

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Асташенка Артема Валерьевича на диссертационную работу Тимошкина Александра Васильевича «Космологические модели Вселенной с обобщенной жидкостью», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Объяснение ускоренного расширения Вселенной, открытого в 1998 году, может считаться одной из фундаментальных задач теоретической физики и космологии на сегодняшний день. Существует несколько путей решения данной проблемы. В первую очередь здесь можно упомянуть поиски так называемой темной энергии, обладающей отрицательным давлением, которая могла бы быть ответственной за возникновение космического ускорения. Некоторые виды темной энергии приводят к появлению космологических сингулярностей новых типов, изучение которых представляет немалый интерес. Другими подходами к объяснению космического ускорения являются бранные модели и теории модифицированной гравитации. В связи с изложенными соображениями диссертация А.В. Тимошкина, посвященная различным моделям ускоренного расширения Вселенной с обобщенной космологической жидкостью, представляется интересной. Актуальность исследования особенно связана с тем, что автор последовательно учитывает эффект вязкости для космологической жидкости. Исследование космологических моделей с вязкостью, описывающих ускоренное расширение Вселенной, началось сравнительно недавно, и статьи автора по этой теме являются одними из основополагающих работ.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 207 страниц, библиография включает 201 источник.

Во введении представлены основные задачи работы, обоснована ее актуальность, кратко изложены полученные результаты, раскрыта их новизна и теоретическая значимость. Основной темой исследования в работе являются модели темной энергии с необычным уравнением состояния космологической жидкости, имеющей отрицательное давление и отрицательную энтропию. В качестве основных задач диссертационной работы следует выделить: 1) построение моделей Вселенной с линейным и нелинейным неоднородным уравнением состояния для темной энергии, которые реализуют различные сценарии космологической эволюции; 2)

исследование моделей темной энергии на бране; 3) изучение моделей темной энергии с учетом вязкости турбулентности «космологической жидкости»; 4) исследование моделей вязкой космологической жидкости в инфляционной Вселенной.

В первой главе диссертации рассмотрены модели темной энергии, задаваемые с помощью уравнения состояния. В начале исследуется модель Вселенной, в которой темная энергия описывается уравнением состояния с линейно зависящими от времени или осциллирующими параметрами. В случае линейного неоднородного члена в уравнении состояния можно получить решения с фазой ускоренного расширения в течение конечного промежутка времени. Для периодического изменения параметра во времени Вселенная осциллирует между фантомной и нефантомной эпохами. Далее рассмотрены модели Вселенной с так называемым «малым» и «мнимым» разрывами, когда параметр уравнения состояния меньше  $-1$ , но асимптотически стремится к этому значению так, что сингулярность большого разрыва не возникает. Параметр Хаббла задается как функция времени. В случае мнимого разрыва параметр Хаббла стремится в будущем к постоянной. Иной формализм, когда плотность темной энергии задается как функция масштабного фактора, также рассмотрен. Квази-разрыв, как показано в диссертации, может быть интерпретирован как эффект, вызванный объемной вязкостью космологической жидкости. Аналогично рассмотрены модели темной энергии и для космологии на бране Рэндалл-Сандрум. Особый интерес представляют модели с турбулентностью космологической жидкости (раздел 1.6).

Вторая глава диссертации посвящена исследованию космологических моделей темной энергии с учетом возможного взаимодействия темной энергии с темной материей. В разделе 2.1 предложена интересная модель, в которой взаимодействие приводит к сингулярности Большого разрыва. Удалось построить также космологические решения, в которых расширение Вселенной асимптотически останавливается. Далее рассмотрены модели с Малым и Мнимым разрывом: параметр Хаббла задается изначально как функция времени, то же делается для функции, описывающей взаимодействие темной энергии и темной материи. Параметр уравнения состояния для темной энергии и материи определяется далее из решения космологических уравнений. Затем рассматриваются модели с отскоком, в которых происходит смена режимов эволюции Вселенной, от ускоренного расширения к ускоренному сжатию без появления сингулярностей.

