

МУСАТАЕВА АСЕМ БОЛАТБЕКОВНА

«Параметризация космологических параметров и наблюдательные ограничения моделей темной энергии и модифицированной гравитации»

АННОТАЦИЯ

диссертации из серий статей, представленной на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности
«6D060400 - Физика»

Актуальность темы. Современная космология опирается на стандартную модель Большого взрыва, согласно которой Вселенная возникла примерно 13,8 миллиарда лет назад из состояния с крайне высокой плотностью и температурой. Эта модель хорошо согласуется с ключевыми наблюдательными данными, такими как расширение Вселенной, обилие легких элементов, космическое микроволновое фоновое излучение и крупномасштабную структуру Вселенной, реликтовое излучение. Однако, открытие в 1998 году ускоренного расширения Вселенной, основанное на наблюдениях сверхновых типа Ia, поставило перед наукой новую фундаментальную задачу — объяснение природы тёмной энергии, которая, предположительно, составляет около 70% от всей энергии во Вселенной. Одним из наиболее эффективных инструментов является параметризация космологических величин — таких как параметр уравнения состояния, параметр замедления, а также диагностические параметры и другие. Использование различных форм параметризаций позволяет проследить эволюцию тёмной энергии и отличить альтернативные модели от Λ CDM. На сегодняшний день в распоряжении исследователей имеется богатый массив высокоточных наблюдательных данных, таких как сверхновые Pantheon+, данные космических хронометров, барионные акустические осцилляции, данные миссии Planck, результаты спектроскопических обзоров DESI и др. Эти данные открывают возможность наложения жёстких ограничений на параметры моделей и позволяют тестировать динамику расширения Вселенной с большой точностью. Особенно важным в этом контексте является использование статистических методов, таких как байесовский анализ, метод цепей Маркова, Монте-Карло и информационные критерии Акаике и Байеса.

Наиболее простое объяснение этого ускорения - космологическая постоянная Λ в рамках Λ CDM-модели. Однако данная модель сталкивается с рядом теоретических и наблюдательных проблем, включая так называемую проблему "тонкой настройки" и расхождение в оценке постоянной Хаббла, полученной по данным ранней и поздней Вселенной. Эти обстоятельства стимулируют интерес к альтернативным подходам — в первую очередь, к модифицированным теориям гравитации, таким как $f(R)$, $f(T)$, $f(R,T)$, $f(Q,T)$, $f(G)$, $f(Q)$, а также их обобщениям, в которых гравитационное действие расширяется за счёт новых геометрических компонентов материи. Особую значимость приобретают теоретические модели, в которых тёмная энергия рассматривается как следствие геометрических свойств пространства-

времени, а не как самостоятельная энергетическая компонента. Такие модели позволяют по-новому взглянуть на природу ускоренного расширения и выйти за пределы стандартной космологической парадигмы. Однако, для оценки их состоятельности необходимо сопоставление с наблюдательными данными, что требует разработки универсальных методов анализа.

Цель работы. Исследовать космологическую эволюцию во Вселенной в рамках модифицированных теорий гравитации, основанных на $f(Q)$ теории и теории телепараллельной модели Гаусса–Бонне, с применением методов параметризации, а также провести сравнительный анализ наблюдательных ограничений данных моделей с использованием современных астрофизических наблюдений для оценки их физической состоятельности и соответствия полученным данным.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка и анализ параметризации эффективного параметра уравнения состояния в рамках теории симметричной телепараллельной гравитации $f(Q)$, использующей модель $f(Q) = \beta Q^{(m+1)}$, для получения космологического решения параметра Хаббла $H(z)$ и оценки ускоренного расширения Вселенной с последующим ограничением параметров модели на основе наблюдательных данных (OHD, BAO, SNe-Ia) и анализа устойчивости модели.

2. Изучение космологической эволюции в рамках модифицированной гравитации $f(Q)$, основанной на скаляре неметричности, путем применения схемы параметризации параметра Хаббла для получения точного решения уравнений поля, ограничения параметров модели с использованием наблюдательных данных (57 точек Hubble, 1048 точек SN, 6 точек BAO) и анализа эволюции космологических параметров, включая параметр замедления, плотность энергии и параметр уравнения состояния.

3. Разработка и применение подхода параметризации к параметру Хаббла в рамках модифицированной телепараллельной гравитации Гаусса–Бонне $f(T, T_G)$, основанной на инварианте кручения T и телепараллельном эквиваленте члена Гаусса–Бонне T_G , для объяснения космологической эволюции от ранней инфляции до позднего ускоренного расширения без космологической постоянной, с ограничением переходного красного смещения z_t и сравнением параметров $q(z)$ и $w(z)$ с моделью Λ CDM на основе комбинированных данных (SNe-Ia+BAO+CMB+ $H(z)$).

