

АННОТАЦИЯ

Диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
6D060400-ФИЗИКА

ЕРГАЛИЕВА ГУЛЬМИРА ТЕМИРЕШЕВНА

Обобщенные модели теории гравитации и черных дыр

Актуальность темы. Современная космология и физика гравитации характеризуются фундаментальными задачами, направленными на объяснение крупномасштабной эволюции Вселенной, физической природы ее ускоренного расширения, а также экстремальных свойств черных дыр. Высокоточные наблюдательные данные, полученные за последние десятилетия, включая космический микроволновой фон (СМВ - Cosmic Microwave Background), сверхновые типа Ia (SN Ia – Type Ia supernovae), барионные акустические колебания (BAO - Baryon Acoustic Oscillations) и результаты гравитационного линзирования, несмотря на подтверждение многочисленных успехов стандартной космологической модели Λ CDM, выявили наличие ряда нерешенных проблем. Одной из наиболее значимых среди них является несоответствие значений постоянной Хаббла, полученных при высоких и низких красных смещениях, известное как напряжение Хаббла.

В целях объяснения указанной проблемы активно исследуются модифицированные теории гравитации и альтернативные космологические модели. Одним из таких подходов является квазистационарная космология (QSSC – Quasi Steady State Cosmology), основанная на колебательном характере масштабного фактора Вселенной. Данная модель отличается отсутствием начальной сингулярности и способностью феноменологически описывать динамику Вселенной на поздних этапах ее эволюции. В рамках QSSC колебательная временная эволюция параметра Хаббла может приводить к увеличению его значения при низких красных смещениях, что рассматривается как возможный механизм ослабления напряжения Хаббла.

Наряду с космологическими аспектами, исследование геометрических, оптических и термодинамических свойств черных дыр является одним из важнейших инструментов проверки теорий гравитации. Прямое наблюдение теней сверхмассивных черных дыр $M87^*$ и $Sgr A^*$ в рамках проекта Event Horizon Telescope открыло новые возможности для сопоставления теоретических моделей с астрофизическими данными. В этом контексте анализ черных дыр в пространствах-временах с дополнительными измерениями, а также несингулярных моделей черных дыр, представляет собой особо актуальное направление современных исследований.

Цель диссертационного исследования. Диссертационное исследование направлено на изучение возможности феноменологического ослабления напряжения постоянной Хаббла на основе квазистационарной космологической модели QSSC, а также на комплексный анализ характеристик тени пятимерных

черных дыр Рейснера-Нордстрема-анти-де-Ситтера (RN-AdS₅) и геометрических и термодинамических свойств несингулярных черных дыр типа Бардина и Бардина-Янг-Миллса в рамках гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне (ЭГБ).

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения работы решались следующие задачи:

1. Анализ колебательного характера эволюции Вселенной в рамках модели QSSC и оценка возможности феноменологического ослабления напряжения параметра Хаббла между значениями, полученными при высоких красных смещениях (CMB/Planck) и при низких красных смещениях на основе наблюдательных данных (OHD – Observational Hubble Data, SN Ia, BAO).

2. Расчет тени черной дыры RN-AdS₅ в p в плазменной и вакуумной средах определение влияния заряда, космологической постоянной и параметров плазмы на радиус тени, а также качественное сопоставление полученных характеристик тени с наблюдательными данными для сверхмассивных черных дыр *M87** и *Sgr A**.

3. Исследование термодинамических свойств и критических явлений стационарного решения черной дыры типа Бардина в рамках гравитации ЭГБ.

4. Получение стационарного решения черной дыры Бардина-Янг-Миллса и анализ ее структуры горизонта, термодинамических свойств, а также отклонений от закона площади Бекенштейна-Хокинга.

5. Статистическая оценка параметров модели QSSC путем сопоставления с современными наблюдательными данными с использованием метода Монте-Карло Марковских цепей.

Объектами исследования являются квазистационарная космологическая модель QSSC и колебательная природа параметра Хаббла; тень черной дыры RN-AdS₅ и нулевая геодезическая динамика; термодинамические и фазовые свойства черной дыры Бардина в рамках гравитации ЭГБ; геометрические и термодинамические характеристики черной дыры Бардина-Янга-Миллса.

Методы исследования. Аналитические методы (метрика Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера, уравнения Эйнштейна и ЭГБ, уравнения нулевых геодезических), численные методы (статистический анализ на основе MCMC), геометрическо-оптические методы (моделирование тени черной дыры), термодинамический анализ.

Научная новизна включает следующие основные результаты:

1. Показана способность космологической модели QSSC ослаблять напряжение Хаббла на основе количественного анализа колебательного характера масштабного фактора и комплексного исследования с использованием MCMC. На основании наблюдательных данных OHD, Pantheon (SN Ia) и BAO выполнена калибровка параметров модели (α, β, η, h) , в результате чего установлена согласованность с наблюдениями при низких красных смещениях на уровне 1σ . Полученные результаты показывают, что модель QSSC естественным образом воспроизводит фантомоподобное состояние эффективной темной энергии ($\omega_{DE}(0) < -1$) без введения дополнительных полей и асимптотически соответствует космологии Λ CDM при высоких красных

смещениях.

2. Тень черной дыры RN-AdS₅ всесторонне проанализирована в плазменной и бесплазменной средах, при этом выполнено полное параметрическое исследование влияния заряда q , космологической постоянной Λ и параметров плазмы на радиус тени. Полученные результаты качественно сопоставлены с наблюдательными данными для сверхмассивных черных дыр M87* и Sgr A*.

