

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.)

младший 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-боннэ, 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

Гс - гаусс

ГэВ - Гигаэлектронвольты

КА - космический аппарат

КЛСВЭ - космические лучи сверхвысоких энергий

КН - кротовая нора

КО - компактные объекты

МэВ - Мегаэлектронвольты

НЗ - нейтронные звезды

ОТО - общая теория относительности

ППК - параметризованный посткеплеровский формализм

ППН - параметризованный постньютоновский формализм

ТУС - Трековая УСтановка

УФ - ультрафиолетовый

ЧД - черная дыра

эВ - электронвольт

ЕНТ - телескоп горизонта событий

Fermi-GBM - каталог космических источников

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

JCAP - Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (Журнал космологии и микрофизики)

KLYPVE-EUSO - планируемый орбитальный детектор КЛСВЭ

LIGO - детектор гравитационных волн

M31 - галактика Андромеды

OGC - Open Gravitational wave Catalog (Открытый каталог гравитационных волн)

Planck - космический аппарат европейского космического агентства для наблюдения анизотропии реликтового излучения

TEGR - телепараллельный эквивалент общей теории относительности

WMAP - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe XMM-Newton - космический телескоп

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.

Особенно актуальными являются работы, направленные на поиски космических источников гравитационных волн, а также работы по исследованию свойств черных дыр и других релятивистских объектов, которые являются компонентами двойных систем.

В настоящее время в России нет работающих детекторов гравитационных волн. Стоимость проекта детектора типа LIGO составляет несколько сотен миллионов долларов. Подобный проект вряд ли может быть реализован в России в настоящей экономической ситуации.

Тем не менее, есть несколько методов детектирования гравитационных волн, которые доступны для проведения в России. Во-первых, это метод пульсарного тайминга для детектирования гравитационных волн. Этот метод был впервые предложен в 1978 г. М.В. Сажиным и в настоящее время пользуется широкой мировой известностью. При своей эффективности, метод не лишен недостатка: основная проблема метода пульсарного тайминга – это его чувствительность, которая определяется стабильностью самих пульсаров. Именно эта проблема исследовалась нашей группой в текущем году.

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. 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, состо-

ящие 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.

Опубликована заказная обзорная статья «Space fabric wrinkles» для итальянского высокорейтингового научного журнала «La Rivista del Nuovo Cimento». Современные космические науки — космология и астрофизика — достигли глубокого понимания природы объектов и структур нашей Вселенной и структуры Вселенной в целом, начиная с первых секунд после Большого взрыва и экстраполируя в будущее. Это развитие стало возможным благодаря совершенствованию наземной и космической инструментальной базы, которая позволила не только наблюдать Вселенную с высокой точностью во всех диапазонах электромагнитного излучения, но и открыла новый канал получения информации: гравитационно-волновую астрономию. В дополнение, теория стремительно развивается, растет объем компьютерного моделирования и обработки данных, в том числе в реальном времени, а также наблюдается плодотворный симбиоз с физикой элементарных частиц и другими разделами современной физики. Астрономы и физики вплотную подошли к поиску нетривиальных структур во Вселенной, от топологических дефектов до последствий скрытой многомерности пространства-времени. Такие исследования активно поддерживаются современной математической теорией и существующими пробелами в понимании единой картины физических взаимодействий и структуры скрытых секторов материи: темной материи и темной энергии. Предлагаемая работа дополняет ряд предыдущих теоретических работ и обзоров, посвященных теории топологических дефектов в космологии, а также структурам, возникающим как следствие многомерности пространства-времени. Основной целью работы по космическим струнам является обсуждение поиска наблюдательных проявлений экзотических структур во Вселенной, прежде всего космических струн, как наиболее привлекательных кандидатов. Приводится история таких наблюдательных поисков, а также подробная методология, основанная на астрофизических свойствах космических струн. Обсуждаются найденные кандидаты в космические струны. Обсуждается дальнейшая стратегия поиска и исследования таких объектов.

Проводятся исследования по оценке амплитуды и спектра гравитационных волн, которые можно ожидать от кандидата в космическую струну (найденного в ранних работах М.В Сажина, О.С. Сажинной, Д. Сконьямильо, М. Капаччиоли). Рассматриваются несколько подзадач, а именно. Первая модель – бесконечная прямая космическая струна с малыми колебаниями. Вторая модель – прямая космическая струна конечной длины с монополями на концах (т.н. «гантель»). Третья модель – сегментированная струна, представляющая собой конгломерат прямых участков, перемежающихся монополями (т.н. «ожерелье»). Для всех трех моделей вычислены тензор энергии-импульса, амплитуда возмущения метрики, поляризации, а также средний квадрат детектируемой амплитуды. Показано, что рассмотрение конечной струны с монополями на концах и обобщения этой модели дают

возможность построить аналитическую модель генерации гравитационных волн. Результаты работы (И.И. Булыгин, М.В. Сажин, О.С. Сажина) готовятся к печати.

