

Отзыв официального оппонента **Зыбина Кирилла Петровича**
на диссертацию **Иванова Михаила Михайловича**
**«Первичные неоднородности в неминимальных космологических
моделях и слабо-нелинейный режим формирования структур»**,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.02- теоретическая физика.

В диссертационной работе М. М. Иванова рассмотрен ряд актуальных проблем современной космологии: производство первичных неоднородностей в модифицированных теориях гравитации, проверка Лоренц-инвариантности темной материи и формирование космологических структур в слабо-нелинейном режиме. Актуальность исследований теорий модифицированной гравитации диктуется необходимостью объяснения, с одной стороны, физики как ранней, так и поздней Вселенной, а с другой стороны — построением самосогласованной теории квантовой гравитации. В процессе работы над последней задачей были развиты новые подходы к квантованию гравитации, требующие нарушения лоренцевой симметрии, что поставило вопрос о её надежной верификации для секторов гравитации, темной материи и инфлатона. Актуальность изучения формирования структур в слабо — нелинейном режиме продиктована необходимостью точного теоретического описания прецизионных наблюдательных данных о крупномасштабной структуре Вселенной, ожидаемых в ближайшем будущем.

В первой главе диссертации изучена инфляция и последующая эволюция Вселенной в модели квадратичной гравитации, которая допускает квантование в четырёхмерном пространстве-времени. Существенным недостатком этой теории является отсутствие унитарности, которое не позволяет рассматривать её как полноценную квантовую теорию поля. В литературе рассматриваются различные способы обойти эту проблему, однако её надежное решение до сих пор не получено. В диссертации рассмотрен набор параметров квадратичной гравитации, для которых космологические предсказания не зависят от способа решения проблемы отсутствия унитарности. Показано, что в данной модели инфляция может пройти вполне успешно, однако последующая космологическая эволюция не соответствует наблюдаемой Вселенной. Сделан вывод о том, что построение космологических моделей в рамках квадратичной гравитации с необходимостью требует решения проблемы отсутствия унитарности.

Вторая глава диссертации посвящена теориям гравитации с нарушенной Лоренц-инвариантностью. Данные теории мотивированы новым методом квантования гравитации, предложенным П. Хоржавой, и допускающим (слабое) нарушение лоренцевой симметрии при низких

энергиях. Это нарушение описывается за счет введения нового фундаментального векторного поля («эфира»), которое принимает ненулевое вакуумное значение. Это поле может взаимодействовать с метрикой и полями материи. Приведены теоретические и наблюдательные ограничения на параметры подобных взаимодействий и получено новое ограничение на один из параметров теории, описывающий отклонение скорости распространения гравитационных волн от скорости света.

Третья глава посвящена модели инфляции с нарушенной лоренцевой симметрией. Интересной особенностью предложенной модели является то, что ускоренное расширение Вселенной может происходить за счет взаимодействия полей эфира и инфлатона даже при отсутствии потенциала для инфлатона. Исследованы свойства первичных скалярных и тензорных возмущений. Особое внимание вычисление трехточечной корреляционной функции, амплитуда которой в настоящий момент согласуется с данными спутника «Планк».

Четвертая глава посвящена исследованию модели темной материи с нарушенной лоренцевой симметрией. Развито эффективное описание взаимодействия эфира и темной материи. Примечательно, что такое взаимодействие описывается всего одним свободным параметром. Выявлены и исследованы интересные с наблюдательной точки зрения эффекты: масштабное усиление сгущения темной материи и появление аномального смещения между плотностями барионов и темной материи. Качественно изучено поведение спектра мощности в предложенной модели.

Пятая глава посвящена детальному изучению модели, предложенной в четвертой главе. Описанные выше эффекты были изучены численно в рамках модифицированного больцмановского кода «CLASS». Помимо этого, также проиллюстрированы космологические эффекты нарушения лоренцевой симметрии в гравитации: появление анизотропного натяжения эфира и усиление роста гравитационной неустойчивости за счет перешкалировки гравитационной постоянной. Эти эффекты ограничены путем сравнения предсказаний модели с данными спутника «Планк» по реликтовому микроволновому излучению и обзора галактик «ВигглЗ». В результате этого сравнения были получены новые ограничения на параметры нарушения лоренцевой симметрии в гравитации и впервые получены ограничения на нарушение лоренцевой симметрии в темной материи.

Шестая глава диссертации посвящена развитию нового теоретического аппарата для описания формирования крупномасштабной структуры

Вселенной в слабо-нелинейном режиме. Автором был предложен новый подход, названный «теория возмущений на временных расслоениях». Данный подход основан на изучении зависящей от времени функции распределения космологических полей, позволяющей вычислить их корреляционные функции на фиксированных красных смещениях. Показано, что в новом подходе отсутствуют нефизические инфракрасные расходимости, которые присутствуют в петурбативном разложении стандартной теории возмущений. Обсуждена связь этого свойства с принципом эквивалентности.