Последовательно рассмотрены случаи, когда временная динамика масштабного фактора задается в экспоненциальной, степенной, двойная экспоненциальной форме, полученные решения исследованы на стабильность. Показано, что существует точка аттрактора. В разделе 2.4 произведен учет вязкости для космологических моделей неоднородной темной энергии. Рассмотрен как простейший случай с постоянной вязкостью, так и случаи с вязкостью, пропорциональной хаббловскому параметру и зависящей от времени и плотности энергии. Далее рассмотрен случай вязкой жидкости со взаимодействием с темной материей. Использование различных зависимостей параметра уравнения состояния  $w(\rho)$  и включение объемной вязкости позволило построить космологические решения с Малым и Мнимым разрывом и космологию с отскоком. Интерес представляет собой последний раздел главы, где рассмотрены космологические модели с диссипацией энергии. Диссипацию энергии естественно описывать с помощью введения объемной вязкости. Уравнение состояния для темной энергии представлено в виде ряда по степеням параметра Хаббла (от первой до четвертой) с четырьмя термодинамическими параметрами, являющимися функциями времени. Эти параметры могут быть выбраны различным образом, что приводит к различным сценариям космологической эволюции, включая отскок.

Проблема описания космологической инфляции с учетом вязкости рассмотрена подробно в третьей главе диссертации. В разделе 3.1 удалось построить модели, которые могут быть согласованы с данными наблюдений миссии Planck. В одной из этих моделей вязкость космологической жидкости пропорциональна квадрату параметра Хаббла, а параметр состояния положен постоянным. Другая модель предполагает, что есть взаимодействие между жидкостями (функция, описывающая скорость изменения плотности жидкости, пропорциональна квадрату параметра Хаббла). В следующем разделе исследованы космологические модели, приводящие к «мягкой» сингулярности. Далее автор предлагает модели инфляционной Вселенной без самовоспроизведения. Ключевую роль играет именно диссипация плотности энергии из-за учета вязкости космологической жидкости. Сформулированы условия для параметров уравнения состояния для реализации такого инфляционного режима. Сравнение предложенных моделей с данными наблюдений показывает, что они вполне реалистичны. Наконец, в заключительных разделах описана модель инфляционной вселенной с сингулярностью мягкого типа и вселенной, заполненной вязкой жидкостью с уравнением состояния типа

Ван-дер-Ваальса. Показано, что вязкость необходима для согласования модели с данными по основным инфляционным параметрам  $n_s$  и  $r$ .

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Диссертация А.В. Тимошкина не свободна и от некоторых недостатков:

1) Некоторые фразы звучат непривычно с точки зрения русского языка, по-видимому, это связано с не очень удачным переводом англоязычных терминов из публикаций в зарубежных журналах. Например, на странице 83 читаем: «Вселенная приближается асимптотически к пространству де Ситтера». Следует писать, что «динамика Вселенной асимптотически приближается к режиму де Ситтера». Или на странице 154: «обобщенная жидкость может использоваться в моделировании эры инфляции». Лучше было написать, что «модели обобщенной жидкости могут использоваться в моделировании эры инфляции».

2) Имеет место некоторая избыточность изложения. Например, в первой главе автор рассматривает модели с мнимым и малым разрывом, приводит ссылки на литературу и объясняет, в чем состоит особенность данных моделей. Далее, во второй главе рассматриваются более сложные модели с малым и мнимым разрывом, но при этом фактически повторяется информация об их характерных свойствах, данная ранее. То же касается и моделей с отскоком во 2-й главе: краткие сведения о них уже даны в первой главе, повторять эту информацию не следовало. Несколько раз в тексте диссертации повторяются одни и те же системы уравнений (например, система 2.141 в том или ином виде), поясняются одни и те же обозначения (гравитационная постоянная, параметр Хаббла, скорость света и т.п.).

3) Результаты, полученные в диссертационной работе, можно было бы объединить, чтобы их количество не было столь большим (15 пунктов).

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы А.В. Тимошкина. Результаты диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, их обоснованность, достоверность и новизна сомнений не вызывает. Мне показались особенно интересными модели, рассмотренные в третьей главе диссертационной работы. Сравнение с данными наблюдений некоторых моделей показывают важную роль вязкости космологической жидкости. Этот аргумент может говорить в пользу того, что эффект вязкости

необходимо учитывать. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Считаю, что диссертация А.В. Тимошкина «Космологические модели Вселенной с обобщенной жидкостью» удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 28 августа 2017 г.), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук  
(01.04.02 – теоретическая физика),  
профессор Института физико-  
математических наук и информационных  
технологий Балтийского федерального  
университета имени Иммануила Канта

Асташенок Артем Валерьевич

10.07.2018

Подпись доктора физико-математических наук А.В. Асташенка заверяю

Ученый секретарь  
Балтийского федерального университета  
имени Иммануила Канта  
кандидат географических наук



Зверев Юрий Михайлович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Почтовый адрес: 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14

Тел.:(4012) 59-55-00, e-mail: [post@kantiana.ru](mailto:post@kantiana.ru), <https://www.kantiana.ru>