В общей теории относительности появляется несколько решений, которые описывают релятивистские объекты, скорость пробных частиц вблизи которых сравнима со скоростью света. Это прежде всего ЧД – решения уравнений ОТО, найденные Шварцшильдом и Керром. ЧД открыты как в электромагнитном канале наблюдений, так и в гравитационно-волновом канале. Открытие ЧД внушает уверенность, что и другие решения ОТО (на сегодняшний день только теоретические), могут существовать в космосе. Одним из таких гипотетических решений являются КН. Сейчас существует несколько решений типа КН. В литературе рассматривают как решения ОТО, так и наблюдательные проявления КН. Для описания наблюдательных проявлений вблизи КН необходимо знать закон движения пробных частиц, другими словами, геодезические кривые вблизи КН. Выведены уравнения движения пробной частицы в метрике КН, рассмотрены наиболее интересные свойства полученных движений. Рассматривается метрика КН и некоторые общие свойства выбранной метрики. Выводится общее уравнение геодезических кривых в этой метрике КН и рассматриваются некоторые свойства этих кривых, а также анализируется точное решение для круговых орбит пробных частиц вокруг КН. Рассматривается приближенное аналитическое решение уравнений геодезических линий, а также проводится его сравнение с численным решением точного уравнения. Наконец, рассматривается смещение перицентра орбиты пробной частицы в поле КН и обсуждаются возможные наблюдательные следствия. Статья готовится к печати.

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

Несколько лет назад серия мощных миллисекундных радиоимпульсов с близкими мерами дисперсии была зарегистрирована в направлении на галактику М31. Отталкиваясь от гипотезы о возможной связи этих радиовсплесков с магнитаром в М31, мы провели поиск источников периодического рентгеновского сигнала, используя данные наблюдений рентгеновского телескопа XMM-Newton почти за 20 лет. В результате проведенного анализа данных был выделен сигнал от уже известного периодического рентгеновского источника 3XMMJ004301.4+413017 — аккрецирующего пульсара в составе двойной системы. Однако нам не удалось обнаружить новых кандидатов. В частности, не выявлен объект, который можно было бы связать с гипотетическим магнитаром, ответственным за наблюдавшиеся радиовсплески, который мог бы иметь светимость $L_X > 10^{36} \text{c}^{-1}$.

Излучение Крабовидной туманности демонстрирует существенную переменность в гамма-диапазоне. Была проанализирована эта переменность с точки зрения периодичности. Используя эфемериды пульсара, построенные по радиоданным, была получена кривая блеска Крабовидной туманности с подавленным вкладом пульсара в диапазоне энергий 100-300 МэВ (с августа 2008 г. по март 2020 г.). С помощью метода дисперсионного анализа было обнаружено указание на периодичность вспышек в туманности с периодом 49 недель. Статистическая значимость этого сигнала составила 0.02 (2.1 σ), если учитывать только наибольший пик в периодограмме, и 0.003 (2.7 σ), если учитывать два пика – наибольший и пик на удвоенном периоде (98 недель), которые могут вызываться одним и тем же сигналом.

Космический телескоп, или орбитальный детектор, ТУС – первая установка, предназначенная для наблюдений КЛСВЭ. ТУС показал, что детекторы такого типа обладают широкими возможностями и могут наблюдать различные переменные явления в атмосфере, метеоры, антропогенное свечение и другие процессы, которые происходят в земной атмосфере в УФ-диапазоне. Был исследован вопрос возможности детектирования гамма-всплесков по флуоресцентному свечению, которое они могут вызывать в атмосфере. Используя в качестве основы данные каталога Fermi-GBM, были оценены перспективы наблюдений с помощью планируемых миссий, таких как KLYPVE-EUSO (K-EUSO) и РОЕММА. Было показано, что даже столь чувствительные инструменты смогут регистрировать в лучшем случае один-два всплеска каждый год наблюдений. Тепловое излучение НЗ может быть использовано для исследований свойств аксионов и сходных частиц. В сильном магнитном поле в окрестности этих объектов фотоны, которые были испущены с поверхности, могут конвертироваться в аксионы, что приведет к появлению особенностей в спектре НЗ. Взаимодействие сильно зависит от поляризации излучения и в общем случае мало, если рассматривать константы взаимодействия $g_{\gamma a}$, которые еще не исключены с помощью наблюдений. В работе была оценена доля фотонов, которые конвертируются в аксионы в случае 100% О-поляризации, и если спектр описывается спектром чернотельного излучения от источника с однородной поверхностной температурой. Магнитное поле НЗ принималось дипольным. Для величин магнитных полей 10^{13} – 10^{14} Гс, которые характерны для изолированных рентгеновски неактивных одиночных НЗ, максимальный эффект достигается при $g_{\gamma a} = 2 \times 10^{-11}$ ГэВ⁻¹: поток в оптике уменьшается на 30 – 40%, в то время как спектр на более высоких частотах не меняется. Амплитуда эффекта в оптике превышает 5% при $g_{\gamma a} \geq 2 \times 10^{-12}$ ГэВ⁻¹ и $m_a \leq 2 \times 10^{-6}$ эВ, что ниже современных экспериментальных и астрофизических ограничений на параметры аксиона.

