

На правах рукописи

ТОКАРЕВА
Анна Александровна

Наблюдаемые следствия модификаций
гравитации в космологии и астрофизике

01.04.02 – теоретическая физика,

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований РАН.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела теоретической физики ИЯИ РАН Горбунов Дмитрий Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Ахмедов Эмиль Тофик оглы, доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова» (г. Москва), ведущий научный сотрудник;

Барвинский Андрей Олегович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Лаборатория теории фундаментальных взаимодействий (г. Москва), ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН (г. Москва).

Защита состоится 19 мая 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

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

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.119.01
доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Несмотря на то, что общая теория относительности как теория гравитации была построена уже более ста лет назад, за это время не было найдено ни одного надежного экспериментального указания на ее неполноту. Отчасти это связано с тем, что гравитация – очень слабое взаимодействие, проявляющее себя на больших масштабах, тогда как какие-либо ее модификации обычно ожидаются лишь при высоких энергиях, соответствующих очень малым расстояниям. На таких расстояниях свойства гравитационного поля невозможно измерить ни напрямую, ни косвенно из-за чрезвычайной его слабости в микромире по сравнению, например, с электромагнитным полем.

При этом общая теория относительности получила такое количество наблюдательных подтверждений, что никто уже не сомневается в адекватности ее описания в области низких энергий. Отклонение лучей света гравитацией при солнечном затмении и прецессия перигелия Меркурия были исторически первыми серьезными свидетельствами в пользу ОТО. К настоящему моменту подтверждены и такие предсказания теории, как замедление времени вблизи гравитирующих масс, гравитационное красное смещение, задержка сигнала в гравитационном поле, изменение периода обращения в системах двойных пульсаров, связанное с излучением гравитационных волн. Кроме того, в астрофизике есть многочисленные указания на существование черных дыр, предсказываемое теорией Эйнштейна, как звездных масс, так и сверхмассивных объектов в центрах галактик и квазаров. Гравитационное излу-

эксперименте LIGO (Аботт и др.'2016), причем форма сигнала полностью соответствует предсказаниям теории Эйнштейна.

Общая теория относительности является концептуальной основой современной космологии. Еще в 1922 году А.А. Фридман получил нестационарное решение уравнений Эйнштейна, описывающее расширяющуюся из сингулярности однородную и изотропную Вселенную. После открытия в 1929 году Э. Хабблом разбегания удаленных галактик этот класс решений стал восприниматься всерьез как основа общепринятой сейчас теории Большого взрыва. Параметры современной Вселенной и ее эволюция в прошлом, по крайней мере до температур ниже 1 МэВ, могут быть с хорошей точностью восстановлены из наблюдательных данных. В первую очередь речь идет о точных измерениях температуры и неоднородностей фона реликтового излучения в экспериментах WMAP и Planck. Независимые данные о Вселенной дают прямые наблюдения крупномасштабной структуры Вселенной, а также измерения ускорения расширения Вселенной по сверхновым в далеких галактиках. На сегодняшний день мы знаем, что Вселенная примерно на 31 процент состоит из темной материи и на 69 процентов из темной энергии, причем обычное барионное вещество составляет всего 4.9 процента. Природа темной материи и темной энергии неизвестна, несмотря на огромное количество различных моделей в литературе. Первая обычно объясняется в рамках физики частиц, тогда как последняя может быть связана в том числе и с модификацией Эйнштейновской гравитации (Сотитроу и Фараони'2008).

Хотя мы можем с достаточной уверенностью говорить о свойствах и эволюции Вселенной при не очень высоких температурах, о более ранних временах известно очень мало. Теория горячего