Объекты исследования. Космологические параметры (в частности, параметр Хаббла, параметр замедления, параметр уравнения состояния), характеризующие динамику расширения Вселенной; модифицированные теории гравитации, включая $f(Q)$ -гравитацию и модифицированную телепараллельную теорию Гаусса–Бонне; параметризационные схемы, применяемые к космологическим моделям для описания эволюции Вселенной; современные наблюдательные данные (наблюдения сверхновых типа Ia, барионные акустические осцилляции, космическое микроволновое фоновое излучение, данные по $H(z)$), используемые для ограничения параметров моделей.

Методы исследования. Аналитическое решение уравнений, вариационные методы, построение и сравнительный анализ моделей модифицированной гравитации, обработка астрофизических данных,

статистическая подгонка теоретических моделей под наблюдательные данные, оценка параметров космологических моделей, выбор наилучшей модели с учётом числа параметров и качества аппроксимации, применение численного моделирования, т.е. симуляции расширения Вселенной или структуры на больших масштабах.

Основные положения, выносимые на защиту. На основе результатов исследования можно выделить следующие ключевые положения, которые выносятся на защиту:

1. Получены оптимальные значения $H_0 = 65.9 \pm 1.3$ км/с/Мпк, $q_0 = -0.38 \pm 0.06$, $z_{tr} = 0.68 \pm 0.01$ и $\omega_0 = -0.59^{+0.04}_{-0.04}$, что подтверждает точное воспроизведение эволюции Вселенной от фазы замедления к ускоренному расширению и согласованность модели с современными наблюдениями, в рамках модифицированной теории гравитации $f(Q)$ с параметризацией параметра Хаббла, используя данные $H(z)$, SN-Ia и ВАО.

2. Доказано, что параметризация эффективного параметра уравнения состояния $\omega_{eff} = -1 + \frac{A}{A+B(1+z)^{-3}}$ с оценками $A = 0.342 \pm 0.022$, $B = 0.677 \pm 0.025$ и $m = 0.013 \pm 0.021$, на основе данных наблюдений параметров Хаббла, барионные акустические колебания и данных о сверхновых типа Ia, демонстрирует смену динамики Вселенной от замедленного к ускоряющемуся режиму с текущим значением EoS $\omega_0 = -0.91^{+0.08}_{-0.08}$ и переходным красным смещением $z_{tr} = 0.60 \pm 0.02$, что соответствует современным наблюдениям и подтверждает состоятельность модели.

3. Открыты квинтэссенциальная природа тёмной энергии путем проведения байесовского анализа космологической модели в модифицированной теории гравитации $F(T, T_G)$, показавший её согласованность с наблюдательными данными ($\gamma = 0.62501$, $\beta = 0.67364$, $q_0 = -0.45015$, $\omega \approx -1$ при $z \rightarrow 0$), воспроизведение значения H_0 , близкого к Planck, описание перехода от замедленного к ускоренному расширению и соответствие нулевой и доминантной энергетическим условиям при нарушении сильного энергетического условия.

Описание основных результатов исследования.

Обоснование новизны и важности полученных результатов.

Модель $f(Q)$ гравитации предлагает конкурентоспособное объяснение ускоренного расширения Вселенной без космологической постоянной, открывая новые пути для решения проблемы тёмной энергии. Научная новизна включает следующее:

1. Впервые применена параметризация эффективного уравнения состояния $\omega_{eff} = -1 + \frac{A}{A+B(1+z)^{-3}}$ с моделью $f(Q) = \beta Q^{(m+1)}$ и Хаббловским параметром $H(z) = H_0 \left(\frac{m + (1+z)^n}{m+1} \right)^{\frac{3}{2n}}$. Это позволило получить аналитические

решения для космологических параметров, описывающих эволюцию Вселенной от эпохи доминирования материи до будущего, что ранее не исследовалось в контексте $f(Q)$ гравитации. Использование комбинированных данных ОНД, ВАО и SNe с методом МСМС для

ограничения параметров ($H_0 = 65.9_{-1.3}^{+1.3}$ км/с/Мпк, $m = 1.43_{-0.23}^{+0.25}$, $n = 2.04_{-0.27}^{+0.27}$) обеспечивает высокую точность и новаторский подход в $f(Q)$ гравитации.

Используя ограниченные значения A , B и m из комбинированных данных OHD+BAO+SNe, мы проанализировали поведение параметра плотности, параметра уравнения состояния и параметра замедления как функции красного смещения.

2. Впервые проведён анализ линейных возмущений, показавший стабильность модели (затухание $\delta(z)$, $\delta_m(z)$). Диагностика $Om(z)$ с отрицательным наклоном подтверждает квинтэссенциоподобное поведение, а statefinder (r, s) показывает эволюцию к Λ CDM, что ново для $f(Q)$ гравитации.

Проведён анализ параметров statefinder и диагностики Om , а также их сравнение с моделью Λ CDM. Описанная модель представляет собой простое объяснение поведения космической эволюции в поздней Вселенной в рамках модифицированной гравитации. Она демонстрирует поведение, подобное квинтэссенции, в настоящее время и хорошо соответствует некоторым наблюдательным данным, что делает нашу модель подходящей альтернативой стандартной космологии.

