

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
АААА-А20-120012990075-8

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК
524.8 Вселенная. Метагалактика. Космология

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Космология, гравитация, внегалактическая астрономия
по теме:

Современная космология и теория релятивистского гравитационного поля
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Сажин М.В.

«__» _____ Г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

главный научный сотрудник,
доктор физико-математических наук, профессор по специальности

_____ (Сажин М.В.)

Исполнители темы:

ведущий специалист

_____ (Авдеев Н.А.)

ведущий научный сотрудник,
доктор физико-математических наук, кандидат физико-математических наук

_____ (Алексеев С.О.)

научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Власов И.Ю.)

научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

_____ (Дядина П.И.)

ведущий научный сотрудник,
доктор физико-математических наук

_____ (Петров А.Н.)

ведущий специалист

_____ (Прокопов В.А.)

заведующий отделом, кандидат физико-математических наук,
доктор физико-математических наук

_____ (Пширков М.С.)

ведущий научный сотрудник,
доктор физико-математических наук

_____ (Сажина О.С.)

старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

_____ (Топоренский А.В.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

гравитация $f(r)$, гравитация лавлока, телепараллельные теории гравитации, гравитационные волны, гравитация бранса-дикке и гаусса-бонне, модель рандал-сандрум, гравитационные линзы, международная небесная система координат, космология, структура пространства-времени, космические струны, черные дыры, релятивистские наблюдаемые величины, ото

Ключевые слова по-английски:

$f(r)$ -gravitation, teleparallel gravitation, lavlock gravitation, brans-dicke and gauss-bonnet gravitation, space-time structure, general relativity, cosmic strings, cosmology, gravitational lenses, randall-sundrum model, gravitational waves, international celestial reference frame, relativistic observable values, black holes

Объектом исследований являются Вселенная в целом, ее динамика и эволюция, а также релятивистские объекты во Вселенной.

Цель работы - теоретические исследования и поиск наблюдательных эффектов в космологии и общей теории относительности, включая расширения общей теории относительности. Разработка новых, постэйнштейновских теорий релятивистской гравитации. Изучение релятивистских объектов в нашей Вселенной, включая источники гравитационных волн, быстрых радио всплесков и космических лучей сверхвысоких энергий. Теоретические и наблюдательные исследования экзотических космических объектов (космические струны, кротовые норы). Проводятся теоретические исследования моделей будущих высокоточных экспериментов с целью проверки общей теории относительности и поиска новой физики.

Список используемых сокращений

АЯГ - активные галактические ядра

БРЭ - Большая Российская Энциклопедия

ГЛОНАСС - глобальная навигационная спутниковая система

ГэВ - Гигаэлектронвольты

КЛСВЭ - космические лучи сверхвысоких энергий

КН - кротовая нора

кэВ - килоэлектронвольты

МГУ - Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова

МэВ - Мегаэлектронвольты

ОТО - общая теория относительности

ППН - параметризованный постньютоновский формализм

Супер-ЭВМ - высокопроизводительная электронно-вычислительная машина

ЧД - черная дыра

эВ - электронвольт

ART-XC - телескоп им. М.Н. Павлинского (Astronomical Roentgen Telescope X-ray Concentrator)

AT2019wey - оптический транзиент обнаруженный в обзоре в 2019 году

CSc-1 кандидат в космическую струну

DHOST, Degenerate Higher-Order Scalar-Tensor theories

ЕНТ - телескоп горизонта событий

Fermi-LAT - рентгеновский спутник
FRB - быстрые радио всплески
GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment - два идентичных космических аппарата на низкой околоземной орбите
GRACE-FO - Gravity Recovery and Climate Experiment Follow On - повторение эксперимента GRACE на более высоком уровне точности
GW170817 - источник гравитационных волн с номером 170817
HCT - Himalayan Chandra Telescope - 2 м Гималайский телескоп Чандра, Индия
INTEGRAL - рентгеновский спутник
LIGO - детектор гравитационных волн
M87 - центральной галактики в скоплении Девы
NICER - Neutron Star Interior Composition Explorer Mission
NuSTAR - Nuclear Spectroscopic Telescope Array
Planck - космический аппарат европейского космического агентства для наблюдения анизотропии реликтового излучения
PWNe - пульсарного ветра
SDSSJ110429 Soan Digital Sky Survey
Sgr A* источник в центре нашей Галактики
SRG - обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма»
SRGA J043520.9+552226
RC600 - телескоп на северокавказской горной обсерватории
TEGR - телепараллельный эквивалент общей теории относительности
VIRGO - детектор гравитационных волн
WMAP - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

ВВЕДЕНИЕ

Современная космология и теория релятивистского гравитационного поля – это одни из наиболее актуальных тем современной астрофизики и фундаментальной физики. За последние годы были совершены прорывные открытия в космологии и релятивистской гравитации. За последние десятилетия в области космологии и общей теории относительности было сделано несколько фундаментальных открытий, которые явились вызовом современной астрономии и физике. Астрономы открыли темную материю в нашей Галактике, ускоренное расширение Вселенной, которое, вероятно, вызвано принципиально новым типом материи – темной энергией. Пять лет назад были открыты гравитационные волны в диапазоне частот примерно 100 Гц, предсказанные общей теорией относительности. Год назад международная группа ученых объявила о возможном открытии гравитационных волн в наногерцовом диапазоне частот. В связи с этим работы над проблемами современной космологии и теории релятивистского гравитационного поля представляются очень важными и своевременными.

Недавние открытия высокоэнергичных нейтрино и их связи с активными галактиками показали также, что для исследования современных проблем космологии и релятивистской гравитации важны исследования во всех каналах получения физической информации, включая как электромагнитный канал, канал изучения космических частиц, а также гравитационных волн.

Исследования в области релятивистской гравитации становятся актуальными и в прикладных исследованиях, и в высокоточных исследованиях гравитационного поля Земли и Луны. Начиная с точностей связанных с измерениями сотой гармоники гравитационного поля Земли необходимо проводить редукцию за релятивистские поправки первого порядка. Второй порядок релятивистских поправок станет необходимым учитывать при приближении к двухсотой гармоники гравитационного поля Земли.