Большого взрыва, экстраполирующая степенное расширение Вселенной вплоть до планковских энергий, имеет множество проблем, связанных с необходимостью точной подстройки параметров. Во-первых, современная Вселенная с достаточной точностью плоская. Чтобы обеспечить эту наблюдаемую плоскостность, необходимо на планковских масштабах потребовать ее на уровне 10^{-60} . Во-вторых, видимая сейчас часть Вселенной должна состоять из 10^{89} причинно не связанных областей, и с этой точки зрения выглядит невероятной ее наблюдаемая однородность. В-третьих, огромная величина энтропии видимой части Вселенной не могла быть получена в равновесном процессе степенного расширения Вселенной, поэтому в рамках горячей модели приходится предполагать ее необъяснимо большое начальное значение. Однако, все эти проблемы могут быть решены, если предположить, что стадия горячего Большого взрыва предшествовала стадия ускоренного (экспоненциального) расширения Вселенной. Эта стадия может быть получена в частности за счет эволюции скалярного поля (инфлатона) со специфическим потенциалом в режиме медленного скатывания этого поля к минимуму. Интересно, что на такой стадии из квантовых флуктуаций поля инфлатона могут быть сгенерированы наблюдаемые неоднородности в распределении материи и анизотропия температуры реликтового излучения. Амплитуда этих неоднородностей (на уровне 10^{-4}) хорошо известна из измерений реликтового излучения. Из данных наблюдений Planck и WMAP получено, что спектр этих возмущений почти плоский, и даже измерен его наклон. Кроме того, поставлено ограничение на амплитуду тензорной моды. Уже эти данные позволяют исключить часть моделей инфляции, в частности, инфляцию на квадратичном потенциале,

изначально предложенную А. Линде (Линде'1983). Также из наблюдений было получено, что возмущения являются с высокой степенью точности гауссовыми и адиабатическими. Вся это означает, что наиболее предпочтительными моделями инфляции на сегодняшний день являются модели с одним полем инфлатона с почти плоским потенциалом. Такое поле (даже с экспоненциально плоским потенциалом) может быть естественным образом получено в моделях с модифицированным гравитационным сектором, таких как модель Старобинского (Старобинский'1980) и инфляция на поле Хиггса (Безруков и Шапошников'2008). Одна из задач данной диссертации связана с изучением частного случая модели Старобинского, и с построением класса моделей со спонтанно нарушенной масштабной инвариантностью, также приводящих к экспоненциально плоскому потенциалу инфлатона, который лучше всего согласуется с последними наблюдательными данными.

Как уже упоминалось, пока никакие экспериментальные данные напрямую не требуют модификации эйнштейновской теории гравитации. Однако этого требуют теоретические проблемы, связанные с многочисленными попытками построить непротиворечивую квантовую теорию гравитации. Кроме того, общая теория относительности предсказывает даже на классическом уровне существование сингулярностей как внутри черных дыр, так и в прошлом, в момент Большого взрыва. Теория Эйнштейна может быть проквантована обычными методами только в пределах слабых гравитационных полей, что соответствует возможности рассматривать линейную теорию гравитационного поля (метрики). Эта теория описывает безмассовую частицу спина 2, названную гравитоном. Учет взаимодействия гравитонов при помощи обычной

техники диаграмм Фейнмана приводит к тому, что для сокращения возникающих расходимостей необходимо добавление в лагранжиан бесконечного числа дополнительных слагаемых, что означает неперенормируемость теории. Несмотря на то, что по указанной причине ОТО не может рассматриваться как окончательная теория, в низкоэнергетическом пределе при энергиях значительно меньших планковских можно работать с эффективной теорией, учитывающей только первые квантовые поправки к ОТО. Действие такой теории имеет вид:

$$S = \int \sqrt{-g} d^4x \left(-\frac{M_P^2}{2} R + \alpha R^2 + \frac{\beta}{M_P^2} R^3 + \dots \right). \quad (1)$$

Здесь $\alpha, \beta, \dots \sim 1$ – произвольные безразмерные константы, M_P – редуцированная масса Планка. Слагаемые типа $R_{\mu\nu\lambda\rho} R^{\mu\nu\lambda\rho}$, $R_{\mu\nu} R^{\mu\nu}$, разрешенные симметриями теории (общей ковариантностью), приводят к нарушению унитарности соответствующей квантовой теории, поэтому не включаются в эффективное действие. При наличии скалярного поля в теории (а в Стандартной модели это поле Браута-Энглера-Хиггса \mathcal{H}) оно благодаря квантовым поправкам в искривленном пространстве неизбежно приобретает неминимальное взаимодействие с гравитацией (Бирелл и Дэвис'1982). В частности, действие для поля Хиггса принимает вид

$$S_H = \int \sqrt{-g} d^4x \left(\xi R \mathcal{H}^\dagger \mathcal{H} + D^\mu \mathcal{H}^\dagger D_\mu \mathcal{H} - \frac{\lambda}{4} (\mathcal{H}^\dagger \mathcal{H} - v^2)^2 \right) \quad (2)$$

