, что пояс Койпера оказывает заметное влияние на спектр космического микроволнового фона. Как показано в диссертации, существует область параметров, для которой находят одновременное разрешение как проблема сильной сонаправленности октуполья и квадруполья, так и асимметрия четности.

В **Заключении** перечислены основные результаты исследований, представленных в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для защиты выдвигаются следующие результаты:

1. Исследованы теоретические и феноменологические свойства модели конформного скатывания. В частности, разработана версия модели с длительной промежуточной стадией между окончанием конформного скатывания и началом Большого Взрыва.

2. В модели с промежуточной стадией получены предсказания, которые могут представлять интерес с точки зрения космологических экспериментов. Наиболее существенное среди них— зависимость спектра первичных скалярных возмущений от направления вектора импульса, характеризующего космологическую моду. В разложении этой зависимости по сферическим гармоникам представлены все возможные четные мультиполи, начиная с квадрупольного общего вида.

3. Среди других предсказаний модели с промежуточной стадией следует отметить небольшой наклон спектра первичных возмущений, негауссовость на уровне 3-точечной и 4-точечной функций. Последние два предсказания могут представлять существенный интерес в смысле поиска негауссовости в данных космического микроволнового фона.

4. Были исследованы данные экспериментов WMAP седьмого и девятого годов на вопрос наличия в них статистической анизотропии. В частности, мы подтвердили наличие сигнала статистической анизотропии частного квадрупольного вида, ярко выраженного в V и W частотных каналах WMAP седьмого года. Свойства этого сигнала (частотная зависимость и направленность вдоль полюсов эклиптики) дают основания считать, что

сигнал имеет происхождением систематическую ошибку. Аномалия отсутствует в данных WMAP девятого года, где учтена асимметрия функции сглаживания луча.

5. Мы ограничили ряд моделей ранней Вселенной, предсказывающих статистическую анизотропию первичных скалярных возмущений, на основе данных WMAP седьмого и девятого годов. В частности, мы рассмотрели модели конформного скатывания и анизотропной инфляции.

6. Мы исследовали проблему сильных корреляций в низших мультиполях космического микроволнового фона. Мы предложили модель, которая объясняет корреляцию между квадруполем и октуполем присутствием излучения пояса Койпера. Та же модель одновременно разрешает проблему асимметрии в спектре низших четных и нечетных мультиполей микроволнового фона.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. M. Libanov, S. Ramazanov and V. Rubakov, JCAP **1106** (2011) 010 [arXiv:1102.1390 [hep-th]].

2. S. R. Ramazanov and G. I. Rubtsov, JCAP **1205** (2012) 033 [arXiv:1202.4357 [astro-ph.CO]].

3. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, S. Ramazanov, P. Naselsky, W. Zhao and C. Burigana, JCAP **1210** (2012) 059; arXiv:1206.6981 [astro-ph.CO].

4. S. R. Ramazanov and G. Rubtsov, Phys. Rev. D **89**, 043517 (2014); arXiv:1311.3272 [astro-ph.CO].

5. S. A. Mironov, S. R. Ramazanov and V. A. Rubakov, arXiv:1312.7808 [astro-ph.CO].