В рамках космологических исследований был продолжен поиск космических струн в наблюдательных данных космических обсерваторий WMAP, Planck, а также в данных оптических наблюдений. На основе работ нашей группы, проведенной в предыдущие годы, был выбран наилучший кандидат в космическую струну, найденный методом анализа анизотропии реликтового излучения. Вдоль этого кандидата было выбраны поля, в которых искались кандидаты в гравитационные линзы, которые могут быть генерированы космической струной. Был проанализирован большой объем оптических данных проекта SDSS и найдены кандидаты в гравитационные линзы вдоль предполагаемого расположения космической струны. Была расширена теоретическая модель гравитационного линзирования на космической струне путем рассмотрения струны общего положения. Результаты сравнения моделирования с наблюдениями показали перспективы таких моделей. Кроме того, была исследована возможность детектирования гравитационных волн от кандидата в космическую струну.

Исследовались быстрые радиовсплески (FRBs), которые могут быть связаны с возможными проявлениями «новой физики», т. е. физики, выходящей за рамки Стандартной модели физики элементарных частиц. Одним из наиболее хорошо разработанных кандидатов являются сгустки, состоящие из аксионов – гипотетических частиц, возникающих в расширении Стандартной модели. Одна из наиболее интригующих нерешенных проблем

современной астрофизики – происхождение и природа космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) ($E > 10^{18}$ эВ). Продолжались исследования космических лучей сверхвысоких энергий.

В рамках работ теоретической направленности по уточнению оценки вклада постэйнштейновской части обобщенного действия теории гравитации ($f(R)$ -гравитация), изучались решения типа «черная дыра». В том числе, для моделей с некомпактными дополнительными измерениями, поправками высших порядков по кривизне, а также телепараллельной гравитации. Исследовались решения типа «черная дыра» постоянной кривизны в многомерной теории Эйнштейна. В частности были рассчитаны идущие из эффекта нелокальности в квантовой гравитации поправки во взаимодействиях элементарных частиц на Большом адронном коллайдере, что позволяет проследить еще одну теоретическую связь между физикой высоких энергий и современными теориями гравитации. Были рассмотрены предсказания модели $f(R)$ -гравитации, которые содержат исчезающую космологическую постоянную (модель Старобинского), на масштабах, характерных для галактик и скоплений галактик. Кроме того, изучены физические свойства черных дыр постоянной кривизны в многомерной гравитации Эйнштейна-анти-де Ситтера.

Проводились работы прикладного значения для космической геодезии. В частности, изучались релятивистские редукции измерения расстояния между спутниками на орбите вокруг Земли на уровне точности пикометры.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Пункт 1.1. Поиск экзотических космических объектов (космических струн, кротовых нор) в наблюдательных данных космических миссий WMAP, Planck, а также в данных оптических наблюдений. Разработка теории космических струн, разработка теории для поиска наблюдательных проявлений кротовых нор. Предсказания гравитационно-волновых проявлений космических струн и кротовых нор

Активно продолжены работы по направлению исследования космических струн. Расширена и обобщена теория гравитационного линзирования далеких фоновых источников (протяженных галактик) на одиночной космической струне с учетом ее наклона относительно луча зрения. Также начаты теоретические работы по исследованию струны, имеющей изгиб в плоскости, перпендикулярной лучу зрения. Такие модели представляются более реалистичными по сравнению с рассмотренной ранее Сажиным М.В, Сажиной О.С. и др. прямой струной, расположенной перпендикулярно лучу зрения. Качественные выводы о наличии гравитационно-линзовых событий не изменились, однако были уточнены возможные структуры получающихся изображений. Таким образом, найден новый класс возможных конфигураций гравитационно-линзовых изображений, которые проверяются на имеющихся наблюдательных данных (найденных ранее, а также полученных за последний год в рамках коллаборации с индийскими коллегами). Так, на телескопе НСТ (наблюдения от 7.03.2022) были получены и обработаны наблюдательные данные пар галактик (спектрометрические, фотометрические). Наблюдалась наиболее яркая гравитационно-линзовая пара SDSSJ110429 в статистически значимой цепочке возможных гравитационно-линзовых изображений вдоль кандидата в космическую струну (кандидат в струну CSc-1, найденный ранее Сажиным М.В., Сажиной О.С. и др.). Значительная корреляция между спектрами двух компонентов указывает на возможную гравитационно-линзовую природу пары. Геометрия изображений статистически значимо моделируется наклонной струной: моделирование пары галактик SDSSJ110429 показало, что наблюдаемый угол между компонентами пары может быть объяснен, если струна сильно наклонена к линии визирования и, возможно, изогнута в тангенциальной плоскости. Результаты работы доложены на двух международных конференциях (2022), готовятся статьи, посвященные наблюдательной и теоретической частям.

Была исследована теоретическая структура пространства-времени вблизи кротовой норы и получены возможные наблюдательные следствия существования этих объектов. В связи с растущей точностью наблюдений и перспективностью нового гравитационно-волнового канала задача различения астрофизических проявлений ЧД и гипотетических КН приобретает актуальность. КН, наряду с ЧД, естественно возникают в рамках ОТО. Для наблюдательных поисков КН необходимо знание характерных траекторий тел в ее окрестности, в том числе траекторий, заходящих в ее горловину. Выведены уравнения движения пробной частицы в метрике КН, а также рассмотрены наиболее интересные свойства этих движений. Выведено общее уравнение геодезических в метрике КН и рассмотрены некоторые свойства этих геодезических. Проанализированы точное решение для круговых орбит пробных частиц вокруг КН, а также приближенное аналитическое

решение уравнений геодезических. Рассмотрено смещение перицентра орбиты пробной частицы в поле КН и обсуждаются возможные наблюдательные следствия. Представлены примеры траекторий пробных частиц у КН, полученные путем численного моделирования. Результаты опубликованы в статье: М.В. Сажин, О.С. Сажина, А.А. Шацкий «Геодезические в гравитационном поле кротовой норы» ЖЭТФ, 2022, том 161, вып. 6, стр. 1-12.