где $\xi \lesssim 1$ – натуральное значение этой новой константы связи в эффективной теории. В данной диссертации будет рассмотрен частный случай $\xi = 1/6$, который на классическом уровне рассмот-

рения выделен выделен наличием дополнительной конформной симметрии кинетического члена поля Хиггса.

Исторически первая модель инфляции была предложена А. Старобинским (Старобинский'1980). Действие для гравитации в этой модели имеет вид:

$$S = -\frac{M_P^2}{2} \int \sqrt{-g} d^4x \left(R - \frac{R^2}{6\mu^2} \right), \quad (3)$$

где параметр μ определяется наблюдаемой амплитудой скалярных возмущений: $\mu = 1.3 \times 10^{-5} M_P$. Несмотря на то, что действие (3) похоже на первые два слагаемых (1), сложно интерпретировать слагаемое R^2 , приводящее к инфляционному решению, как квантовую поправку к исходному действию Эйнштейновской гравитации из-за того, что соответствующий параметр α должен быть порядка 10^{10} , что является неестественно большим значением, далеким от единицы. Тем не менее, такая модификация гравитации не исключена, и модель Старобинского остается одной из самых популярных моделей инфляции. Интересно, что в этой модели естественным образом происходит переход от инфляции к горячей Вселенной: инфлатон скатывается в минимум потенциала, осциллирует вокруг него, а потом распадается на бозоны Хиггса, которые, в свою очередь, дают горячую плазму из релятивистских частиц Стандартной модели с температурой порядка 10^9 ГэВ (Старобинский'1980). Особый случай конформной связи поля Хиггса со скаляром кривизны, который будет исследован далее, определяющим образом влияет именно на разогрев Вселенной. Дополнительная симметрия запрещает распад инфлатона на бозоны Хиггса, в результате чего разогрев происходит позже за счет квантовой конформной аномалии калибровочных бозонов. Температура разогрева оказыва-

ется ниже, что приводит к некоторым потенциально наблюдаемым эффектам. Во-первых, несколько изменяются предсказания для наклона спектра скалярных возмущений. Во-вторых, наблюдение (или отсутствие) специфического сигнала в области спектра гравитационных волн, доступной детекторам будущего поколения, позволит подтвердить или, наоборот, исключить обсуждаемую модель. В-третьих, более точные измерения масс бозона Хиггса и топ-кварка на коллайдере также могут исключить данную модель из-за возможной нестабильности в ней электрослабого вакуума на промежуточной стадии между инфляцией и разогревом.

Неминимальная (конформная) связь поля Хиггса с гравитацией может быть интерпретирована как квантовая поправка к стандартному кинетическому члену. Интересно при этом, что конформный случай $\xi = 1/6$ соответствует фиксированной точке однопетлевой ренормгруппы для константы связи ξ (Бирелл и Дэвис'1982). В этом смысле конформная связь является натуральным и стабильным относительно первых квантовых поправок случаем, в отличие от минимальной связи.

Масштабная инвариантность Стандартной модели в пределе высоких энергий на классическом уровне вдохновляет ученых на поиски такой модификации гравитации, которая при планковских энергиях становится также масштабно инвариантной (см., например, Таварес и др.'2013 и другие ссылки в этой работе). При более низких энергиях симметрия нарушена спонтанно. В данной диссертации рассмотрен класс моделей, в которых масса Планка дается вакуумным средним нового скалярного поля. При этом действие

для гравитации и скаляра X пишется в виде:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \frac{1}{2} [(\partial_\mu X)^2 - \xi X^2 R], \quad (4)$$

где ξ – вообще говоря, произвольный безразмерный параметр. В фазе нарушенной симметрии $\xi \langle X \rangle^2 = M_P^2$, поэтому при низких энергиях воспроизводится действие ОТО. В диссертации изучены все возможные варианты инфляции в моделях со спонтанно нарушенной масштабной инвариантностью: инфляция, даваемая членом R^2 , непрерывный переход в пространстве параметров к инфляции на поле Хиггса, а также инфляция на скалярном поле с масштабно инвариантным потенциалом общего вида.