При поиске гипотетических частиц за пределами Стандартной модели часто встречаются экстремальные показатели – громадные энергии, очень маленькие сечения взаимодействий, большие временные масштабы. Лабораторные эксперименты не всегда могут исследовать требуемые области пространства параметров, часто получая только слабые верхние ограничения на свойства. Астрофизические наблюдения могут значительно расширить доступное для тестов пространство параметров. Компактные объекты – НЗ и белые карлики – играют важную роль в таких исследованиях. Был написан обзор о современном состоянии проблемы. Частицы темной материи могут аккумулироваться внутри КО, приводя к их дополнительному нагреву или индуцируя коллапс в черную дыру. Были описаны режимы и темпы накопления, а также возможные астрофизические следствия. Следующая часть обзора была посвящена аксионам – одному из ведущих кандидатов на роль темной материи. Их существование может быть открыто по возможным процессам аксион-фотонной конверсии в магнитосферах КО, а также по их возможному вкладу в охлаждение этих объектов.

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

Продолжается развитие теоретико-полевой подхода в теории Лавлока. Теоретико-полевой подход является одной из главных научных тем, который развивается многие годы А.Н. Петровым. Метрические теории, вклю-

чая все многообразие расширенных теорий, представляется в эквивалентной формулировке, где возмущения всех полей, как метрических, так и материальных, взаимодействуют и распространяются на фоне фиксированного пространства-времени. Фон может быть как плоским, так и произвольно искривленным, обычно он выбирается в зависимости от исследуемых проблем. Возмущения являются конечными в том смысле, что теория является точной, не приближенной. Именно поэтому теоретико-полевая формулировка эквивалентна обычной метрической формулировке. В рамках теоретико-полевого подхода возмущения рассматриваются как конфигурация динамических полей на заданном фоне. Для этих динамических полей формализм является ковариантным и представлен с помощью соответствующего лагранжиана. Уравнения, как и всегда, получаются вариацией этого лагранжиана по компонентам полевой конфигурации.

Для теоретико-полевого формализма, как основанного на лагранжианах, разрабатывается построение законов сохранения и сохраняющихся величин. Законы сохранения имеют форму, где слева находится дифференциально сохраняющийся общий (материальных и метрических возмущений) ток на заданном фоне. Справа расположена дивергенция от суперпотенциала (величины, вторая дивергенция от которой тождественно равна нулю). Токи играют важную роль в изучении локальных свойств системы. Суперпотенциалы позволяют определять глобальные сохраняющиеся величины (заряды) островных систем, таких как черные дыры, или квазилокальные сохраняющиеся величины для самых разных моделей.

Теоретико-полевой метод развивается в рамках теории Лавлока общего вида в многомерии. Недавно были построены сохраняющиеся токи и суперпотенциалы в теоретико-полевой формулировке для любого произвольного порядка теории Лавлока, частный случай которой, например, является теория Эйнштейна-Гаусса-Бонне. Важным является то, что новые токи и суперпотенциалы построены для возмущений, распространяющихся на произвольно искривленных фонах, возможно включающих фоновую материю. До этого в лавлоковской гравитации были известны лишь токи и суперпотенциалы Дезера-Текина для возмущений на анти-де ситтеровском фоне. В качестве приложений и теста была рассчитана масса шварцшильд-анти-де ситтеровских черных дыр.

Рассматриваемый формализм получил развитие в рамках так называемой чисто лавлоковской гравитации. Лагранжтан чисто лавлоковской гравитации состоит всего из двух слагаемых – это «затравочный» космологический член и любой другой член общего вида лагранжиана, порядок которого для данной размерности не больше допустимого. Такая теория является интересной по нескольким причинам, как формальным, так и принципиальным, и пользуется значительным вниманием исследователей. Поскольку эта теория является важной, Петровым А.Н., используя предыдущие результаты, были построены для нее сохраняющиеся токи и суперпотенциалы самого общего вида. Основным результатом состоит в том, что благодаря этим новым общим формулам, были исследованы как статические черные дыры, так и динамические черные дыры типа Вайдьи со светоподобной жидкостью общего вида в чисто лавлоковской гравитации. Были рассмотрены черные дыры трех видов: с плоской, анти-де ситтеровской и де ситтеровской асимптотиками. Для них были получены как глобальные, так и квази-локальные выражения для энергии на фоне геометрии асимптотик этих дыр, а для ди-

намических еще и на фоне соответствующих статических черных дыр. При расчете этих величин не возникло никаких проблем для их определения для черных дыр с анти-де ситтеровской асимптотикой. Для черных дыр с де ситтеровской асимптотикой можно определить только квазилокальные величины, а для черных дыр с плоской асимптотикой, наоборот, нельзя определить квази-локальные величины на плоском фоне. Кроме того, что эти данные являются новыми и интересны сами по себе, они позволили уточнить параметры светоподобной жидкости.