В седьмой главе метод ТВВР применен для описания нелинейной эволюции сахаровских осцилляций. Форма этих осцилляций в корреляционной функции темной материи существенно искажается нелинейным взаимодействием с крупномасштабными потоками, которые не могут быть адекватно описаны стандартными методами. В рамках ТВВР автором сформулированы правила подсчета степеней, позволяющие выделить усиленные вклады в петлевом разложении и пересуммировать их. Таким образом удалось описать форму пика сахаровских осцилляций в двухточечной корреляционной функции плотности темной материи с точностью в несколько процентов. Вычислен также нелинейный сдвиг положения пика, который может представлять интерес для устранения систематики глубоких обзоров неба ближайшего будущего.

Все полученные результаты являются новыми и представляют большой интерес для исследования гравитации, инфляции и темной материи. Результаты разделов о формировании структур в слабо-нелинейном режиме могут найти непосредственное применение при анализе наблюдательных данных в космологии.

Остановимся на нескольких замечаниях к содержанию диссертации:

1. В ряде мест встречаются опечатки и неточности.

Так, например, в начале главы 6 уравнение Лиувилля отнесено к «статистической механике», хотя традиционно это уравнение в Гамильтоновой динамике описывает сохранение фазового объема. В сноске на странице 92 при обсуждении средних упоминается эргодическая теорема, хотя в обсуждаемом контексте эргодичность лишь гипотеза. На мой взгляд использование термина «идеальная жидкость» для холодного бездиссипативного газа также не вполне корректно. Отметим, что понятие «слабо — нелинейный режим» обычно используется в другом контексте — имеются линейные волны и между ними происходит взаимодействие, причем параметр взаимодействия мал.

2. В рассматриваемом диссертантом случае такого малого параметра нет. В качестве малости выступает амплитуда «начальных» возмущений. Это

означает, что разложение существует конечное время. Заметим также, что используемая автором нелинейная система гидродинамических уравнений существует конечное время — после некоторого момента t_0 возникает особенность и течение становится многопоточным, количество потоков растет со временем. Поэтому для дальнейшего описания необходимо рассматривать кинетическое уравнение и изучать эволюцию функции распределения, сшивая решение с областями пространства, где еще справедлива гидродинамика.

Вышеприведенные замечания, однако, не снижают ценности работы автора. Полученные в диссертации результаты хорошо обоснованы и изложены в семи публикациях в российских и зарубежных рецензируемых журналах и одной публикации в трудах конференции. Результаты докладывались на российских и международных конференциях, а также на научных семинарах в ряде институтов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а сам автор, Иванов Михаил Михайлович, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент
Российской академии наук,
главный научный сотрудник
ОТФ ФИАН им.П.Н. Лебедева
e-mail: zybin@lpi.ru

20.11.2017

Зыбин Кирилл Петрович

ОТФ ФИАН им. П.Н. Лебедева - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма, тел. +7 (499) 132-62-03.

Подпись К.П. Зыбина удостоверяю:

ученый секретарь ФИАН

к.ф. - м. н. Колобов А.В.

Зыбин Кирилл Петрович

доктор физико-математических наук (специальность 01.04.02 - теоретическая физика), 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

Список основных публикаций за последние 5 лет:

1. Il'yn A. S., Sirota V. A., Zybin, K. P., Passive scalar transport by a non-Gaussian turbulent flow in the Batchelor regime, *Physical Review E*, Vol. 96, id. 013117 (2017)
2. Il'yn A. S., Sirota V. A., Zybin, K. P., Infinite Products of Random Isotropically Distributed Matrices, *Journal of Statistical Physics*, Vol. 166, p. 24-38 (2017)
3. Il'yn A. S., Sirota V. A., Zybin, K. P., Statistical properties of the T-Exponential of isotropically distributed random matrices, *Journal of Statistical Physics*, Vol. 163, p. 765-783 (2016)
4. К.П. Зыбин, А.С. Ильин, Свойства турбулентности, возникающей под воздействием внешней случайной силы в модели Бюргерса, *УФН* 186, 1349–1353 (2016)
5. Il'yn A. S., Zybin, K. P., Material deformation tensor in time-reversal symmetry breaking turbulence, *Physics Letters A*, Vol. 379, No 7, p. 650-653 (2015)
6. Зыбин К.П., Сирота В.А., "Модель вытягивающихся вихрей и обоснование статистических свойств турбулентности", *УФН* 185, 593–612 (2015)
7. Gurevich A. V., Ptitsyn M. O., Ryabov V. A., Zybin K. P., Comment on "Decrease of atmospheric neutron counts observed during thunderstorms", *Physical Review Letters*, vol. 115, No 17. id. 179501 (2015)
8. Sirota V. A., Zybin, K. P., Cylindric filaments and velocity structure functions, *Physica Scripta*, Vol. 2013, No T155, id. 014005 (2013)
9. Zybin K.P., Sirota V.A., Multifractal structure of fully developed turbulence, *Physical Review E*, vol. 88, id. 043017 (2013)
10. Gurevich A.V. et al., Correlation of Radio and Gamma Emissions in Lightning Initiation, *Physical Review Letters*, vol. 111, id. 165001 (2013)