Для наблюдательной идентификации конкретной модели инфляции важной является следующая общая черта этого класса моделей: спонтанно нарушенная масштабная инвариантность означает существование безмассового голдстоуновского бозона – скаляра, который в дальнейшем будет называться дилатоном. Если он рождается в ранней Вселенной в достаточном количестве, то такая релятивистская степень свободы влияет на динамику расширения Вселенной как дополнительная «темная» радиация. Данные о первичном нуклеосинтезе во Вселенной дают самое сильное ограничение на число релятивистских степеней свободы на момент образования гелия. Как будет показано далее, это ограничение позволяет исключить часть пространства параметров масштабно инвариантных моделей. Кроме того, те же данные о нуклеосинтезе указывают на присутствие небольшого количества дополнительной радиации (Изотов и др.'2014), помимо частиц Стандартной модели. Представляет интерес то, что в случае инфляции, определяемой членом R^2 в действии, при разогреве Вселенной рождается как раз

нужное количество дилатонов для объяснения этого небольшого отклонения от Стандартной модели.

В различных моделях рождается разное количество дилатонов. Эти различия связаны в основном с разницей механизмов разогрева Вселенной и, как следствие, с разницей температур начала горячей стадии. Температура разогрева не должна быть слишком низкой, иначе оказывается, что инфлатон полностью распадается на дилатоны, в результате чего обычная материя не рождается. Далее будет получено соответствующее ограничение на температуру разогрева в рассматриваемых моделях инфляции.

Еще одна причина интереса моделям инфляции со спонтанным нарушением масштабной инвариантности в том, что они позволяют получить естественным образом потенциал инфлатона с экспоненциально плоским плато. Предсказания для спектра возмущений в этом случае лучше всего согласуются с данными наблюдений WMAP и Planck, находясь в центре разрешенной области. Интересно, что похожие потенциалы получаются также и в классе моделей с конформной инвариантностью при высоких энергиях (Линде и Каллош'2013). Хотя все эти выводы сделаны на основе классического рассмотрения, есть работы, в которых изучались квантовые поправки к инфляции на плоском потенциале. Например, в работе Безрукова и др.'2011 было показано, что в той области, где происходит инфляция, эти поправки невелики благодаря приближенной сдвиговой симметрии потенциала.

Модификации гравитации интересны также с точки зрения объяснения темной энергии. В отличие от инфляции, которая происходит на масштабе высоких энергий, современное ускорение расширения Вселенной может быть получено лишь если изменить

действие для гравитации на очень больших пространственных масштабах, соответствующих малым значениям скаляра кривизны. Обычно рассматривают теории с действием

$$S = \frac{M_{\text{P}}^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} F(R), \quad (5)$$

где произвол функции $F(R)$ ограничивается следующими требованиями. Во-первых, должен восстанавливаться предел обычной эйнштейновской гравитации с космологической постоянной: $F(R) \approx R - 2\Lambda$ при обычных (промежуточных) значениях кривизны. Во-вторых, необходимо выполнение условий классической и квантовой стабильности: $F'(R) > 0$, $F''(R) > 0$. В-третьих, $F''(R) > \text{const}$ должна быть ограничена снизу, чтобы избежать сингулярностей при больших значениях кривизны (Старобинский и др.'2010). Это условие автоматически выполняется, если разложение $F(R)$ при большой кривизне содержит член R^2 . Наконец, чтобы модификация гравитации не сводилась просто к добавлению космологической константы, интересно рассматривать случай, когда в пределе пространства Минковского космологическая константа исчезает, то есть $F(0) = 0$. Всем этим условиям удовлетворяет, в частности, предложенная А. Старобинским зависимость (Старобинский'2007):

$$F(R) = R + \lambda R_0 \left(\left(1 + \frac{R^2}{R_0^2} \right)^{-n} - 1 \right) + \frac{R^2}{6M^2}. \quad (6)$$