Разработанные методы позволяют рассчитать локальные сохраняющиеся величины для любого наблюдателя. Для динамических черных дыр всех трех видов были рассчитаны плотность энергии и плотность потока энергии для свободно падающих наблюдателей на фоне геометрии соответствующих статических черных дыр. Показано, что новые характеристики имеют физический смысл в пространстве как до горизонтов событий и «аппарент»-горизонтов, так и за ними. Эти результаты являются совершенно новыми, не известны даже попытки такого рода исследований, и получены они были благодаря универсальности теоретико-полевых методов. Результаты изучения лавлоковской гравитации Петровым А.Н. были обобщены, представлены в виде результатов единого исследования и доложены на Международной конференции XXII International Conference «Physical Interpretations of Relativity Theory – 2021» (PIRT 2021) 5-9 июля 2021 г., а после этого опубликованы в журнале конференций Journal of Physics: Conference Series. Это позволило определить обещающие перспективы дальнейших исследований в этом направлении.

Продолжается изучение телепараллельных теорий гравитации. В общей теории относительности Эйнштейна основной характеристикой гравитационного взаимодействия является кривизна пространства-времени. Однако возможны другие варианты геометрических теорий тяготения, где гравитация описывается кручением пространства-времени или его неметричностью. Возможны варианты теорий, где эти геометрические характеристики в той или иной пропорции используются одновременно. В настоящее время нами изучается так называемый телепараллельный эквивалент общей теории относительности. Это переформулировка общей теории относительности, где полевыми переменными вместо метрических компонент являются компоненты тетрады, а единственной характеристикой гравитации является кручение.

Ранее в работах в рамках TEGR с использованием теоремы Нётер построены новые сохраняющиеся токи и соответствующие им суперпотенциалы, которые являются как координатно ковариантными, так и инвариантными относительно локальных лоренцевых вращений. Построение этого формализма является существенным достижением, поскольку позволяет исключить неопределенности в построении сохраняющихся величин, предлагаемом ранее другими авторами. Использование нового формализма позволило рассчитать массу черной дыры Шварцшильда и плотности сохраняющихся величин для свободно падающих наблюдателей во вселенной Фридмана всех трех знаков кривизны и пространстве де Ситтера и анти-де Ситтера, что оказалось в полном соответствии как ожидаемой массой черной дыры, так и со слабым принципом эквивалентности. Это исследование было продолжено. Одновременная ковариантность двух типов, отмеченных выше, достигается, с одной стороны, введением в формализм векторов смещений, ко-

торые могут быть отождествлены как с векторами Киллинга пространства-времени, так и с собственными векторами наблюдателей. С другой стороны, необходимо использование так называемых инерционных спиновых связностей. Последние никак не определяются самой теорией TEGR, и они не вводятся в рамках использования теоремы Нетер. Однако существует несколько принципов вне формализма, которые позволяют определить инерциальные спиновые связности. Один из самых популярных и геометрически обоснованных – это так называемое «выключение гравитации» в случае каждого изучаемого решения. В вышеупомянутых работах этот принцип был обобщен. Также была исследована проблема: приводит ли принцип «выключение гравитации» в рамках полностью ковариантного формализма в TEGR к полностью определенным результатам для сохраняющихся величин. Последовательность построения такова: рассматривается некоторое решение в метрической форме. На основе этого конструируется соответствующая тетрада. Затем, следуя принципу «выключения гравитации», определяется соответствующая этой тетраде инерциальная спиновая связность. Мы назвали пару тетрады и соответствующей ей инерциальной спиновой связности «калибровкой». Эта пара как после координатных преобразований, так и локальных лоренцевых вращений остается все той же калибровкой в силу полной ковариантности формализма. После того как калибровка определена, все сохраняющиеся величины также оказываются полностью детерминированы в силу все той же полной ковариантности.

Но в общем случае оказывается, что одно и то же решение в метрической форме, но в других координатах, после определения тетрады и «выключения гравитации» приводит к другой калибровке. Как результат, сохраняющиеся величины в общем случае могут отличаться от тех, которые были получены в случае первой калибровки. Именно эти проблемы были исследованы на примере решения Шварцшильда. Для решения в статических шварцшильдовых координатах была определена так называемая «статическая калибровка». Оказалось, что в рамках этой калибровки вычисляется ожидаемая масса черной дыры. Однако попытка описать энергетические характеристики для свободно падающего наблюдателя не увенчались успехом, нет соответствия с принципом эквивалентности. Затем решение Шварцшильда было рассмотрено в леметровых координатах. Напомним, что леметровы координаты привязаны к свободно падающему наблюдателю, скорость которого на бесконечности равна нулю. Соответствующая калибровка была названа «леметровой». Оказалось, что, наоборот, она соответствует слабому принципу эквивалентности, зато не получилось приемлемой массы для черной дыры. Встал вопрос о калибровке, для которой оба теста выполнялись бы одновременно. И такая калибровка была найдена. Для этого леметровы координаты были обобщены. Они были построены для свободно падающих наблюдателей, но таких, что на бесконечности их скорость падения к черной дыре произвольная, но ненулевая. Нам неизвестно упоминание об этих координатах в литературе, и их построение вполне можно считать новым результатом. Для простоты соответствующую калибровку назвали «е-калибровкой». В этом случае, действительно, одновременно получена приемлемая масса для черной дыры и соответствие с принципом эквивалентности.