Пункт 1.2. Исследование в рамках работ по изучению ближней Вселенной и космологии ближней Вселенной

Телескоп ART-XC на борту обсерватории SRG в ходе обзора всего неба должен обнаружить новые рентгеновские источники, многие из которых могут быть транзиентными. В ходе поисков был обнаружен необычный рентгеновский источник SRGA J043520.9+552226. В дальнейшем были проведены многоволновые наблюдения этого источника. В оптическом диапазоне этот транзиент был детектирован как AT2019wey. Обнаруженный транзиент оказался доступным для наблюдений в других диапазонах на протяжении нескольких месяцев. Были использованы доступные публичные рентгеновские и оптические данные и наблюдения на телескопах SRG, INTEGRAL, NuSTAR, NICER, Swift и наземных телескопах для изучения спектральных энергетических распределений источника в различных фазах вспышки. На основе рентгеновских спектральных и временных характеристик, полученных из космических наблюдений, оптической спектроскопии и фотометрии, полученной на 2,5-м и RC600 телескопах Кавказской горной обсерватории Астрономического института имени Штернберга МГУ можно с высокой степенью уверенности утверждать, что источник является черной дырой в маломассивной тесной рентгеновской двойной системе. В работе был проведён поиск протяженного высокоэнергетического излучения вокруг M87 - центральной галактики в скоплении Девы. Галактика M87 содержит очень тяжелую сверхмассивную черную дыру, $M_{\text{BH}} > 4 \times 10^9 M_{\odot}$ и за последние 100 млн. лет переживает период повышенной активности, что привело к образованию протяженных лепестков, которые являются заметными радио- и рентгеновскими источниками. Был проведён поиск в данных Fermi-LAT за 13 лет в трех энергетических интервалах: 0.1-1, 1-10 и 10-100 ГэВ. Ни в одном из интервалов не было обнаружено статистически значимого протяженного излучения, со слабым признаком сигнала (2.5σ) в последнем интервале (10-100 ГэВ). Были использованы гамма-наблюдения, чтобы установить пределы на популяцию космических лучей в радиопузырях, ограничив их долю X по сравнению с тепловой энергией горячего газа. В зависимости от значения спектрального индекса, для электронов $X_e < (0.1-0.2)$, протоны ограничены на уровне $X_p < (0.2-0.5)$. Эти результаты подтверждают утверждение, что космические лучи являются субдоминирующим компонентом радиопузырей, в которых основная доля энергии сосредоточена в горячем газе. Результаты опубликованы в статье: Б. А. Низамов, М. С. Пширков, «Ограничения на популяцию космических лучей в радиогало галактики M87 по данным гамма-наблюдений», Письма в ЖЭТФ, 115:5 (2022), 281-286. Известно, что высокоэнергетическое излучение молодых туманностей пульсарного ветра (PWNe) является переменным. Наиболее ярким примером этого является Крабовидная туманность, поток которой может как быстро увеличиваться, так и уменьшаться. Два пульсара в Большом Магеллановом Облаке, PSR J0540-6919 и PSR J0537-6910, эволюционно очень близки к пульсару в Крабовидной туманности, поэтому можно ожидать та-

кой же изменчивости от PWNe вокруг них. Был проведён поиск переменности этих PWNe в гамма-лучах с использованием данных Fermi LAT в диапазоне 100 МэВ-10 ГэВ, собранные с августа 2008 по декабрь 2021 года. Были построены кривые блеска этих источников в трех диапазонах, 100-300 МэВ, 300-1000 МэВ и 1-10 ГэВ с временным разрешением в одну неделю. Были обнаружены свидетельства вспышечной активности во всех диапазонах, в отличие от Краба, где не наблюдалось вспышек при $E > 1$ ГэВ. Анализ вспышек в диапазонах 100-300 и 300-1000 МэВ показывает, что поток одного из PWNe мог вырасти в (5-10) раз. Сложно сказать, какая из двух PWNe вспыхнула из-за их близости на небе (0.3 градуса). Однако в диапазоне 1-10 ГэВ, где угловое разрешение LAT лучше, были обнаружены несколько эпизодов повышенной яркости в обеих PWNe. Результаты представлены в статье: Nizamov V. A., Pshirkov M. S., «Gamma-ray flares from pulsar wind nebulae in the Large Magellanic Cloud», eprint arXiv:2208.03820, на рецензии в Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Источник BL Lac демонстрировал повышенную активность с августа 2020 до июля 2022. Максимум этой активности пришелся на период июль-август 2021. В этот период источник достиг исторических максимумов яркости в различных энергетических диапазонах. Наблюдения, результаты которых представлены в данной работе, проводились сотрудниками ГАИШ на телескопах Крымской станции ГАИШ, а в период максимальной активности - в Кавказской горной обсерватории (КГО ГАИШ МГУ). Были получены данные фотометрических наблюдений в оптическом диапазоне и ближней инфракрасной области, а также поляризметрические данные в оптике. При исследовании корреляции оптического и гамма-излучения, оптического и ИК излучения подтвердилась её высокая степень с почти нулевым запаздыванием, что значит, что области излучения пространственно совпадают либо расположены очень близко друг от друга. Коэффициент линейной поляризации в исследуемый период менялся в широких пределах, достигая значения 20. Результаты представлены в статье: Л. С. Уголькова, М.С. Пширков, В.П. Горанский, Н.П. Иконникова, Б.С. Сафонов, А.М. Татарников, Е.В. Шимановская, М.А. Бурлак, М.Д. Афолина, «Исследование вспышечной активности BL Lac в период июль-ноябрь 2021г.», направлено в редакцию журнала «Письма в Астрономический журнал».

Линия аннигиляции позитронов на 511 кэВ - известный компонент гамма-фона. Считается, что она образуется в Галактике, но возможен и внегалактический вклад. Например, позитроны могут возникать в струях активных галактических ядер (АЯГ), а затем накапливаться в горячих газообразных гало вокруг галактик. Была проверена эта гипотеза в применении к отдельному объекту - галактике Андромеды (M31), которая находится близко и имеет сверхмассивную черную дыру в своем центре, которая ранее питала АЯГ. Была рассчитана история роста сверхмассивной черной дыры в M31, эволюция светимости джета и, окончательно, оценено содержание позитронов в ее гало. Для ожидаемого потока фотонов с энергией 511 кэВ из-за аннигиляции позитронов, который должен наблюдаться на Земле, была получена оценка на уровне 10-4 фотонов см⁻²с⁻¹. Это очень близко к пределам наблюдений (< 10-4 фотонов см⁻²с⁻¹), установленным INTEGRAL/SPI в предположении точечного источника, поэтому дальнейшие наблюдения смогут ограничить лептонные модели джетов и распространения космических лучей в окологалактической среде массивных спиральных галактик. Резуль-

таты представлены в статье: Nizamov B. A., Pshirkov M. S., «Can observations of 511 keV line from nearby galaxies shed light on the AGN jet composition?», направлено в редакцию журнала «Письма в Астрономический журнал».