3. Термодинамические свойства черной дыры Бардина в рамках гравитации ЭГБ проанализированы в полном параметрическом виде; определены теплоемкость, энергия Гиббса и критические явления в $P-V$ расширенном фазовом пространстве. Структура фазовых переходов детально исследована в расширенном фазовом пространстве $P-V$, где термодинамическое поведение черной дыры проявляет Ван дер Ваальсовские характеристики, типичные для пространств анти-де-Ситтера.

4. На основе стационарного решения черной дыры Бардина-Янг-Миллса выполнен комплексный анализ структуры горизонта, термодинамических величин (температуры, энтропии, теплоемкости) и интенсивности излучения. Установлено влияние нелинейной электродинамики и поля Янга-Миллса на формирование несингулярных свойств черной дыры.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 30 рисунков, 165 формул, 23 таблицы, 203 наименования литературы, 98 страниц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Колебательное решение масштабного фактора в модели QSSC.

Показано, что колебательный характер масштабного фактора в модели QSSC приводит к увеличению параметра Хаббла $H(t)$ вблизи современной эпохи, естественным образом формирует фантомоподобное состояние эффективной темной энергии $\omega_{DE}(0) < -1$ и согласуется со значениями H_0 полученными при низких красных смещениях, на уровне 1σ . Проведенный на основе наблюдательных данных OHD, Pantheon (SN Ia) и BAO анализ методом MCMC подтверждает, что колебательный механизм в модели QSSC феноменологически ослабляет напряжение параметра Хаббла и асимптотически согласуется с космологией Λ CDM при высоких красных смещениях.

2. Тень черной дыры RN-AdS₅.

Для заряженной черной дыры RN-AdS₅ аналитически получены радиус фотонной сферы и радиус тени. Показано, что в вакууме радиус тени уменьшается с ростом заряда q и космологической постоянной Λ , тогда как в плазменной среде он увеличивается при возрастании заряда q и параметра плазмы k . Полученные результаты качественно согласуются с наблюдательными данными о тенях сверхмассивных черных дыр M87* и Sgr A*.

3. Черная дыра Бардина в гравитации ЭГБ.

В рамках гравитации ЭГБ получено точное решение несингулярной черной дыры типа Бардина, связанное с нелинейной электродинамикой.

Ограниченность кривизных инвариантов во всей области пространства-времени свидетельствует об отсутствии сингулярности. В расширенном фазовом пространстве выявлены термодинамические характеристики, аналогичные системе Ван дер Ваальса: фазовый переход первого рода, критическая точка и критические показатели, соответствующие теории среднего поля

$$\alpha = 0, \quad \beta = \frac{1}{2}, \quad \gamma = 1, \quad \delta = 3.$$

4. Обобщенное решение черной дыры Бардина-Янг-Миллса.

Получено новое статическое сферически-симметричное решение черной дыры Бардина-Янг-Миллса, объединяющее нелинейную электродинамику и поле Янга-Миллса. Данное решение воспроизводит метрики Бардина ($v=0$), Янга-Миллса ($g=0$) и Шварцшильда ($v=0, g=0$) в предельных случаях. Ограниченность кривизных инвариантов подтверждает отсутствие центральной сингулярности. В результате термодинамического анализа установлено нарушение закона площади Бекенштейна-Хокинга, обусловленное нелинейными полевыми эффектами, а также выявлены области устойчивости и фазовый переход, связанный с максимальной температурой.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии во всех этапах исследования: выводе уравнений поля, аналитическом анализе геометрических и термодинамических свойств, выполнении численных расчетов, сравнении модели QSSC с данными и интерпретации результатов. Все ключевые аналитические выводы и МСМС-расчеты выполнены лично автором.

Апробация работы. Результаты доложены на конференциях: «Gylym jane bilim-2019» (Астана, 2019), II конференция Казахского физического общества (Алматы, 2019), VI международная конференция «Роль физико-математических наук в современном образовательном пространстве» (Атырау, 2021).

Опубликовано 10 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах **WoS/Scopus**:

- *Physics of the Dark Universe* (2023, IF 5.8, Q1);
- *International Journal of Modern Physics A* (2023, IF 1.3, Q3);
- *European Physical Journal Plus* (2023, IF 2.9, Q2);
- *Annals of Physics* (2023, IF 3.0, Q2);

а также 1 статья в рекомендуемом журнале КОКСНВО МНВО РК и 5 материалов конференций.

Связь с планами научно-исследовательских работ. Работа выполнена в рамках двух бюджетных проектов МОН РК:

«Исследование эволюции Вселенной на основе обобщенных теорий гравитации» (AP09261147, 2021-2023);

«Исследование космологии метрико-аффинной теории гравитации» (AP09058240, 2021-2023).

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для уточнения геометрических и термодинамических характеристик несингулярных моделей черных дыр, а также для оценки влияния физических параметров

(составляющих полей, заряда, массы, космологической постоянной) на их свойства. Калибровка параметров модели QSSC на основе современных наблюдательных данных предоставляет феноменологический механизм интерпретации напряжения постоянной Хаббла. Результаты, связанные с фотонной сферой и радиусом тени черных дыр RN-AdS₅ и типа Бардина, могут быть использованы при сопоставлении теоретических моделей с астрофизическими наблюдениями сверхмассивных черных дыр (*M87**, *Sgr A**), а также в дальнейших исследованиях в области космологии и физики гравитации.