Наконец, была исследована возможность использовать найденные калибровки в телепараллельных теориях типа $f(T)$, где тоже необходимо опреде-

ление инерциальной спиновой связности. Оказалось, что в общем случае успехи вTEGR не помогают решить проблемы в теориях $f(T)$.

Написано эссе в честь присуждения Нобелевской премии Роджеру Пенроузу. Дана его краткая биография, кратко описано становление его как ученого. Отмечен круг интересов и перечислены основные награды и премии. Основой содержания является популярное (не для специалистов по гравитационной физике) изложение теоремы о неизбежности сингулярности при коллапсе, за которую была присуждена премия 2020-го года.

Существует несколько физических причин для изучения моделей с нелинейной реализацией конформной симметрии. Теории ранней Вселенной связаны с конформной симметрией. Например, инфляция может возникать из-за спонтанного нарушения конформной симметрии – процесса, аналогичного механизму Хиггса при построении объединенных теорий физических взаимодействий. Такой подход, в перспективе, указывает на интересную возможность получить единое описание как инфляционного, так и постинфляционного расширения в рамках единой модели с реализованной нелинейной конформной симметрией. В полном соответствии с теоремой Голдстоуна, если конформная симметрия нарушается, соответствующая модель развивает новые массивные и безмассовые степени свободы. Если конформная симметрия нарушена до группы Лоренца размерности десять, можно попытаться связать десять соответствующих безмассовых мод Голдстоуна с десятью компонентами метрического тензора. Массивные компоненты, в свою очередь, могут быть связаны с полем инфлатона, а его масса определит масштаб инфляции. Поэтому выделяются два перспективных направления исследования. Первый – это поиск моделей с нелинейной реализацией конформной симметрии, которые содержат, по крайней мере, одну скалярную степень свободы, и проверку ее возможности создать инфляцию. Другое направление – проверить, имеет ли данная модель с реализацией нелинейной симметрии безмассовые степени свободы спина 2, которые могут быть связаны с гравитонами.

В рамках этого направления нами рассмотрены несколько моделей с конкретными реализациями нелинейной конформной симметрии, предложенными ранее в работах Арбузова и Латоша. Первые результаты были получены в прошлом году (но опубликованы в этом). Мы расширяем рассмотрение, начатое ранее, и показываем, 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 состоит в том, что в уже предложенных моделях 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 в этой модели означает, что, к сожалению, ее нельзя использовать в реалистичных космологических сценариях. Следовательно, наш вывод существенно сужает набор таких теорий. Далее, обсуждаемая модель соответствует ведущему пертурбативному порядку, то есть трехуровневому. Отметим, что инфляция Старобинского про-

исходит из-за радиационных поправок. Поэтому, мы полагаем, что тот факт, что инфляция отсутствует на уровне древесного приближения, важен сам по себе (С.О. Алексеев, Б.Н. Латош, Д. Кричевский, статья на рецензии).

Более 100 лет назад первые решения типа черной дыры были получены теоретически, а в настоящее время существование этих объектов доказано множеством наблюдательных тестов. Динамика двойных систем, результаты гравитационно-волновой астрономии, прямые изображения теней черных дыр с телескопа горизонта событий – самые известные примеры. Общая теория относительности описывает почти все астрономические данные с большой точностью. Между тем, некоторые проблемы, такие как темная материя, темная энергия, эволюция ранней Вселенной, квантовая гравитация и так далее, еще не разрешены. Поэтому для объяснения этих явлений разрабатываются новые гравитационные модели. К этим новым моделям гравитации, расширяющим ОТО, относятся, например, скалярно-тензорные теории, включая общий случай с полевыми уравнениями второго порядка: теория Хорндески, модели гравитации с конформной симметрией, петлевая квантовая гравитация и многие другие. Представляется важным ограничить эти подходы максимально широким диапазоном параметров, и изучение окрестностей черных дыр предоставляет такую возможность благодаря достижениям в области построения теневых изображений.

Поскольку экспериментальное оборудование дает любую величину с ошибками, каждый экспериментальный результат делает возможными альтернативные объяснения на основе разных теорий. На первом этапе обычно выбирается самая простая модель. Дальнейшие данные позволяют выбрать основную теорию для объяснения. Далее, необходимо принять во внимание эффекты от следующих порядков теории возмущений. Таким образом, размер тени – это первый результат ЕНТ, в нашей работе используется для оценки предсказаний модели.