Пункт 1.3. Изучение постэйнштейновской теории гравитации, изучение решений типа «черная дыра»

Существует ряд физических причин для изучения моделей с нелинейной реализацией конформной симметрии. Прежде всего, источником инфляции может быть поле или поля, появляющиеся в результате спонтанного нарушения конформной симметрии аналогично механизму Хиггса в теории калибровочных полей. Такой подход, в перспективе, указывает на интересную возможность получить единое описание как инфляционного расширения и тёмной энергии. В соответствии с теоремой Голдстоуна, при нарушении конформной симметрии появляются новые массивные и безмассовые степени свободы. Если конформная симметрия нарушена до группы Лоренца с размерностью десять, появляется возможность связать десять безмассовых голдстоуновских мод с десятью компонентами метрического тензора. Массивные компоненты, в свою очередь, станут источником инфляции, а их масса определит её масштаб. Поэтому актуален поиск моделей с нелинейной реализацией конформной симметрии, которые содержат скалярные степени свободы, и проверка возможности создать инфляцию.

В рамках этого направления ранее нами были рассмотрены несколько моделей с конкретными реализациями нелинейной конформной симметрии, предложенными ранее в работах Арбузова и Латоша. Первые результаты были получены в прошлом году и вошли в отчёт 2021 года. Далее, рассмотрение было расширено. Показано, что обсуждаемые модели могут стать реалистичными только после значительных модификаций, либо надо переходить к более сложному типу нелинейной реализации конформной симметрии.

Общий вывод нашего анализа состоял в том, что в рассматриваемом классе моделей нет стадии инфляции, по крайней мере, если не учитывать пространственные возмущения. Это происходит из-за того, что лагранжиан, возникший в результате спонтанного нарушения симметрии, содержит только производные скалярных полей. Отметим значимость результата в контексте моделей конформной гравитации. Теория с нелинейной реализацией конформной симметрии становится новым, очень перспективным классом, среди конформной гравитации. Строгое доказательство отсутствия инфляции означает, что она не применима в реалистичных космологических сценариях. Далее, обсуждаемая модель соответствует ведущему пертурбативному порядку, то есть трехуровневому. Отметим, что инфляция Старобинского происходит из-за радиационных поправок. Поэтому, мы полагаем, что тот факт, что инфляция отсутствует на уровне древесного приближения, важен сам по себе. Результаты опубликованы в статье: Alexeyev S., Krichevskiy D., Latosh B. Gravity models with nonlinear symmetry realization // Universe. — 2021. — Vol. 7, no. 12. — P. 501, статья вышла уже после отправки отчёта за 2021 год.

Несмотря на то, что общая теория относительности (ОТО) подтверждается с высокой точностью во всех проектах экспериментальной астрономии, проблемы тёмной энергии, тёмной материи, эволюции ранней Вселенной, квантования гравитации и др. остаются открытыми. Одним из способов разрешения этих проблем является модификация ОТО, что можно сделать раз-

личными способами, например, добавлением дополнительных полей и/или характеристик кривизны. Именно поэтому развитием расширенных моделей гравитации занято множество исследователей во всех странах. Стоит задача предложить описание, например, тёмной энергии (то есть, воспроизвести поведение космологической постоянной) с помощью дополнительных физических полей или введением дополнительных степеней свободы геометрии пространства-времени. Около 10 лет назад популярным стало использование модели Хорндески - наиболее общей скалярно-тензорной теории, обеспечивающей второй порядок для уравнений поля. Успешное развитие модели Хорндески было скорректировано регистрацией слияния нейтронных звёзд на достаточно близком расстоянии от Земли - события GW170817, в котором, кроме гравитационных волн, были зарегистрированы и электромагнитные, и измерена разница во времени их прихода, составившая 1.7 секунды. Благодаря этому были наложены жёсткие ограничения на массу гравитона, что отсекло огромный пласт моделей. Теории Хорндески были сильно ограничены. Поэтому, в последние годы получили развитие расширенные модели Хорндески (beyond Horndesky) разных типов, которые, наряду с другими, объединяют в класс вырожденных скалярно-тензорных моделей с поправками высших порядков (DHOST, Degenerate Higher-Order Scalar-Tensor theories). Наряду с этим, получил развитие подход, названный "телепараллельная гравитация". Также развиваются модели квантования гравитации (например, петлевая квантовая гравитация) и модели с нелинейной реализацией симметрии. Одной из целей развития всех этих направлений - фундаментальное обоснование появления дополнительных членов в лагранжиане гравитации, с помощью которых можно описать, например, тёмную энергию и инфляцию.

Все обсуждаемые подходы - скалярно-тензорная гравитация, теории DHOST, телепараллельная гравитация, петлевая квантовая гравитация, модели с нелинейной реализацией симметрии - в настоящее время активно развиваются, о чем свидетельствует количество публикуемых статей. При этом, в каждом случае существует и развиваются множество различных версий. Представляется важным сузить количество моделей за счёт анализа соответствия их предсказаний существующим данным и астрономическим наблюдениям, и гравитационно-волновой астрономии, и самосогласованного описания ранней Вселенной. Чтобы выявить модели с более точными предсказаниями (или меньшим количеством точных подстроек), необходимо рассмотреть широкий диапазон энергий и расстояний. Также, не исключено, что на основании полученных результатов станет возможным предложить предпочтительные направления дальнейшего развития этих моделей.

Таким образом, работа направлена на изучение и сравнение предсказаний таких моделей, как скалярно-тензорная гравитация, теории DHOST, телепараллельная гравитация, петлевая квантовая гравитация, модели с нелинейной реализацией симметрии для трёх ключевых астрофизических проектов. Развиваемая программа исследований базируется на опубликованной статье

Результаты опубликованы в статье: Alexeyev S., Prokopov V. / Extended gravity constraints at different scales // Universe (2022) Vol. 8, no. 5. P. 283.

Прежде всего, это предсказания для теней от чёрных дыр. С одной стороны, в настоящее время активно работает проект Event Horizon Telescope (EHT), которому удалось получить изображения теней для M87 и Sgr A*.

