

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Иванова Михаила Михайловича “Первичные неоднородности в неминимальных космологических моделях и слабо-нелинейный режим формирования структур”
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Один из основных признаков современной астрофизики — переход на новый технологический уровень. Следствием такого перехода является не только проверка теоретических моделей, но и открытие новых, требующих осмысления, явлений. Существенный вклад в понимание глобальных явлений Природы приносят полные обзоры неба, проведенные в различных диапазонах длин волн. Такие обзоры, как, например, в микроволновом диапазоне — WMAP NASA и Planck ESA, позволили решить космологические задачи нового уровня и, в частности, измерить параметры Вселенной с точностью лучше, чем 3%. Высокое качество наблюдательных данных и большой объем информации позволяют ставить задачи следующего уровня, включающего исследования самых ранних эпох существования Вселенной. Среди них, несомненно, первостепенный интерес представляют исследования разных режимов роста первичных неоднородностей и формирования структур в ранней Вселенной, с чем связываются проблемы негауссовости первичных неоднородностей, физики темной материи и инфляционного расширения. Поэтому предлагаемая диссертация Михаила Михайловича Иванова, посвященная исследованию космологических моделей и режимов формирования структур во Вселенной несомненно **актуальна**.

Основными целями диссертационной работы М.М.Иванова стали изучение наблюдательных следствий моделей квантовой гравитации в космологии, что включает исследования квадратичной гравитации и возможного нарушения Лоренцевой симметрии в современных теориях гравитации, инфлатонного поля и темной материи. Кроме того, в диссертации представлены и применены разработанные диссертантом методы учета нелинейного скучивания темной материи для описания формирования крупномасштабных структур.

Диссертация содержит семь глав, а также Введение, Заключение, два Приложения и список литературы.

Во **Введении** приведены обзор современных проблем по теме диссертационной работы и ее основные цели, показаны научная новизна результатов, выносимых на защиту, и их практическая значимость. Обосновывается актуальность представленных исследований, и приведен список публикаций автора, в которых опубликованы эти результаты.

В **Первой главе** рассмотрены появление и эволюция космологических возмущений в рамках теории квадратичной гравитации. Было показано, что модель с легким духом не сопоставима с эволюцией нашей Вселенной и полученный результат не зависит от какой-либо интерпретации неунитарных процессов.

Во **Второй главе** диссертации исследуется теория гравитации с нарушением Лоренцевой симметрии. Обсуждаются модели Эйнштейн-эфир-гравитации и хронометрической гравитации, которые описывают Лоренцево нарушение с помощью введения времени-подобного вектора эфира, задающего выделенную систему отсчета. Описаны ограничения, полученные на параметры рассматриваемых моделей из наблюдательных

тестов в Солнечной системе, наблюдений двойных систем и космологии. Было показано, что из наблюдений гравитационных волн с помощью интерферометра LIGO можно получить прямое модельно-независимое ограничение на скорость распространения тензорных возмущений.

Третья глава посвящена обобщению теории инфляции с духами в более полную теорию с фундаментальной ультрафиолетовой частью, включающей масштабы энергий, близких к массе Планка. Было введено взаимодействие между инфлатоном и Лоренц-нарушающим векторным полем, описываемым в рамках Эйнштейн-эфир или хронометрической теорий гравитации. Отмечается, что новизна предложенного подхода по сравнению с предыдущими работами по духовой инфляции состоит в возможности изучения малых возмущений и описания фоновой динамики. Было показано, что духовый конденсат дает положительный вклад в плотность энергии Вселенной, и это делает инфляцию возможной даже при отсутствии какого-либо потенциала инфлатона. Режим был назван “кинетической инфляцией”. Предсказывается негауссовость возмущений с определенными формой (близкой к равносторонней) и амплитудой ($f_{NL} \sim -5 \div -40$), которую можно будет проверить экспериментально в будущем.

В **Четвертой главе** исследуются следствия нарушения принципа эквивалентности на масштабах достаточно малых сгустков темной материи. В частности, было развито эффективное макроскопическое описание темной материи, взаимодействующей с эфиром. Это позволило на строгом уровне вывести уравнения для космологических возмущений. В третьей части главы были качественно изучены основные космологические эффекты. Отмечено, что на уровне однородной космологии модель предсказывает ненаблюдаемое перемасштабирование гравитационной постоянной в уравнении Фридмана, и на уровне линейных возмущений обнаружены зависящие от масштаба усиление роста структур и смещение между плотностями барионов и темной материи.

В **Пятой главе** исследованы наблюдательные ограничения на отклонение от Лоренцевой симметрии в теории гравитации и моделях темной материи. Рассматриваются три ключевых эффекта: перемасштабирование вклада материи в уравнении Пуассона, появление дополнительного вклада в анизотропное натяжение и масштабно-зависимое усиление сгущивания темной материи. Проведен численный анализ эффектов в модели с нарушением Лоренцевой симметрии и их влияния на наблюдаемые спектры мощности возмущений плотности и анизотропии температуры реликтового излучения. Эффекты были оценены с использованием моделирования методом Монте Карло с Марковскими цепями. Впервые было получено прямое ограничение на отклонение от Лоренцевой инвариантности в секторе темной материи, которое не может превышать нескольких процентов.