Интересно, что при конкретном выборе M эта функция может давать также и инфляционную стадию в ранней Вселенной. Такая модификация гравитации описывает одновременно инфляцию и современное ускоренное расширение Вселенной за счет того, что в

ней возникает дополнительная скалярная степень свободы (называемая скаляроном). Известно (Магнано'1987), что $F(R)$ -гравитация может быть сведена заменой переменных к обычной гравитации со скалярным полем, которое взаимодействует со следом тензора энергии-импульса и имеет нетривиальный потенциал.

Темная энергия, описываемая модифицированной гравитацией, будет отличаться от космологической постоянной. Во-первых, ее уравнение состояния только приближенно описывается соотношением $p/\rho = \omega = -1$, где p – давление, а ρ – плотность среды. Во-вторых, в таких моделях ω зависит от времени и даже бывают моменты, когда $\omega < -1$ (Мотохаши и др.'2011). Связанные с этим эффекты потенциально могут проявиться в будущих экспериментах при более точном измерении параметра уравнения состояния и его эволюции.

Помимо уравнения состояния $F(R)$ -гравитация теоретически может проявлять себя в астрофизике. В недавних работах (Долгов и др.'2012, Долгов и др.'2013) для функции (6) утверждается, что в сжимающихся объектах возникают осцилляции кривизны, которые могут стать большими и нелинейными. Последние, согласно выводам (Долгов и др.'2012, Долгов и др.'2013), могут рождать частицы Стандартной модели в том числе и очень высоких энергий, близких к обрезанию GZK (10^{19} эВ). Более того, в этих работах сделана оценка потока этих частиц на Земле, который оказался близким или даже большим, чем наблюдаемый поток космических лучей. В данной диссертации вышеупомянутый результат проверяется и ставится под сомнение по нескольким причинам.

Во-первых, в диссертации был рассмотрен процесс квантового рождения частиц в сжимающейся благодаря джинсовской неустой-

чивости среде. Эффект связан с тем, что в модели (6) скалярон во внешней среде ведет себя как хамелеон – частица с массой, зависящей от плотности: чем больше плотность, тем больше масса. Такие частицы в принципе могут рождаться при нарушении адиабатичности. Было показано, что этот процесс может быть полностью аналитически описан и при правильной физической интерпретации ответа приходится сделать вывод, что частиц рождается пренебрежимо мало при разумных значениях параметров модели.

Во-вторых, в данной диссертации было изучено также классическое рождение частиц осцилляциями кривизны, в точности как в работах (Долгов и др.'2012, Долгов и др.'2013), но с другими, физически обоснованными, начальными условиями для скалярона. Коррекция начальных условий приводит к параметрически меньшей амплитуде осцилляций для начальной плотности, значительно превышающей современную критическую плотность Вселенной. Следовательно, интересный эффект рождения частиц возможен лишь при малых плотностях, близких к современной критической и относится к современному образованию структур во Вселенной.

В-третьих, главный вопрос к работам (Долгов и др.'2012, Долгов и др.'2013) связан с корректностью применения в них приближения однородной идеальной жидкости для среды. В диссертации было показано, что для описания нелинейных осцилляций кривизны в моменты времени, когда скалярон имеет большую эффективную массу (и когда как раз рождаются частицы), нельзя пользоваться однородным приближением. Была сделана оценка вне рамок этого приближения, показывающая, что количество рождающихся частиц высоких энергий снова пренебрежимо мало.

По-видимому, очень интересная и нетривиальная возможность обнаружить модифицированную $F(R)$ -гравитацию через рождение частиц космических лучей при образовании структур во Вселенной, на самом деле оказывается нереалистичной, а значительные результаты для потока в (Долгов и др.'2012, Долгов и др.'2013) являются артефактом применения приближения однородной среды там, где оно не выполняется.

