

Отзыв научного руководителя
на диссертацию **Анны Александровны Токаревой**
«Наблюдаемые следствия модификаций гравитации в космологии и астрофизике»,
представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.02, теоретическая физика.

Диссертационная работа А.А. Токаревой посвящена построению и изучению космологических и астрофизических следствий моделей с модифицированной гравитацией, где в гравитационном секторе наряду с гравитоном фигурирует гипотетическая скалярная частица — скалярон. Динамика скалярона может быть ответственна за инфляционную стадию в ранней Вселенной и/или проявляться как тёмная энергия в современную эпоху, что объясняет важность темы диссертации. Исследование различных вариантов модифицированной гравитации является одним из наиболее активно развиваемых направлений в теоретической физике и астрофизике, что подтверждает актуальность данной диссертации.

Космология на современном этапе её развития как науки содержит в себе много загадок, разрешение которых скорее всего потребует модификации Стандартной модели физики частиц и гравитации. Мы не знаем, почему Вселенная такая однородная и изотропная, почему она пространственно плоская, как получилось, что в ней нет реликтовой антиматерии, почему несколько миллиардов лет назад замедленное расширение Вселенной вдруг сменилось ускоренным, что стоит за совокупностью явлений, получивших название явления тёмной материи. На часть этих вопросов, а возможно и на все, можно найти ответы, если допустить, что гравитация описывается некоторой более сложной конструкцией, чем лагранжиан Гильберта--Эйнштейна, являющийся по сути простейшим нетривиальным выбором. Ярчайшим подтверждением служит минимальная модификация в виде добавления космологической постоянной, что позволяет экономно объяснить современное ускоренное расширение Вселенной и согласуется с другими космологическими данными. Более сложные модификации также обсуждаются в литературе. Так, добавление квадратичного по скаляру кривизны R слагаемого к лагранжиану Гильберта--Эйнштейна позволяет обеспечить в ранней Вселенной аналогичную современной стадии почти экспоненциального расширения — инфляцию. При этом Вселенная становится плоской, однородной и изотропной, а квантовые флуктуации нового динамического поля, инфлатона, создают в послееинфляционной Вселенной неоднородности в распределении материи, необходимые для последующего образования галактик и других крупномасштабных структур, наблюдаемых в современной

Вселенной. Добавление слагаемых с неминимальным взаимодействием гравитации и полей материи может обеспечить производство барионов в ранней Вселенной и тем объяснить доминирование материи. Наконец, частицы тёмной материи могут появиться в ранней Вселенной именно благодаря гравитационному взаимодействию. Не пропадают попытки объяснить все явления тёмной материи лишь модификацией гравитации, без введения новых ингредиентов в физику элементарных частиц. Рассматриваемый в данной диссертации класс моделей, объединённый под термином « $F(R)$ -гравитация», является одним из наиболее перспективных с точки зрения успешного решения большинства вышеуказанных проблем. Диссертант А.А. Токарева внесла оригинальный вклад в развитие этих моделей. Так в её работе был предложен вариант модели инфляции Старобинского, основанной на квадратичном по кривизне слагаемом в лагранжиане гравитации, где поле Браута–Энглера–Хиггса взаимодействует с гравитацией неминимальным образом, в частности это поле может стать конформным на классическом уровне. Такая модификация может быть интересной с точки зрения решения проблем калибровочной иерархии Стандартной модели и объединения гравитации с физикой частиц. В главе 2 диссертации показано, что это взаимодействие изменяет процесс разогрева Вселенной на послеинфляционном этапе развития, что в свою очередь сдвигает модельные предсказания для параметров спектра неоднородностей материи. Сдвиг небольшой, но может быть проверен после запуска экспериментов следующего поколения. Отмечу здесь уточнение предсказаний модели Старобинского и модели с инфляцией на хиггсовском поле, выполненное в следующем порядке теории возмущений, что важно в силу численной близости предсказаний этих двух хорошо физически мотивированных моделей. В предложенной модификации А.А. Токаревой сделано предсказание сигнала на гравитационных интерферометрах, так как и на инфляционной стадии и позднее, вплоть до выхода на горячую стадию развития, в ранней Вселенной производятся гравитационные волны. Их обнаружение даст независимое подтверждение реализации в ранней Вселенной той или иной инфляционной модели. Кроме того, диссертантом был подробно исследован вопрос о стабильности послеинфляционной эволюции Вселенной в представлении, что возможные модификации Стандартной модели не влияют на потенциал скалярного поля Браута–Энглера–Хиггса.