Ранее мы обсуждали моделирование тени, последнюю стабильную орбиту и расчеты сильного гравитационного линзирования в случае, когда учитывается третье приближение в сферически-симметричном пространстве-времени. Такие метрики представляют собой продолжение метрики Рейсснера-Нордстрема следующим порядком расширения. Отметим, что результаты наблюдений размера тени, последней стабильной орбиты, сильного гравитационного линзирования могут быть использованы для корректировки вида метрических расширений. Поэтому нами рассчитано распределение интенсивности фона для тени ЧД, в том числе, когда обратное значение метрической функции при радиальной компоненте не совпадает по модулю с обратным значением метрической функции при временной компоненте. Нами уже рассмотрены характеристики теней в приложениях к метрике черной дыры в теории Хорндески с инвариантом Гаусса-Бонне, в модифицированной метрике Хейворда и в новой массивной конформной гравитации. Разрешение первых изображений ЧД с ЕНТ было не очень высоким и составляло около половины размера объекта. Дальнейшее совершенствование наземной техники позволило повысить разрешающую способность лишь в несколько раз (не на порядки). Уже достигнут максимально возможный размер наземной базовой радиотелескопической системы. Как уже было продемонстрировано нами ранее и развито в отчетном году, ограничение расширенных моделей гравитации требует повышения точности на несколько порядков, чем было достигнуто. Поэтому необходимо сделать

следующий шаг и использовать спутники. Причем измерения размера тени самого по себе достаточно только для теорий, основанных на метрике Рейсснера-Нордстрема. Для теорий с более сложной метрикой черной дыры количество точек наблюдения должно быть увеличено. В случае измерения последней устойчивой орбиты, сильного гравитационного линзирования ярких звезд и распределения интенсивности теневого фона минимально необходимое разрешение составляет 0,001 размера тени для дополнительных коэффициентов, совместимых с массой черной дыры. Поэтому более перспективным представляется изучение тени от быстро вращающегося объекта. При тех же значениях дополнительных коэффициентов требуемое разрешение составляет около 0,01 размера тени. Подчеркнем, что подход без учета вращения черной дыры актуален только тогда, когда скорость ее вращения мала и ей можно пренебречь. Сам по себе учет вращения увеличивает количество данных, необходимых для различения различных расширенных гравитационных моделей, но снижает требования к точности наблюдений. Статья находится в процессе подготовки к отправке в журнал.

Аналитически построены области стабильности для найденных ранее космологических решений в многомерной космологии, реализующих сценарий динамической компактификации. В предыдущих наших работах был построен сценарий динамической компактификация в многомерной космологии при наличии отрицательной кривизны в пространстве дополнительных измерений и члена Гаусса-Бонне в действии для гравитационного поля. Однако жизнеспособность этого сценария ранее показывалась только путем численного интегрирования соответствующих уравнений движения. В настоящей работе мы провели аналитический анализ условий существования и стабильности решений со спонтанной компактификацией. Было показано, в частности, что если компактификационное решение существует, то оно стабильно. Поэтому для реализации данного сценария не требуется «тонкая подстройка» констант теории. Было также показано, что аналогичный сценарий существует и для положительной пространственной кривизны в дополнительных измерениях. Однако в этом случае условия стабильности не выполняются автоматически и накладывают существенные ограничения на возможные значения констант теории. Это может объяснить, почему данная возможность не была обнаружена ранее в численных экспериментах. Получены условия существования и стабильности статического космологического решения в квадратичной гравитации. Из более ранних работ других авторов уже было известно, что в квадратичной гравитации статическое космологическое решение существенно меняется. В частности, был известен тот интересный факт, что при определенных условиях оно может быть стабильным. Однако в этих работах было упущено еще одно интересное свойство статического решения. В то время, как в ОТО для его существования требуется как минимум два разных типа материи (если считать за материю и космологическую постоянную, присутствующую в наиболее известной версии статического решения, полученного Эйнштейном), то в квадратичной гравитации для существования такого решения достаточно одного вида материи. Мы приводим условия существования и стабильности такого решения как в гравитации с квадратичными поправками по кривизне, так и в общем случае квадратичной гравитации, где учитываются возможные поправки пропорциональные квадрату тензора Риччи. В обоих случаях возможны стабильные решения, причем необходимая для

их существования материя оказывается подчиняющейся сильному энергетическому условию. Более того, статичные решения в квадратичной гравитации существуют и при отрицательной кривизне пространства, однако в этом случае они всегда нестабильны.

Получены области в пространстве начальных условий, приводящие к достаточной инфляции в модифицированной гравитации с неминимальной кинетической связью скалярного поля. Известно, что неминимальная кинетическая связь скалярного поля позволяет реализовать некоторые инфляционные сценарии, невозможные как для минимально связанного скалярного поля, так и для классического неминимально связанного скалярного поля. В частности, в такой модели возможна инфляция на кинетическом члене, вообще без потенциала. Мы, однако, показываем, что для того, чтобы обеспечить необходимую длительность инфляционной стадии в такой теории приходится стартовать с экспоненциально больших значений производной скалярного поля по времени.

