

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной деятельности  
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)  
федеральный университет»,  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор



Д. К. Нурғалиев

« 10 » октября 2018 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации  
**Тимошкина Александра Васильевича**  
**«Космологические модели Вселенной с обобщенной жидкостью»,**  
представленной на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 - Теоретическая физика

Диссертационная работа Тимошкина Александра Васильевича «Космологические модели Вселенной с обобщенной жидкостью» посвящена исследованию космологических моделей ранней и поздней Вселенной с помощью обобщенного уравнения состояния темной жидкости.

#### Актуальность темы

Одна из основных задач теоретической физики на сегодняшний день состоит в объяснении физического происхождения космического ускорения Вселенной, открытого в 1998 году с помощью данных астрономических наблюдений, полученных независимо в лабораториях А. Рисса и С. Перлмуттера. Эту проблему можно решить несколькими способами. С одной стороны, существует подход, согласно которому причиной возникновения космического ускорения является идеальная жидкость (темная энергия), которая слабо взаимодействует с обычной материей и имеет необычное уравнение состояния. Давление такой жидкости является отрицательным. Различные формы уравнения состояния для темной жидкости могут привести к возникновению космологических сингулярностей разных типов, исследование которых является важным. Представляет интерес также изучение природы темной энергии, взаимодействующей с темной

материей относительно ускорения и космического расширения Вселенной. С другой стороны, объяснение космического ускорения можно получить в рамках бранных моделей и теории модифицированной гравитации. Поэтому исследования в диссертации, посвященные моделям ускоренного расширения Вселенной с обобщенной космологической жидкостью, представляются актуальными. Описание космологической эволюции включает в себя также описание периода раннего по времени ускорения Вселенной после Большого взрыва, называемого инфляцией. Свойство ускоренного расширения является общим, как для инфляционной, так и для поздней Вселенной. Поэтому эпоху инфляции можно также описать в терминах космической жидкости с отрицательным давлением, удовлетворяющей обобщенному уравнению состояния. Новым элементом в этом анализе является принятие двухкомпонентной модели в инфляционный период. В диссертации последовательно рассматривается свойство вязкости космической жидкости. Условия существования инфляционной Вселенной, описываемой вязкой космической жидкостью, одновременно препятствуют самовоспроизведению инфляции. Несмотря на то, что в инфляционный период вязкость пренебрежимо мала, тем не менее, представляет интерес изучение ее влияния на параметры инфляции. Важно отметить, что изучение космологических моделей Вселенной с учетом вязкости, описывающих ускоренное расширение Вселенной, начали проводиться сравнительно недавно, поэтому эта тема исследования также является актуальной.

### **Общая характеристика структуры и содержания диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 201 источника. Она основана на материале 32 научных статей, из которых 30 опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы диссертации и дан анализ степени ее разработанности. Определены цели исследования и методы их достижения. Описана научная новизна полученных результатов, степень их достоверности, теоретическая и практическая значимость. Приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 диссертации посвящена изучению моделей темной энергии, заданных уравнением состояния общего вида. Исследуются модели поздней Вселенной с линейным неоднородным уравнением состояния, в которых параметры в уравнении состояния темной энергии имеют линейную или

осциллирующую зависимость от времени. Для неоднородного члена, заданного в линейной форме, возможны решения гравитационного уравнения движения с фазой ускоренного расширения за короткий промежуток времени. Для случая периодического изменения по времени параметра в уравнении состояния построена модель квазипериодической Вселенной, которая осциллирует между фантомной и не фантомной эрами. Изучаются космологические модели типа Малый разрыв и Мнимый разрыв с зависящим от времени уравнением состояния. В обеих моделях параметр Хаббла задается как экспоненциальная функция времени. В случае Мнимого разрыва параметр Хаббла стремится в будущем к космологической постоянной. Показано, что не сингулярные космологии типа Малый разрыв и Мнимый разрыв можно описать в терминах космологической постоянной  $\Lambda$  или термодинамическим параметра  $\omega$ . Рассматривается космологический сценарий с Квази-разрывом. В этом случае применяется формализм, когда плотность темной энергии задается как функция масштабного фактора. В отличие от моделей типа Большой разрыв, Малый разрыв и Мнимый разрыв, в модели типа Квази-разрыв Вселенная имеет возможность восстановиться после разрыва. Сделан вывод о том, что такой тип космологии может быть интерпретирован как эффект, вызванный объемной вязкостью космологической жидкости. Исследуются модели темной энергии и для космологии на бране. Особый интерес представляют модели с турбулентностью космологической жидкости. Рассматриваются как однокомпонентные, так и двухкомпонентные модели с неоднородной темной жидкостью. Получены условия возникновения Вселенной с турбулентной темной энергией в терминах параметров уравнения состояния. Показано, что двухкомпонентную модель жидкости, в которой система обладает турбулентными свойствами и модель однокомпонентной жидкости можно трактовать как неоднородную жидкость в рамках 4d космологии Фридмана-Робертсона-Уокера.