В главе 3 также рассматривается инфляция и последующий разогрев Вселенной для моделей со спонтанным нарушением масштабной инвариантности. При этом, помимо скалярона и бозона Хиггса, в физических процессах принимает участие дилатон. Это безмассовая частица, возникающая в результате спонтанного нарушения масштабной инвариантности, которое приводит к появлению двух единственных размерных параметров в фундаментальной физике — планковской массы и электрослабого вакуумного среднего. В

модели А.А. Токаревой аккуратно исследована инфляционная динамика, которая в зависимости от выбора величин параметров модели и начальных условий полей определяется скалярном, хиггсовским полем или их смесью. В последующем разогреве Вселенной также участвуют оба механизма, характерные для этих двух инфляционных моделей. Помимо получения специфических предсказаний для спектров неоднородностей материи и гравитационных волн, позволяющих проверить модель, также обнаружено усиление рождения дилатонов на послеинфляционном этапе. В диссертации указано, что дилатоны дают вклад в ультрарелятивистскую компоненту в поздней Вселенной. Найдена область пространства параметров, где вклад дилатонов достаточен для объяснения так называемой тёмной радиации, необходимость которой в эпохи первичного нуклеосинтеза и рекомбинации обсуждается в литературе.

Модифицированная гравитация более сложного вида может быть ответственна за современное ускоренное расширение Вселенной. При этом в пустой, не заполненной частицами Вселенной скаляр кривизны будет равен нулю, что означает отсутствие космологической постоянной, характерное для пространства Минковского. Воплощение такой идеи в виде конкретной модели $F(R)$ -гравитации, предложенной А.А. Старобинским, рассматривается в главе 4. Хотя эта модель согласуется с космологическими наблюдениями, происходит это в той области параметров, где дальнейший набор данных уже вряд ли позволит отличить её от обычной гравитации с космологической постоянной. В этой связи встаёт вопрос о поиске принципиально других наблюдаемых, которые позволили бы различить эти две модели. В работах Е.В. Арбузовой, А.Д. Долгова и Л. Ревербери было предложено рассмотреть процесс классической эволюции поля скаляра при сжатии материи, сопровождающем процесс формирования структур в поздней Вселенной. Приводились оценки, показывающие, что рост колебаний скаляра приводит к рождению частиц высокой энергии, чей вклад в поток космических лучей даже может превышать наблюдаемый. В такой ситуации модели $F(R)$ -гравитации можно было бы тестировать анализируя астрономические данные, что замечательно. Но физическая причина появления таких частиц в медленном процессе образования астрофизических объектов оставалась непонятой. Диссертантом последовательно подробно исследуются вопросы о квантовом и классическом рождении частиц полем скаляра. Показано, что квантовое рождение является очень неэффективным. При рассмотрении классического рождения найдены правильные начальные условия для поля скаляра, что заметно изменяет приводимые в литературе ответы. А.А. Токарева продемонстрировала, что использованное авторами приближение непрерывной среды при описании взаимодействия скаляра с материей абсолютно не применимо, и при аккуратном рассмотрении вклад скаляронов в спектр космических лучей

пренебрежимо мал во всей космологически интересной области пространства модельных параметров.

При работе над диссертацией А.А. Токарева зарекомендовала себя как талантливый, настойчивый и самостоятельный физик-теоретик. Она успешно использовала сложные численные алгоритмы, демонстрировала уверенное владение современными методами квантовой теории поля и способность быстро и правильно разбираться в незнакомом материале, всесторонне анализировать сложные вопросы. Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах.

В заключение необходимо подчеркнуть, что представленная диссертационная работа «Наблюдаемые следствия модификаций гравитации в космологии и астрофизике» безусловно соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Анна Александровна Токарева, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02, теоретическая физика.

Ведущий научный сотрудник Отдела теоретической физики
ИЯИ РАН, доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Д.С. Горбунов

18.02.2016

Подпись Д.С. Горбунова удостоверяю.
Ученый секретарь ИЯИ РАН

А.Д. Селидовкин