Во **Шестой главе** диссертации представлен новый формализм в рамках Эйлеровой гидродинамики, который позволяет решить обсуждаемые проблемы стандартной теории возмущений. В основе предложенного метода лежит идея исследовать непосредственно временную эволюцию функции распределения космологических полей вместо эволюции самих этих полей. В рамках этого метода была разработана диаграммная техника и вычислены вершинные функции для приближения Зельдовича и точной динамики в случае Гауссовых начальных условий. Отмечается, что важным свойством предложенного аппарата является отсутствие инфракрасных сингулярностей во всех элементах

пертурбативного разложения.

Седьмая глава посвящена построению процедуры пересуммирования инфракрасных эффектов в теории Сахаровских осцилляций. Процедура основана на предложенном в предыдущей главе подходе, применяемом в теории возмущений на временных расслоениях. Метод позволил определить и пересуммировать усиленные вклады от инфракрасных мод, которые влияют на форму и положение Сахаровских осцилляций, и дает возможность надежно оценить теоретическую неопределенность на каждом шаге пересуммирования. Построен алгоритм для численного вычисления инфракрасных пересуммированных корреляционных функций, и получен спектр мощности, который включает все поправки первого порядка малости и описывает нелинейную эволюцию Сахаровских осцилляций с процентной точностью.

В Заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

Среди основных результатов диссертации, на мой взгляд, можно выделить (а) получение ограничения на скорость распространения гравитационных волн в теориях гравитации с нарушенной Лоренцевой симметрией; (б) построение проверяемой модели инфляции, основанной на теории гравитации с нарушенной Лоренцевой симметрией, результатом которой может быть ускоренное расширение Вселенной за счет взаимодействия эфира и инфлатона; (с) аналитический и численный анализ проявления и получения ограничительных оценок нарушения Лоренц-инвариантности в теории гравитации и модели темной материи по данным крупномасштабной структуры Вселенной и анизотропии реликтового излучения.

Научная новизна работы определяется тем, что 1) предложена модель инфляции с нарушенной Лоренц-инвариантностью, и в рамках этой модели удалось осуществить ультрафиолетовое обобщение духовой инфляции; 2) предложен новый подход для описания формирования крупномасштабной структуры Вселенной в нелинейном режиме; подход основан на изучении зависящей от времени функции распределения космологических полей, позволяющей вычислить их корреляторы; 3) получена новая оценка смещения пика Сахаровских осцилляций в координатном пространстве.

Практическая значимость состоит в том, что 1) предложена проверяемая модель инфляционной стадии с нарушенной Лоренц-инвариантностью; 2) получены сильнейшие на данный момент космологические ограничения на параметры нарушения лоренц-инвариантности в теории гравитации, а также модели темной материи, которые могут быть использованы при анализе наблюдательных данных; 3) предложен новый аналитический подход для описания формирования крупномасштабной структуры Вселенной в нелинейном режиме (теория возмущений на временных расслоениях); 4) разработана техника систематического пересуммирования усиленных в инфракрасной области диаграмм, которая позволила получить выражения для корреляторов в главном порядке и первом порядке малости. Предложенные оценки и методы могут быть использованы в дальнейших исследованиях и развивать или ограничивать современные теоретические подходы в изучении ранней Вселенной.

Диссертация нашла полное отражение в восьми публикациях в международных физических журналах таких, как JCAP и JETP Letters, удовлетворяющих списку и требованиям ВАК.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Выводы и результаты **обоснованны и достоверны**, что подтверждается применением современных аналитических методов расчета, публикациями в ведущих физических журналах и апробацией на международных конференциях.

Диссертация хорошо иллюстрирована и содержит детальное описание применяемых методов.

Важно еще раз отметить, что разработанные новые методы анализа были применены в предложенном диссертационном исследовании, привели к получению новых оценок, вычисленных с использованием современных космологических наблюдательных данных, а также позволили сделать прогноз, проверяемый экспериментально.

Имеется ряд мелких *замечаний*.

Утверждение на стр.9, что "...распределение материи (например, галактик) во Вселенной... в итоге дает доступ к значительно большому количеству Фурье-гармоник, позволяющему уменьшить статистическую ошибку определения космологических параметров" является спорным, потому что именно наблюдаемое распределение галактик содержит наибольшие селекционные эффекты и может приводить к трудно контролируемым систематическим эффектам.

В работе часто используется жаргонный термин "наблюдаемые" вместо "наблюдаемые величины" или "наблюдаемые параметры" (например, на стр.7 "для космологических наблюдаемых." или на стр.53 "для основных наблюдаемых,").

В тексте встречается несогласование падежей, например, на стр.4: "материя, состоящая из тяжелых частицы не имеющих зарядов", на стр.7: "на уровне подсчете степеней" или на стр.9: "известен как стандартная Эйлеровой теория возмущений".