В течение последнего года Дядина П.И. совместно с Лабазовой С.П. исследовала параметризованный постньютоновский формализм в применении к массивным скалярно-тензорным теориям гравитации. Как результат проделанной работы была вычислена задержка Шапиро для гибридной метрической-Палатини $f(R)$ -гравитации, а также показана эквивалентность получения ограничений на массивные скалярно-тензорные теории методами 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. Изначально параметризованный постньютоновский формализм (ППН) был разработан как способ единообразного сравнения теорий гравитации друг с другом и с экспериментом. Этот формализм предполагает возможность представления метрики любой метрической теории гравитации в определенной форме таким образом, чтобы метрика содержала только постньютоновские параметры и постньютоновские потенциалы. Потенциалы не меняются от теории к теории, в то время как набор из 10 ППН параметров будет уникальным для каждой теории гравитации. Более того, все ППН параметры могут быть получены экспериментально. Благодаря этому становится возможной эффективная проверка гравитационных теорий. Стоит отметить, что ППН формализм был изобретен для теорий без массивных полей. В случае массивных скалярно-тензорных теорий гравитации возникает неоднозначность в отношении применения к ним ППН формализма. Основная проблема такого подхода заключается в том, что в массивных теориях гравитации, помимо классических постньютоновских потенциалов присутствуют потенциалы Юкавы. Таким образом, в ППН метрике появляются дополнительные члены, которые нельзя включить в ППН метрику в ее оригинальной форме. Становится необходимым изменить вид ППН параметров и ввести в них зависимость от расстояния (тогда как в классическом ППН формализме ППН параметры всегда являются постоянными), чтобы ППН потенциалы сохранили свой неизменный вид. И тогда возникает вопрос, будут ли эти модифицированные ППН параметры иметь тот же физический смысл, что и в классическом ППН формализме? Будут ли они определены одними и теми же экспериментами? Рассматривается ответ на этот вопрос на примере единственного ППН параметра γ . Этот параметр имеет определенный фи-

зический смысл в классическом ППН формализме: он отвечает за эффект отклонения света в поле массивного объекта. В случае безмассовых теорий этот параметр входит в уравнение нулевой геодезической. Главный вопрос заключается в том, совпадает ли параметр, стоящий в уравнении нулевой геодезической в массивных теориях гравитации, с ППН параметром γ . Другой вопрос, будут ли такие теории предсказывать величину задержки Шапиро, отличную от общей теории относительности. Этот вопрос уже исследовался в контексте массивных скалярно-тензорных теорий. Наиболее известной скалярно-тензорной теорией является теория Бранса-Дике. Сейчас большой интерес представляет массивная версия этой теории, которая рассматривается как один из способов описания ускоренного расширения Вселенной. Ранее в массивной версии теории Бранса-Дике и был получен параметр γ методами ППН формализма. Было обнаружено, что параметр γ зависит не только от модельных параметров теории, но и от радиального расстояния от Солнца. С другой стороны, для данной модели был получен вид задержки Шапиро и показано, что параметр в уравнении нулевой геодезической (который соответствует параметру γ для безмассовых теорий) будет зависеть от расстояния. С другой стороны, в литературе присутствует пример вычисления задержки Шапиро в массивной теории Бранса-Дике, в котором показано, что невозможно различить массивные скалярно-тензорные теории гравитации и общую теорию относительности по предсказаниям отклонения света в гравитационном поле Солнца и по результатам эксперимента Кассини. Помимо теории Бранса-Дике, в гравитации Хорндески отклонение света также рассчитывалось двумя способами. Был найден явный вид параметра γ и методами постньютоновского формализма, и с использованием вычисления задержки Шапиро. Были получены одинаковые результаты в обоих случаях. В своей работе мы показали эквивалентное соответствие между параметром γ и параметром, входящим в уравнение нулевой геодезической для еще одной массивной скалярно-тензорной теории. Нами была рассмотрена гибридная метрическая-Палатини $f(R)$ -гравитация, которая может быть представлена как массивная скалярно-тензорная теория. Более того, нами было показано, что массивные скалярно-тензорные теории и общая теория относительности предсказывают разные результаты, касающиеся величины задержки Шапиро в гравитационном поле массивного объекта. 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 из этих модифицированных воздействий: метрический и метод Палатини. В метрическом подходе метрика – единственная динамическая переменная. В методе Палатини символы Кристоффеля определяются как независимые от метрики переменные. Таким образом, вариации по метрике и символам Кристоффеля выполняются независимо. Кроме того, метод Палатини приводит к уравнениям поля второго порядка, тогда как в метрическом подходе эти уравнения имеют четвертый порядок. 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.

Ранее в одной из наших работ было показано, что наличие легкого скалярного поля в гибридной $f(R)$ -гравитации не противоречит экспериментальным данным из Солнечной системы. Данный вывод основывается не только на 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 своем исследовании мы поставили два вопроса: совпадает ли параметр, стоящий в уравнении нулевой геодезической в массивных скалярно-тензорных теориях гравитации с ППН параметром γ и будут ли такие теории предсказывать величину задержки Шапиро тождественно равную данной величине в общей теории относительности. Данные вопросы мы пытались разрешить на примере гибридной метрической-Палатини $f(R)$ -гравитации, которую можно представить как массивную скалярно-тензорную теорию. В рамках рассмотренной теории нами было показано, что постньютоновский параметр γ , вычисляемый непосредственно из постньютоновской метрики, равен параметру, полученному из выражения для задержки Шапиро. Следовательно, в случае гибридной $f(R)$ -гравитации параметры идентичны. Кроме того, в данной работе впервые была получена временная задержка Шапиро в гибридной $f(R)$ -гравитации. Также мы рассмотрели приведенные в литературе результаты для массивной теории Бранса-Дике и для теории Хорндески.