Данные постоянно уточняются. С другой стороны, различные теории гравитации предлагают решения для чёрных дыр, отличные друг от друга. Форма и другие характеристики тени зависят от параметров решения вида чёрная дыра, то есть, для решений, представляющих разные теории, они будут различными. Таким образом, решения можно сравнивать, выявив обеспечивающие наилучшее соответствие данным ЕНТ при минимальном наборе дополнительных подстроек. Также становится возможным ограничить параметры конкретной теории. Данная работа выполнена для невращающихся решений в сравнении с результатами М87.

Результаты опубликованы в статье: Прокопов В. А., Алексеев С. О., Зенин О. И./ Тени чёрных дыр как источник ограничений на расширенные теории гравитации // ЖЭТФ (2022) Т. 162, № 1, стр.108.

В работе рассмотрено построение фона тени сферически-симметричных чёрных дыр в частном случае метрики. Методы вычисления расширены на наиболее общий случай невращающейся чёрной дыры. Результаты анализа сравниваются с предсказаниями общей теории относительности при учёте данных Event Horizon Telescope. Результаты для модели Хорндески с инвариантом Гаусса-Бонне, петлевой квантовой гравитации, скалярных моделей Бамбелби и Гаусса-Бонне полностью согласуются с наблюдениями М87*. (После выхода новых изображений Sgr A эти новые результаты были учтены.)

Результаты опубликованы в статье: Прокопов В. А., Алексеев С. О., Зенин О. И./ Тени чёрных дыр как источник ограничений на расширенные теории гравитации 2: Sgr A* // ЖЭТФ (2022) Т. 162, № 7, стр.878.

Нами было показано, что полученные ранее результаты для модели Хорндески с инвариантом Гаусса-Бонне, петлевой квантовой гравитации, скалярных моделей Бамбелби, Гаусса-Бонне и конформной гравитации полностью согласуются с наблюдениями Sgr A*. Полученные ограничения на параметры теории демонстрируют тот максимум, которого можно достичь без учёта вращения чёрной дыры.

Результаты обсуждались на 2-х конференциях. Результаты приняты к печати в статье: Зенин О.И., Алексеев С.О., Прокопов В.А., Тени чёрных дыр как источник проверки расширенных теорий гравитации. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия.

В дальнейшем планируется дополнить рассмотрение учетом вращения черной дыры, проведя сравнительное моделирование теней для различных расширенных теорий гравитации. Работа включает в себя поиск новых и уточнения статуса существующих решений вида черная дыра, доработку алгоритма Ньюмена-Яниса или разработку нового алгоритма, первое использование алгоритма. В работе участвовали: Алексеев, Зенин, Байдерин, Немтинова. На реализацию данного направления получен грант РФФ 23-22-00073.

Петровым А.Н. были получены следующие результаты. Продолжается изучение TEGR. В ОТО в метрической форме, разработанной Эйнштейном, основной характеристикой гравитационного взаимодействия является кривизна пространства-времени, а основными динамическими переменными являются метрические коэффициенты. Однако возможны другие эквивалентные варианты представления ОТО, где гравитация описывается, например, только кручением пространства-времени, а динамическими переменными являются компоненты тетрада – это и есть TEGR. Также эквивалентом

ОТО является так называемый симметричный TEGR, где гравитация описывается неметричностью пространства-времени, а кривизна и кручение полагаются равными нулю. Ранее в течение предыдущих 3 лет Петровым А.Н. и др. изучался именно TEGR и некоторые его модификации, представляющие расширение ОТО. Для TEGR в тензорном представлении с использованием процедуры Нётер нами построены новые сохраняющиеся токи и соответствующие им суперпотенциалы, которые являются как координатно ковариантными, так и инвариантными относительно локальных лоренцевых вращений тетрад. Построение этого формализма является существенным достижением, поскольку позволяет исключить неопределенности в построении сохраняющихся величин, предлагаемом ранее другими авторами. Новый формализм был использован для расчета различных сохраняющихся величин для статической шварцшильдовой черной дыры, также для свободно падающих наблюдателей во вселенной Фридмана всех трех знаков кривизны и пространстве (анти-)де Ситтера. Одновременная ковариантность двух типов сохраняющихся величин, отмеченная выше, достигается сохранением в их выражениях векторов смещений, которые могут быть отождествлены с наблюдателями, соответствующими исследуемой проблеме. Также необходимо использовать специальные инерционные спиновые связности. Последние никак не определяются самим TEGR, и они не вводятся в рамках использования теоремы Нётер. Для определения инерционных спиновых связностей используется так называемый принцип «выключение гравитации». В наших работах этот принцип был обобщен и стал универсальным. Оказалось, что даже универсальный принцип «выключения гравитации» оставляет неопределенность для расчета сохраняющихся величин. Он дает возможность выписать пару тетрады и соответствующей ей инерционной спиновой связности. В силу полной ковариантности формализма после координатных и (или) локальных лоренцевых вращений, такая пара дает одни и те же сохраняющиеся величины, и названа нами «калибровкой». Оказывается, что одно и то же решение в метрической форме, но в разных координатах, после определения тетрады и «выключения гравитации» может привести к отличной калибровке. Как результат, сохраняющиеся величины в разных случаях могут отличаться для разных калибровок. Именно эти проблемы исследовались нами ранее на примере решения Шварцшильда, где «выключение гравитации» производилось как в статических координатах Шварцшильда, так и в координатах Леметра свободно падающего наблюдателя. В подотчетный период было продолжено исследование возможностей разработанного нами формализма построения сохраняющихся величин на примере движущейся с постоянной скоростью для удаленных наблюдателей черной дыры Шварцшильда в TEGR (в отличие от статической, изученной ранее). Были рассчитаны глобальные сохраняющиеся энергия (масса) и импульс такого объекта, измеренные бесконечно удаленными наблюдателями. Были использованы два метода. Для обоих методов сначала была рассчитана глобальная энергия (масса) покоящейся дыры. В рамках первого метода в качестве базисной модели был привлечён пример материального сферически симметричного материально шара в пространстве Минковского. Сначала была рассчитана глобальная энергия (масса) покоящегося шара. Затем с помощью глобальных лоренцевых преобразований рассчитываются энергия и импульс шара, движущегося с постоянной скоростью в пространстве Минковского. Оказалось, что конфигурация полевых