Глава 2 диссертации посвящена исследованию космологических моделей темной энергии с учетом взаимодействия с темной материей. Изучается природа взаимодействия темной энергии с темной материей относительно ускоренного космического расширения. Построена модель осциллирующей Вселенной в присутствии взаимодействия между темной энергией и темной материей в специальной форме в уравнении состояния, приводящая к появлению сингулярностей типа Большой разрыв. Изучены космологические модели типа Малый разрыв и Мнимый разрыв. Рассмотрены космологические модели с отскоком, в которых масштабный

фактор описан как в экспоненциальной, так и в степенной форме. В этих моделях происходит смена режимов эволюции Вселенной, от ускоренного расширения к ускоренному сжатию без появления сингулярностей. Далее, изучались различные космологические модели с вязкостью: случай с постоянной вязкостью, случаи с вязкостью, пропорциональной параметру Хаббла и зависящей от времени. Показано, что взаимодействие между компонентами темной энергии и темной материи влияет в будущем на возникновение различных типов сингулярностей. Исследованы космологические модели типа Малый разрыв, Мнимый разрыв и космологическая модель с отскоком для случая вязкой жидкости. Показано, что эти модели могут быть связаны друг с другом через понятие объемной вязкости. Доказано, что присутствие темной материи может привести к изменению сингулярного поведения параметра Хаббла. В последнем разделе главы рассмотрены космологические модели с диссипацией энергии. В модели энтропийной космологии диссипативные свойства Вселенной выражены через термодинамические параметры уравнения состояния. Уравнение состояния для темной энергии представлено в виде ряда по степеням параметра Хаббла до четвертого порядка включительно с четырьмя термодинамическими параметрами, являющимися функциями времени. Получено представление через термодинамические параметры космологических моделей типа Малый разрыв, Мнимый разрыв и космологической модели с отскоком.

В главе 3 рассматривается описание инфляционной стадии эволюции Вселенной с учетом вязкости. Исследованы космологические модели со связанными жидкостями: энергией и материей, в плоском пространстве-времени Фридмана-Робертсона-Уокера в «горячем» сценарии Вселенной. Изучено влияние взаимодействия между энергией и материей на эволюцию ранней Вселенной. Вычислены основные параметры инфляции для масштабного фактора, заданного в степенной форме, форме де Ситтера, обобщенной экспоненциальной и показательно-экспоненциальной формах. Исследованы различные феноменологические уравнения состояния, приводящие к космологической эволюции IV типа. Изучены модели инфляции, позволяющие избежать проблемы самовоспроизведения в очень ранней Вселенной. Обсуждались случаи, когда параметр Хаббла изменяется линейно, квадратично и экспоненциально, как функция параметра  $N$ . Для всех моделей проанализированы соответствующие условия, приводящие к инфляции без самовоспроизведения. В следующем разделе исследованы

космологические модели, приводящие к «мягкой» сингулярности. Изучаются различные формы параметра Хаббла, которые могут воспроизвести эволюцию инфляционной Вселенной в присутствии сингулярности этого типа. Исследовано инфляционное расширение ранней Вселенной в терминах уравнения Ван дер Ваальса с учетом вязкости. Получены решения гравитационного уравнения движения в форме масштабного фактора как функции плотности энергии. Показано, что учитывая свойство вязкости жидкости в модели Ван дер Ваальса, можно достичь согласия с результатами наблюдений миссии Планка.

### **Достоверность и обоснованность результатов работы**

Все представленные в диссертационной работе научные положения и выводы полностью обоснованы. Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обусловлена правильностью выбранных космологических моделей. Она подтверждается строгостью проведенных математических расчетов и взаимосвязью полученных в диссертации результатов с известными результатами из процитированных источников, а также совпадением в отдельных частных случаях с результатами других авторов.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертации и использование полученных результатов**

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование в теоретической космологии. Основные результаты, представленные в диссертации, являются новыми, получены автором лично, как в индивидуальных, так и в коллективных исследованиях. Они опубликованы в ведущих международных и отечественных журналах и представляют интерес для данного направления исследований теоретической физики. Количество публикаций автора и конференций, на которых докладывались научные результаты, свидетельствуют о достаточной апробации работы. Теоретические результаты представляют интерес с точки зрения более подробного описания Вселенной на ранней и поздней стадиях эволюции в известных космологических моделях. Их можно рекомендовать для использования в научных организациях, в которых проводятся исследования по космологии, теории гравитации и теоретической физике.

### Замечания по диссертационной работе

В диссертации были замечены следующие недостатки:

1. Обращаем внимание на лингвистические проблемы в тексте диссертации. Например, в работе часто употребляется термин «космологическая постоянная, зависящая от времени». Это жаргон, которого следует избегать, ибо постоянная не может зависеть от времени, такова уж участь постоянных величин. Из тех же соображений термин «параметр Хаббла» следовало бы заменить повсеместно на функцию Хаббла, ибо эта величина также зависит от времени.

2. Также неудачным мы считаем термин «гравитационные уравнения движения для плотности энергии». Термин «уравнения движения» чего бы то ни было лингвистически предполагает существование соответствующей скорости движения, а её нет в этих уравнениях. Конечно, более уместным был бы, например, термин «уравнения эволюции...».

3. Статус «космологической постоянной, зависящей от времени», следует обсудить не только с лингвистической, но и с математической точек зрения. Действительно, стандартный вариационный формализм позволяет ввести в уравнения Эйнштейна только истинную константу  $\Lambda$ . Если космологическая константа не есть постоянная, то вариационный формализм требует считать эту величину скалярным полем, ввести дополнительные слагаемые с соответствующими производными в лагранжиан, проварьировать по этому скалярному полю и получить дополнительное уравнение её эволюции. Такое уравнение естественным образом ограничило бы размах спекуляций на тему «как выбрать космологическую постоянную» – в виде линейной функции, экспоненты и т.д. Автор идет другим путем: величина  $\Lambda(t)$  вводится как аддитивный элемент в уравнение состояния, связывающее давление и плотность энергии. Так делается в феноменологической теории ядерных сил, где появляется «константа мешка», вполне допустимо считать эту величину «функцией мешка», но возникает естественный вопрос: причем здесь прилагательное «космологическая»? Не исключено, что переформатирование уравнений гравитационного поля, перенос некоторых слагаемых в правую часть этих уравнений все же позволяет использовать термин «космологическая» к функции  $\Lambda(t)$  или точнее к некой комбинации  $\Lambda(t)$  и её производной, однако, это следовало бы обсудить специально и расставить все точки над «i» в этом вопросе.

4. Термодинамический параметр  $\omega(t)$  введен в уравнение состояния феноменологическим путем как коэффициент пропорциональности между давлением и плотностью энергии. Такой подход логичен, если речь идет о константе пропорциональности, однако, для функций, вводящих

коэффициент пропорциональности необходимо обсудить тензорный статус этой функции. Этот вопрос возникнет, если, например, от так называемого T-представления космологической модели, в которой все величины зависят только от времени, мы захотим перейти в R- представление, в котором появится радиальная переменная.

Следует отметить, что указанные недостатки не влияют на общую высокую оценку работы.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

### Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертационная работа Тимошкина Александра Васильевича «Космологические модели Вселенной с обобщенной жидкостью» соответствует требованиям действующего Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика, а ее автор, Тимошкин Александр Васильевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук (01.04.02 – Теоретическая физика), профессором кафедры теории относительности и гравитации Института физики КФУ Александром Борисовичем Балакиным.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры теории относительности и гравитации института физики КФУ, протокол № 6 от 21 сентября 2018 г.

Заведующий кафедрой  
теории относительности и гравитации  
Института физики КФУ,  
доктор физико-математических наук,  
доцент



Сергей Владимирович Сушков

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ), 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; Тел: (843) 233-71-09, <http://kpfu.ru>; E-mail: [public.mail@kpfu.ru](mailto:public.mail@kpfu.ru)

Подпись Сушкова С.В. Верна  
Спец. по УМР / Шайкутдинова Р.И.