Цель работы состоит в изучении возможных наблюдаемых следствий модификаций гравитации как при высоких, так и при низких энергиях, а также в построении моделей инфляции с модифицированным гравитационным сектором и исследовании возможностей их проверки.

Научная новизна и практическая ценность.

Разогрев Вселенной в модели Старобинского давно изучен, но особый случай конформной связи поля Хиггса с гравитацией, в котором скалярон не может как обычно распадаться на бозоны Хиггса, ранее в литературе не рассматривался. Нестабильность вакуума в данной модели, динамически возникающая после инфляции, также является новым изученным эффектом. Кроме того, в работе получено характерное предсказание для гравитационно-волнового сигнала в модели Старобинского с конформным полем Хиггса, которое может быть проверено в ближайшем будущем при помощи детекторов гравитационных волн.

В литературе известна модель инфляции на поле Хиггса, дополненная масштабной инвариантностью при высоких энергиях (Безруков и др' 2008). Эта модель в данной диссертации расширена с учетом слагаемого R^2 в действии для гравитации и рассмотрено все возможное пространство параметров. Найдено, при каких

условиях дилатон может давать существенный вклад в темную радиацию. Таким образом, более точные измерения количества темной радиации могут помочь идентифицировать конкретную модель инфляции среди моделей со спонтанным нарушением масштабной инвариантности.

В недавних работах (Долгов и др.'2012, Долгов и др.'2013) было получено, что в $F(R)$ -гравитации могут рождаться частицы высоких энергий внутри сжимающихся объектов, причем их количество может быть значительным. В данной диссертации этот результат ставится под сомнение из-за неприменимости однородного приближения. Сделанная оценка вне рамок этого приближения говорит о том, что рождение частиц на самом деле сильно подавлено.

Апробация диссертации.

Основные результаты диссертации были доложены на научном семинаре ИЯИ РАН, конференциях «Ломоносов» и «Ломоносовские чтения», МГУ, 2012 г., на международных семинарах «Кварки-2012», Ярославль, 4 – 10 июня, 2012 г., «Кварки-2014» Суздаль, 2 – 8 июня, 2012 г., на международных школах: «Байкальская Школа по Физике Элементарных Частиц и Астрофизике», Иркутск, 5 – 13 июня, 2012 г., «Transregio Winter School in Cosmology», Passo del Tonale, Italy, 7 – 16 декабря, 2012 г., «Зимняя школа ИТЭФ», Московская область, Отрадное, 12 – 18 февраля, 2013 г., «International School for Subnuclear Physics», Эриче, Италия, 24 июня – 3 июля, 2013 г., на международном рабочем совещании «Fundamental Issues of the Standard Cosmological Model», Cargese, Корсика, Франция, 21 – 27 сентября, 2014 г.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из Введения, трех глав основного текста

и Заключение, содержит 73 страницы машинописного текста, в том числе 5 рисунков и список литературы из 82 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во Введении обсуждается необходимость модификации гравитации с точки зрения квантовой теории, а также инфляционной космологии. Также кратко описаны конкретные модели, которые далее подробно изучаются в тексте диссертации, и их теоретическая мотивация: модель инфляции Старобинского с конформным полем Хиггса, спонтанное нарушение масштабной инвариантности и $F(R)$ -гравитация, объясняющая темную энергию.

В Главе 1 рассматривается модель инфляции Старобинского с конформным полем Хиггса. Сначала воспроизводится хорошо известный метод работы с такой теорией, связанный с переходом к эйнштейновской метрике. Затем, во втором параграфе обсуждается разогрев Вселенной за счет распада инфлатона на калибровочные бозоны. В следующих двух параграфах рассматриваются наблюдаемые следствия изучаемой модели: параметры спектра возмущений и гравитационно-волновой сигнал. В последнем параграфе обсуждается вопрос о стабильности вакуума поля Хиггса.