Встречаются опечатки, например, на стр.9 "распределение материи (например, галактик) во Вселенной предоставляет собой трехмерный объем данных" — "предоставляет" вместо "представляет" или "сокаращающихся" вместо "сокращающихся" (стр.11); также "Полный ТЭИ системы хронон-темная матери равен" (стр.66).

Есть некоторая свобода при использовании запятых, когда союзы отделяются от следующего предложения: "Однако, давно известно" (стр.11), или причастные и деепричастные обороты наоборот не отделяются: например, в разделе про негауссовость на стр.49: "В предположении $\alpha \ll \delta^2$, вклад снова доминирует." — запятая не нужна; "Отметим что в (3.52)— запятая нужна; "Оценим теперь амплитуду негауссовости сравнивая лагранжиан" — запятая нужна.

Есть стилистически неудачные выражения: "В настоящее время уже функционирует ряд глубоких обзоров неба". Лучше вместо "функционирует ряд" использовать "имеются данные по ряду". То же касается фраз "Используя наблюдательные данные спутника "Планк" и глубокого обзора "ВигглЗ", были получены ограничения", где лучше заменить оборот "Используя" на "С использованием...".

Из предложений по улучшению представления работы можно упомянуть создание (генерирование в рамках предложенной модели и соответственно визуализацию) карт негауссовости, дающий вклад в неоднородность распределения космического микроволнового фона. Это позволило бы усилить эффект наглядности полученных оценок негауссовости.

Перечисленные замечания носят, скорее, редакционный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение. Считаю, что представленная диссертационная работа является исследованием, имеющим большое научное и практическое значение в задачах изучения ранних этапов эволюции Вселенной, моделей темной материи и теории гравитации. Диссертант показал свою высокую квалификацию в проведенных им исследованиях космической микрофизики, возникновения и роста первичных возмущений, а также при интерпретации данных, полученных в современных космологических экспериментах. Диссертация удовлетворяет всем требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней” ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант Иванов Михаил Михайлович *несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — “Теоретическая физика”*.

Официальный оппонент

докт.физ.-мат.н., вед.н.с. Верховданов Олег Васильевич / О. В. Верховданов /
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН)
пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская респ., 369167
т. 8-87878-46329, адрес эл.почты: vo@sao.ru

Подпись Верховданова О.В. заверяю
ученый секретарь САО РАН, к.ф.-м.н.

/ Е. И. Кайсина /

8.12.2017 г.

Верходанов Олег Васильевич

Ведущий научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН), доктор физико-математических наук (специальность 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия)

Список основных публикаций за последние 5 лет:

1. *Yu.N.Parijskij, O.P.Zhelenkova, A.I.Kopylov, A.V.Temirova, O.V.Verhodanov, V.N.Komarova*. Search and study of objects of the early universe. *Astrophys. Bull.* **72**, No 2, 93-99 (2017)
2. *O.V.Verkhodanov, D.I.Solovyov, O.S.Ulakhovich, M.L.Khabibullina, E.K.Majorova*, Radio galaxies of different populations on the Planck mission maps. *Astron. Rep.* **61**, 297-298 (2017)
3. *O.V.Verkhodanov, Ya. V. Naiden*. A Comparison of anisotropic statistical properties of CMB maps based on the WMAP and Planck space Mission data. *Astrophysical Bulletin*, V.**71**, No.4, pp.371-383 (2016)
4. *O.B. Верходанов*. Космологические результаты космической миссии "Планк". Сравнение с данными экспериментов WMAP и ВІСЕР2. *УФН* **186**, No 1, с.3-46 (2016)
5. *T. V. Keshelava and O. V. Verkhodanov*. Search for clustering of background objects near distant radio galaxies using the MST method. *Astrophys. Bull.* V.**70**, Iss.3, p.257-263 (2015)
6. *O.V.Verkhodanov*. Series Anomalies of Low Multipoles of WMAP and Planck Missions: What are They? *Physics of Particles and Nuclei*, 2015, Vol. **46**, No. 2, pp. 237-247
7. *Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov*. Two-Dimensional Spectral Estimators of Statistical Anisotropy and Search for the Isolated Directions in Planck Mission Data. *Astrophys. Bull.* V.**69**, Iss.4, 488-496 (2014)
8. *O.V.Verkhodanov*. Comparison of Low-Harmonics Spectra and Maps According to the WMAP and Planck Space Missions. *Astrophys. Bull.*, V.**69**, Iss.3, 330-338 (2014)
9. *Ya. V. Naiden, O. V. Verkhodanov*. Power spectrum distortions in CMB map one-dimensional cross-sections depending on the cosmological model. II. *Astrophys. Bull.*, V.**68**, No.4, p.465-470 (2013)
10. *O.B. Верходанов, А.Г. Дорошкевич*. 2013. Системы пикселизации неба для анализа протяженного излучения. *УФН*, Т.**183** (8), 849-862 (2013)