переменных как покоящейся, так и движущейся дыры позволяет построить соответствующие плотности энергии и импульса аналогичные этим величинам для материального шара. Использование этих аналогий позволяет получить физически осмысленный и ожидаемый результат. Существенным для этих вычислений является полная ковариантность выражений нашего формализма для сохраняющихся величин. В рамках этого метода использовалась единая «статическая» калибровка как для статической дыры, так и для движущейся. В рамках второго метода конфигурации полевых переменных как покоящейся, так и движущейся дыры рассматриваются с позиций единого наблюдателя. В этом отличие от первого метода. Соответственно для каждой из конфигураций изначально рассматриваются разные «калибровки» - статическая калибровка и калибровка движущейся дыры. Как оказалось эти калибровки совпадают, и это важный результат применения второго метода. В этом отличие от случая, рассмотренного ранее, где со статической калибровкой сравнивается калибровка свободно падающего наблюдателя и найдено их существенное различие. Снова получен физически осмысленный и ожидаемый результат, и существенным для этих вычислений является полная ковариантность полученных нами ковариантных выражений для сохраняющихся величин. Серия из двух статей посвящена эффекту Саньяка, одному из основных релятивистских эффектов, учёт которого необходим для синхронизации часов при работе глобальных навигационных спутниковых систем. Смысл эффекта состоит в том, что происходит запаздывание/опережение сигналов, распространяющихся в противоположных направлениях по периметру вращающегося диска. Представлено его теоретическое обоснование как в рамках кинематического эффекта специальной теории относительности, так и в рамках общей теории относительности, где эффект анализируется как результат действия потенциала центробежных сил. Для каждой из теорий используются два различных подхода, что позволяет глубже проникнуть в физический смысл явления. Теоретические выкладки используются далее, для учета эффекта в реальных условиях распространения в оптоволокне на поверхности Земли. Теоретические выкладки необходимы для описания эффекта в реальных условиях на поверхности вращающейся Земли, где для распространения сигналов используется оптоволокно, а теория используется для синхронизации атомных часов на базисных станциях навигационных систем. Выписывается релятивистское уравнение для сигнала, распространяющегося в оптоволокне. Это уравнение анализируется, делается оценка вкладов (значимых и незначительных) различных релятивистских эффектов, выделяется, как основной, эффект Саньяка. При этом также учитывается влияние особенностей строения поверхности Земли, в том числе в сочетании с её вращением. Совместное рассмотрение теоретических основ и влияния в прикладных задачах эффекта Саньяка поможет взглянуть на проблему синхронизации часов в навигационных системах комплексно, а тем самым дать возможность исследовать и улучшать их работу более эффективно.

Топоренский А.В. работал по изучению внутренней геометрии ЧД. Построено семейство синхронных метрик, включающее в себя метрику Леметра и метрику типа Кантовского-Сакса внутри черной дыры Шварцшильда. Результаты опубликованы в статье: A. V. Toporensky, O. B. Zaslavskii, Regular frames for spherically symmetric black holes revisited, *Symmetry*, 14, 40 (2022) Было рассмотрено пространство-время сферически симметричной черной

дыры с одним невырожденным горизонтом. Поскольку стандартная статическая система координат имеет сингулярность на горизонте, для описания пересечения горизонта требуется построение регулярных на горизонте координатных систем. Несколько таких систем хорошо известно. Часть из них естественным образом могут быть объединены в семейства, некоторые продолжали оставаться в стороне от подобных схем. Мы показываем как системы Леметра, Кантовского-Сакса и Эддингтона-Финкельштейна объединяются в единое семейство с параметром E , интерпретируемом как удельная энергия частиц, движущихся вместе с соответствующей системой отсчета (то есть, покоящихся относительно этой системы). Системе Леметра соответствует $E=1$, системе Кантовского-Сакса соответствует $E=0$, причем предел при E стремящемся к нулю является гладким, несмотря на то, что метрика с любым ненулевым E является пространственно неоднородной, тогда как метрика с $E=0$ пространственно однородна. Построены и проанализированы глобальные фазовые портреты для космологической эволюции скалярного поля с неминимальной связью. Результаты опубликованы в статье: Laur Järv, Alexey Toporensky, Global portraits of nonminimal inflation, Eur. Phys. J. C 82, 179 (2022) Мы используем подходы теории динамических систем для анализа инфляционной Вселенной с неминимально связанным скалярным полем. Используемые нами переменные позволяют четко разделить различные асимптотические режимы в фазовом пространстве, включая кинетический и инфляционный режимы. Инфляция представляет собой гетероклиническую траекторию, берущую начало или в бесконечности в негиперболической точке или из регулярной седловой точки, представляющей решение де Ситтера. Мы также представляем множество начальных данных, приводящих к достаточной инфляции, в виде, наложенном на фазовые портреты. Кроме того, мы показываем путем прямого сравнения с результатами численного интегрирования уравнений движения, какое из имеющихся в литературе предложений для режима медленного скатывания в случае наличия неминимальной связи лучше соответствует имеющемуся численному решению. В качестве конкретных примеров мы приводим фазовые портреты для квадратичного потенциала и потенциала четвертой степени и замечаем, что увеличение константы неминимальной связи уменьшает область допустимых начальных условий для случая квадратичного потенциала и увеличивает ее для потенциала четвертой степени. Получена спиновая связность для модифицированной телерпараллельной гравитации при наличии скалярного поля, неминимально связанного с кручением. Результаты опубликованы в статье: Alexey V. Toporensky, Petr V. Tretyakov, Spin connection and cosmological perturbations in scalar-torsion gravity, Int.J.Geom.Meth.Mod.Phys. 19 (2022) 10, 2250147 В данной статье мы обобщаем наш предыдущий результат о спиновой связности для малых скалярных космологических возмущений в $f(T)$ теории на более широкий класс теорий, которые включают скалярное поле Φ , неминимально связанное с кручением и явную зависимость функции f от поля Φ . Случай $f(T)=T$ при наличии неминимально связанного скалярного поля оказался особым и потребовал специального рассмотрения. В обоих рассмотренных случаях используя полученные формы спиновой связности мы получили самосогласованные уравнения для эволюции малых скалярных космологических возмущений в данной теории. Показано, что известные к настоящему времени значения параметров возмущений реликтового фона несовместны

со степенным потенциалом инфлатонного поля даже при наличии неминимальной кинетической связи. Результаты опубликованы в статье: N. Avdeev, A. Toporensky, Ruling out an inflation driven by a power law potential: kinetic coupling does not help, *Gravitation and Cosmology* 28, 416–419 (2022). Мы показываем, что последние значения спектрального индекса скалярных возмущений реликтового фона и ограничения на значение отношения тензорных и скалярных возмущений уже достаточны для отбраковки модели со степенным потенциалом скалярного поля даже в случае наличия неминимальной кинетической связи с положительной константой связи. Случай отрицательной константы связи более сложен и требует специального рассмотрения. Топоренский А.В. также принимал участие в конференциях: 4 устных доклада на 4 конференциях.