На основании проделанной нами работы мы сделали вывод, что как безмассовые, так и массивные скалярно-тензорные теории можно отличить от ОТО на основе данных об отклонении света в гравитационном поле Солнца. Кроме того, 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. Эта работа является первым шагом в получении универсального аппарата для проверки гравитационных теорий с массивными полями в пределе слабого поля в качестве аналога оригинального ППН формализма, применимого для безмассовых полей. По результатам работы статья P. I. Dyadina, S. P. Labazova «On Shapiro time delay in massive scalar-tensor theories» была отправлена в JCAP

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

Была опубликована в Астрономическом журнале статья «Релятивистские редукиции в измерениях расстояния между космическими аппаратами с пикометровой точностью». В данной работе был рассмотрен околосолнечный гравитационный эксперимент, в котором пара спутников обменивается лазерными сигналами. В качестве конкретного примера для проведения численных оценок использовалась конфигурация спутников в миссии GRACE-FO. Получено выражение для фазы сигнала, обеспечивающее точность в

1 пикометр при вычислении расстояния между спутниками. Рассмотрено влияние на распространение сигнала всех существенных гравитационных эффектов, таких как гравитация Земли и приливные поля Солнца, Луны и других небесных тел. Особое внимание уделено исследованию вкладов гармоник потенциала Земли. При этом показано, что для обеспечения пикометровой точности в расстоянии между спутниками необходимо учитывать вклады порядка сотни гармоник гравитационного потенциала Земли. Рассмотрены возмущения фазы первого и второго порядков (при разложении по степеням гравитационной постоянной) и показано, что влияние поправок второго порядка лежит за пределами точности в 1 пм. Это позволило представить выражение для фазы сигнала в достаточно компактном виде.

Готовится к публикации статья «Наблюдаемые величины при лазерной интерферометрии для измерения расстояния между КА с пикометровой точностью», являющаяся продолжением описанной выше работы. Полученные результаты позволили нам вывести высокоточные соотношения между временем излучения сигнала на главном спутнике и временем приема этого сигнала, возвращающегося обратно после переизлучения вторым спутником. С помощью этих соотношений становится возможным выразить наблюдаемые величины в виде функций от времени приема обратного сигнала. Основной наблюдаемой величиной в эксперименте типа GRACE-FO является разность между фазой осциллятора, колеблющегося с высокой стабильностью на борту главного спутника, и фазой сигнала, совершившего путешествие до второго спутника и обратно. Другой наблюдаемой величиной является темп изменения такой разности фаз. Эти величины могут быть измерены с очень большой точностью с помощью лазерной интерферометрии, они используются в продолжающейся миссии GRACE-FO и позволяют говорить в ней о точности измерения расстояния между спутниками на уровне 1 нанометра. Наша текущая работа по этой теме состоит в повышении точности в формулировке таких наблюдаемых величин на несколько порядков, до 1 пикометра в расстоянии, что отвечает будущим требованиям для возросшей точности эксперимента.

Для корректной формулировки таких наблюдаемых величин было рассмотрено поведение бесконечно малой порции оптического сигнала, испущенного осциллятором на борту главного спутника. Такая порция сигнала излучается по направлению ко второму спутнику и переизлучается им с неким (известным) сдвигом частоты обратно к родительскому спутнику. Анализ и сравнение времен излучения, переизлучения и поглощения позволяет получить соотношение между бегущей фазой на главном осцилляторе и фазой возвращающейся к нему волны, совершившей путешествие до второго спутника и обратно. Сравнение моментов и интервалов времени делается нами с необходимой точностью и с учетом существенных релятивистских эффектов. Преобразование между собственным временем спутника и координатным геоцентрическим временем делается на основе соответствующих рекомендаций МАС. Полученная разность фаз и ее производная по времени являются наблюдаемыми величинами, они уже измеряются в миссии GRACE-FO и могут быть инструментом для измерения гравитационного поля в других аналогичных околоземных миссиях. Для практического их использования в программах обработки эксперимента необходима большая предварительная работа по приведению всех входящих в формулы величин к единому моменту времени. Такая работа была нами успешно проделана,

ее результаты находятся на завершающей стадии подготовки к публикации.

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

М.В. Сажиним, О.С. Сажиной, С.О. Алексеевым был написан ряд рецензируемых статей в области космологии, в т.ч. за 2021 год: «Стандартная свеча», «Ускоренное расширение современной Вселенной», «Мачо-объекты», «Вимп-частица», «Реликтовое излучение» и др. Первый релиз Портала планируется на март 2022 г.

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, в частности, по релятивистским редукциям в ближнем космосе и теории черных дыр, 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 поиску космических струн и изучению ближней Вселенной являются актуальными и приоритетными, они выполнены на высоком научном уровне и востребованы научной общественностью, свидетельством чего является высокая цитируемость работ, выполненных по теме современная космология и теория релятивистского гравитационного поля по этому пункту.

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 2021 году
Таблица А.1

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