3. Модель с формой $f(Q) = -Q + \frac{\alpha}{Q}$ объясняет ускоренное расширение, воспроизводя квинтэссенциальное поведение ($\omega_0 = -0.59_{-0.04}^{+0.04}$) и переход от замедленного к ускоренному расширению ($z_r = 0.68 \pm 0.01$). Проверка условий слабое энергетическое условие, нулевое энергетическое условие, доминантное энергетическое условие (выполняются) и сильное энергетическое условие (нарушается) подтверждает физическую состоятельность модели, что ранее не исследовалось для данной формы $f(Q)$.

Представлено исследование наблюдательных ограничений для модифицированной гравитации, основанной на скалярной кручение (T) и телепараллельном эквиваленте комбинации Гаусса-Бонне (T_G), обозначенной как $f(T, T_G)$ гравитация. Выводя общие уравнения Фридмана, а затем, выбирая конкретные анзацы $f(T, T_G)$, проводится полное исследование различных наблюдаемых параметров, таких как плотность энергии, параметры уравнения состояния и т.д.

Рассмотрена параметризация параметра Хаббла H с использованием наилучших значений свободных параметров b и γ , полученных из данных SCBH. Эта параметризация приводит к зависящему от времени параметру замедления q , который описывает текущее ускоренное расширение Вселенной ($q < 0$) с предшествующим замедлением ($q > 0$). Обнаружено, что свободные космологические параметры, входящие в $H(z)$, могут быть связаны с фоновыми параметрами, такими как плотность материи (Ω_m) и плотность излучения (Ω_r). Полученное значение параметра Хаббла H_0 близко к оценкам, полученным в рамках миссии Планка. Таким образом, модель $f(T, T_G)$ гравитации успешно описывает переход Вселенной от раннего замедления к позднему ускоренному расширению, демонстрируя квинтэссенциальное поведение и согласованность с наблюдательными данными.

Новизна исследования: впервые была разработана модель модифицированной $f(Q)$ и $f(T, T_G)$ гравитации с оригинальной

параметризацией, её успешной проверке на наблюдательных данных и демонстрации квинтэссенциального поведения. Это вносит значительный вклад в модифицированные теории гравитации и открывает новые направления для космологических исследований.

Апробация полученных результатов. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, были опубликована в рецензируемом индексируемых журналах Scopus и Web of Science. Модель проверена на соответствие наблюдательным данным, показав близость к Λ CDM. Ссылки на работы в области $f(Q)$ гравитации интегрируют исследование в актуальный научный дискурс. Исследование вносит значительный вклад в космологию, предлагая новую модель $f(Q)$ и $f(T, T_G)$ гравитации, апробированную через наблюдательные данные, публикацию и научную поддержку. Оно соответствует приоритетам фундаментальных исследований в астрофизике, открывая перспективы для изучения модифицированных теорий гравитации.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам. Исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP09058240 Исследование космологии метрико-аффинной теории гравитации), что указывает на его соответствие национальным приоритетам в области развития науки и технологий. В Казахстане фундаментальные исследования в области физики и астрофизики поддерживаются в рамках государственных программ, направленных на укрепление научного потенциала и интеграцию в мировое научное сообщество. Работа способствует реализации целей государственных программ, таких как развитие приоритетных направлений науки, включая физику высоких энергий, космологию и астрофизику, а также повышение конкурентоспособности казахстанской науки на международной арене.

Тематика исследования связана с глобальными научными инициативами, такими как изучение тёмной энергии и космологической эволюции, которые поддерживаются международными проектами, включая наблюдения с использованием телескопов и спутников (например, Planck, DESI).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 3 зарубежных статьи в рецензируемых научных журналах с импакт-фактором и квартилем:

1. Mussatayeva A., Myrzakulov N., Koussour M. Cosmological constraints on dark energy in $f(Q)$ gravity: A parametrized perspective // *Physics of the Dark Universe*. 2023. Vol.42. P.101276. Импакт фактор – 6.4. Квартиль – Q1, процентиль – 83.

2. Myrzakulov N., Mussatayeva A., Koussour M. Quintessence-like features in the late-time cosmological evolution of $f(Q)$ symmetric teleparallel gravity // *Chinese Journal of Physics*. 2023. Vol.85. P.345-358. Импакт фактор – 4.6. Квартиль – Q1, процентиль – 85.

3. Shekh S.H., Myrzakulov N., Pradhan A., Mussatayeva A. Observational Constraints on $f(T, T_G)$ Gravity with Hubble's Parametrization // *Symmetry*. – 2023. Vol.15. P.321. Импакт фактор – 2.2. Квартиль – Q2, процентиль – 82.

Описание вклада докторанта в подготовку каждой публикации. Весь объем диссертационной работы, включая теоретическую работу,

компьютерное моделирование, анализ научных материалов и подготовку к публикации проведен лично автором диссертации. Постановка задач, выбор методов исследования, обсуждение и анализ полученных результатов и выводы работы результатов осуществлялись совместно с научными руководителями.