Основным направлением работы Дядиной П.И. является исследование гибридной метрической-Палатини $f(R)$ -гравитации. Гибридная метрическая-Палатини $f(R)$ -гравитация принадлежит семейству $f(R)$ -теорий. Действие в $f(R)$ -теориях строится путем обобщения гравитационной части действия Эйнштейна-Гильберта как произвольной функции кривизны. Есть два возможных подхода, которые можно использовать для получения уравнений поля в $f(R)$ -гравитации: метрический и Палатини. В метрическом подходе метрика - единственная динамическая переменная. В методе Палатини аффинная связность не зависит от метрики и является дополнительной переменной. К сожалению, оба метода приводят к некоторым неразрешимым проблемам. Метрические $f(R)$ -теории, как правило, не могут пройти стандартные тесты Солнечной системы. Все $f(R)$ -модели Палатини, созданные для объяснения ускоренного расширения Вселенной, приводят к микроскопическим нестабильностям материи и неприемлемым особенностям эволюции космологических возмущений. Гибридная $f(R)$ -гравитация строится на объединении идей теории Палатини и метрической $f(R)$ -теории. Данная модель объединяет все преимущества обоих подходов, но лишена их недостатков. В частности, как показано ранее Дядиной П.И. и др., наличие легкого скалярного поля в гибридной $f(R)$ -гравитации не противоречит экспериментальным данным из Солнечной системы. Данный вывод основывается не только на постньютоновском параметре γ , но и на всех других параметрах постньютоновского формализма. Таким образом, в отличие от метрической $f(R)$ -теории, гибридная $f(R)$ -гравитация может пройти полный постньютоновский тест.

В течение последнего года Дядина П.И. исследовала задержку Шапиро в применении к массивным скалярно-тензорным теориям гравитации. Как результат данная задержка была получена для гибридной метрической-Палатини $f(R)$ -гравитации, а также показана эквивалентность получения ограничений на массивные скалярно-тензорные теории методами параметризованного постньютоновского (ППН) формализма и прямым вычислением задержки Шапиро. На основании проделанной работы получен основной вывод об отсутствии тождественной эквивалентности в предсказаниях задержки Шапиро массивными скалярно-тензорными теориями и общей теорией относительности. Кроме того, показано, что при рассмотрении массивной скалярно-тензорной теории отклонение света будет определяться ППН параметром γ , как и в случае безмассовой теории. Однако разница между этими моделями состоит в том, что параметр γ в массивных скалярно-тензорных теориях зависит от расстояния, на котором измерялась масса

объекта в соответствии с законом Кеплера. Следовательно, можно утверждать, что ППН формализм дает те же прогнозы, что и прямой расчет задержки Шапиро, и применим к массивным скалярно-тензорным теориям. По результатам работы представлена статья: P. I. Dyadina, S. P. Labazova "On Shapiro time delay in massive scalar-tensor theories" Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, том 2201, № 01, с. 029.

Другим способом исследования теорий гравитации является исследование ГВ. Открытие гравитационно-волнового излучения - одно из важнейших событий последних десятилетий. Существование ГВ и их прямое детектирование стало еще одним доказательством ОТО. Более того, данные, полученные ГВ детекторами, могут служить для проверки модифицированных теорий гравитации. Одним из способов использования ГВ данных для проверки теорий гравитации является сравнение поляризационных состояний, предсказываемых теорией, с наблюдательными данными. Событие GW170814 дало возможность коллаборациям LIGO и VIRGO получить результат, согласно которому чисто тензорные поляризационные состояния предпочтительнее чисто векторных или чисто скалярных. Данные, полученные в рамках этого события, могут быть использованы в дальнейшем для более точной количественной проверки теорий гравитации. Однако, в первую очередь, стоит уделить внимание числу поляризационных мод, предсказываемых теорией.

В ОТО гравитационная волна имеет две тензорные поляризации, называемые "+" и "x". В альтернативных же теориях гравитации может присутствовать до шести поляризационных состояний. Ирдли показал, что для плоских гравитационных волн шесть поляризаций могут быть классифицированы малой группой E(2) группы Лоренца. Согласно этой классификации, безмассовое скалярное поле распространяется посредством поперечной скалярной моды, в то время как вторая скалярная мода, продольная, проявляется только в присутствии всех остальных пяти поляризационных мод. Однако, как позднее было показано, присутствие массивного скалярного поля приводит к появлению продольной скалярной моды, в дополнение к поперечной, в то время как векторные моды отсутствуют. И только недавно вопрос о несоответствии числа степеней свободы и числа поляризационных состояний в массивных скалярно-тензорных теориях начал активно исследоваться. Гибридная f(R)-гравитация может быть представлена как скалярно-тензорная теория с массивным скалярным полем. Ранее поляризационные состояния уже изучались в этой теории другими авторами. Было получено, что гибридная f(R)-гравитация содержит четыре поляризационные моды: "+", "x", скалярную продольную и поперечную моды. Однако, позднее было показано, что данная модель имеет три степени свободы. Таким образом, возникает несоответствие.

Все поляризационные моды, предсказываемые теорией, содержатся в электрической части тензора Римана. После проведения соответствующих вычислений Дядиной П.И. было обнаружено, что в гибридной f(R)-гравитации будут присутствовать и продольная, и поперечная скалярные моды. Однако в системе покоя массивного скалярного поля два скалярных поляризационных состояния становятся идентичными. Таким образом, можно сделать вывод, что обе скалярные моды являются проявлением одной и той же скалярной степени свободы и представляют собой смесь поляризационных состояний гравитационной волны. Следовательно, не суще-

ствуется противоречия между числом степеней свободы и числом поляризационных состояний в гибридной $f(R)$ -гравитации.