В Главе 2 разбираются модели инфляции со спонтанно нарушенной масштабной инвариантностью. В начале описывается аналог модели инфляции Старобинского с этой дополнительной симметрией. Вычисляется рождение дилатонов после инфляции во время разогрева. В двух последних параграфах результаты о разогреве и количестве темной радиации обобщаются на другие возможные модели инфляции в рамках концепции спонтанного нарушения масштабной инвариантности.

В Главе 3 рассматривается модель $F(R)$ -гравитации, объясняющая современное ускоренное расширение Вселенной. В первых двух параграфах описываются модель Старобинского для темной энергии и переход к эйнштейновским переменным в ней. В третьем и четвертом параграфах проводится вычисление квантового рождения частиц высоких энергий в изучаемой модели. В четвертом и пятом параграфах обсуждается рождение частиц классическими нелинейными осцилляциями кривизны. В последнем параграфе показывается неприменимость используемого в литературе приближения однородной среды для нелинейных осцилляций и, как следствие, сильное подавление для количества частиц высоких энергий в реальной ситуации.

В Заключение перечислены основные результаты исследований, представленных в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

Для защиты выдвигаются следующие результаты:

1. Рассмотрен механизм разогрева Вселенной в модели Старобинского с конформным полем Хиггса, связанный с квантовой конформной аномалией калибровочных полей, и получена температура разогрева. В следующем за лидирующим порядке по параметрам медленного скатывания вычислены параметры спектра возмущений в этой и других моделях с похожим потенциалом инфлатона. Оценен гравитационно-волновой сигнал, образовавшийся на стадиях инфляции и разогрева.

2. В модели Старобинского с конформным полем Хиггса исследована стабильность электрослабого вакуума на промежуточной материально-доминированной стадии между инфляцией и разогревом. Рассмотрена классическая эволюция поля Хиггса и оценен вклад квантового туннелирования. Как результат, получено ограничение снизу на массу бозона Хиггса в этой модели: $M_h \gtrsim 126.2$ ГэВ.
3. Изучен класс моделей инфляции со спонтанным нарушением масштабной инвариантности с точки зрения добавочной темной радиации, связанной с рождением безмассовых дилатонов. Рассмотрена инфляция на скаляроне, дающая предсказание для вклада темной радиации, которое может быть проверено в ближайшем будущем. Изучено пространство параметров и переход от инфляции на скаляроне к инфляции на поле Хиггса. Поставлено ограничение на температуру разогрева в инфляции со спонтанным нарушением масштабной инвариантности.
4. Исследована модель Старобинского для темной энергии с точки зрения рождения частиц высоких энергий в сжимающейся среде, полученного в недавних работах А. Долгова и др. Изучено как квантовое рождение скаляронов, так и возникновение классических осцилляций поля скалярона. Для последних поставлены корректные физически обоснованные начальные условия и вычислена амплитуда, оказавшаяся параметрически меньше, чем было получено в вышеупомянутых работах.
5. Изучен нелинейный режим осцилляций скалярона. Показа-

но, что приближение однородной материи неприменимо при описании рождения высокоэнергичных частиц. Проведена оценка рождения частиц за рамками этого приближения и получено сильное подавление по сравнению с результатом в однородном приближении, делающее вклад в поток космических лучей пренебрежимо малым.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. D. Gorbunov and A. Tokareva, R^2 -inflation with conformal SM Higgs field // JCAP **1312**, 021 (2013), arXiv:1212.4466.
2. D. Gorbunov and A. Tokareva, Scale-invariance as the origin of dark radiation? // Phys. Lett. B **739**, 50 (2014), arXiv:1307.5298.
3. D. S. Gorbunov and A. A. Tokareva, Inflation and reheating in the Starobinsky model with conformal Higgs Field // Phys. Part. Nucl. Lett. **10**, 633 (2013).
4. D. Gorbunov and A. Tokareva, Scalaron production in contracting astrophysical objects // J. Exp. Theor. Phys. **120**, no. 3, 528 (2015), arXiv:1412.3413.
5. D. Gorbunov and A. Tokareva, No Cosmic Rays from Curvature Oscillations during Structure Formation with $F(R)$ -gravity // arXiv:1412.3770.