Другим эффективным способом проверки теорий гравитации является определение скорости распространения гравитационных волн. Регистрация килоновой (событие GW170817/SHB170817A) позволила получить скорость гравитационного излучения с высокой точностью, что привело к ограничению и даже закрытию большого числа модифицированных теорий гравитации. Эта проверка была применена и к массивным скалярно-тензорным теориям. Было показано, что только теория Бранса-Дикке с массивным скалярным полем может полностью пройти этот тест. В ходе исследований, сделанных в течение последнего года, Дядиной П.И. была посчитана скорость распространения тензорных возмущений в гибридной $f(R)$ -гравитации и показано, что гравитационные волны в этой теории распространяются со скоростью света. Таким образом, гибридная $f(R)$ -гравитация находится в полном согласии с существующими экспериментальными данными по гравитационно-волновому излучению.

По результатам работы представлена статья: P. I. Dyadina, "Polarization and speed of gravitational waves in hybrid metric-Palatini $f(R)$ -gravity" *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, том 135, № 3, с. 333.

Дядина П.И. получила грант Российского научного фонда по теме «Изучение аккреции на компактные объекты в рамках гибридной метрической-Палатини $f(R)$ -гравитации».

Пункт 1.4. Проработка структуры и состава космических систем в ближайшем космосе для исследования гравитационных волн, а также для исследования релятивистских эффектов.

Власов И.Ю. принимал участие в НИР «Прикладные и экспериментальные исследования методов и средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС в части развития методов и средств космической геодезии» (далее «Развитие»). В отчете по первому этапу в соавторстве с М.В. Сажиным принимал участие в написании раздела «Учет релятивистских эффектов при вычислении межспутникового расстояния в группировке спутник-спутник». Рассматривалась модель распространения лазерного сигнала между парой космических аппаратов типа GRACE-FO на низкой околоземной орбите. Учитывалось влияние гравитационного поля несферической Земли, поля внешних к Земле тел (Луна, Солнце), и всех релятивистских эффектов, существенных для заданной точности измерения межспутникового расстояния в 1 нм. Получены выражения для времени распространения светового сигнала между спутниками (световая задержка) и набегающей при этом разности фаз. Данные результаты позволяют получить формулы редукации измеренных расстояний с целью восстановления гравитационного поля Земли. Также принимал участие в НИР «Разработка ключевых элементов технологии обработки больших данных космической геодезической информации и создание программно-методических комплексов в части спутниковой градиентометрии и измерений межспутникового расстояния с использованием высокопроизводительных Супер-ЭВМ» (далее «Геософт»). В отчете по первому этапу в соавторстве с М.В. Сажиным принимал участие в написании раздела «Разработка алгоритма учета релятивистских эффектов при вычислении межспутникового расстояния в группировке спутник-спутник». Были даны рекомендации по практическому применению результатов, описанных выше для НИР «Развитие», для построения

алгоритма вычисления относительных ускорений, скоростей и расстояний для пары спутников на почти одинаковых околоземных орбитах.

Для второго этапа НИР «Геософт» и отчета к нему были проведены исследования о возможности осуществления своими средствами перевода данных уровня 1А эксперимента GRACE-FO к уровню 1В. В открытом доступе имеется большой массив данных, полученных миссией GRACE-FO за последние годы. Эти данные имеют иерархическую структуру и распределены по уровням, отличающимся степенью обработки. Практически сырые данные, приведенные к виду, годному для дальнейшего использования, называются данными уровня 1А. Самыми главными там по объему и смысловой нагрузке являются массивы фазовых измерений в микроволновом и оптическом диапазонах. На уровне 1В содержатся, помимо прочего, полученные из этих фазовых измерений массивы межспутниковых расстояний, скоростей и ускорений. На уровне 2 приводятся таблицы коэффициентов Стокса гравитационного поля Земли, полученные в результате обработки данных 1В. Одной из задач НИР «Развитие» и «Геософт» является использование исходных данных миссии GRACE-FO для самостоятельного восстановления гравитационного поля, и тем самым отработки алгоритмов такой деятельности с целью проведения подобных отечественных космических экспериментов. Нами была показана принципиальная возможность получить данные об относительных расстояниях и т.п. (уровень 1В) из фазовых измерений (уровень 1А) и построен реализующий это алгоритм в виде программного продукта. В настоящее время готовность программы можно оценить в 70

Пункт 1.5. Участие в работе интерактивного энциклопедического Портала «Знания» (расширенная электронная версия БРЭ). Научно-общественная активность.

М.В. Сажиним, О.С. Сажинной, А.Н. Петровым и С.О. Алексеевым был написан (2021-2022 гг.) и опубликован (2022 г.) большой ряд рецензируемых статей в области космологии: «Теория Большого взрыва», «Топологический дефект» (опубликовано в РИНЦ), «Стандартная свеча», «Ускоренное расширение современной Вселенной», «Мачо-объекты», «Вимп-частица», «Реликтовое излучение» и др. для портала «Знания» (расширенная электронная версия БРЭ). В том же издании готовится к электронной публикации обзорная статья по современной астрономии и космонавтике в России под ред. О.С. Сажинной.

Регулярно работает общемосковский семинар по гравитации и космологии им. А.Л. Зельманова. Председатель семинара - проф. М.В. Сажин, секретарь семинара д.физ.-мат. наук О.С. Сажина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по теории релятивистской гравитации и космологии выполнены на ведущем мировом уровне. Свидетельством этого является интерес мировой научной общественности к этим работам, а также приглашение участников этих работ на международные и всероссийские конференции с пленарными и устными докладами и публикация статей по теме в высокорейтинговых журналах.

Работы по теме «Современная космология и теория релятивистского гравитационного поля» поддерживает престиж МГУ им. М.В. Ломоносова и России в глазах мирового научного сообщества. Необходимо продолжить работу над темой «Современная космология и теория релятивистского гравитационного поля». Необходимо развивать отдельные разделы этой темы, связанные как с наблюдательной космологией и релятивистским гравитационным полем, так и с современными теориями гравитации, которые являются расширением общей теории относительности А. Эйнштейна.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2022 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами