

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН А.А. Федянин

«___» _____ 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу МИХАЛЬЧЕНКО Артема Олеговича на тему «Искажения частотного спектра реликтового излучения и методы их исследования» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия»

Основное содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Михальченко Артем Олеговича «Искажения частотного спектра реликтового излучения и методы их исследования» состоит из Введения, трёх Глав, Заключение и Приложения. Полный объем диссертации составляет 102 страниц, включая 15 Рисунков. Список литературы содержит 150 наименований.

Диссертация посвящена изучению возможного применения искажений спектра реликтового излучения (РИ) для целей прецизионной космологии и разработке новых алгоритмов выделения слабого сигнала, связанного с этими искажениями, из на несколько порядков более мощного фона.

Во **Введении** приведены полное описание диссертации, обзор современного понимания феномена спектральных искажений РИ: искажений вследствие взаимодействия с электронами внутри скоплений галактик (γ -искажения) и μ -искажений, возникающих задолго до эпохи рекомбинации на красных смещениях $z \sim 10^6$. Также в этом разделе обсуждаются актуальность, цели и задачи работы, ее новизна и значимость, описываются основные результаты работы в виде положений, выносимых на защиту, апробация результатов. Дана общая характеристика диссертации с указанием ее краткого содержания.

В **Первой главе** работы было исследовано, как возникают искажения в спектре РИ при комптоновском рассеянии на электронах внутри скоплений галактик (эффект Сюняева-Зельдовича, эСЗ). Рассеяние изначального анизотропного излучения будет приводить к искажениям частотного спектра параметров Стокса, т.е. меняться будет не только полная интенсивность, но и поляризация излучения. Были получены в аналитическом виде выражения для компонент искажений параметров Стокса, которые возникают ввиду наличия дипольной, квадрупольной и октупольной компонент в анизотропии реликтового излучения и показано, что этот тип искажений может независимо выделен и может быть использован для независимой оценки амплитуд мультиполей $\ell = 1, 2, 3$ и их ориентации. Важно, что это, наверное, единственный способ оценки космологического значения диполя, так как наблюдаемый на Земле диполь имеет практически чисто кинематическое происхождение. Также наблюдения этого сигнала от двух наборов скоплений – близких и далеких – может быть использовано для выделения вклада интегрального эффекта Сакса-Вольфа, что очень важно для различных областей космологии. Глава состоит из 4 разделов. В **Разделе 1.1** приводится обзор современного состояния проблемы. **Раздел 1.2** посвящен аналитическому выводу формул для величин спектральных искажений параметров Стокса, которые вызванные комптоновским взаимодействием анизотропного РИ с электронами в скоплениях галактик – анизотропным

эффектом Сюняева-Зельдовича. В **Разделе 1.3** полученные формулы применяются для оценок амплитуд малых мультиполей анизотропии РИ и для развития метода разделения сигналов от интегрального и обычного эффектов Сакса-Вольфа. В **Разделе 1.4** представлены выводы этой главы.

Глава 2 посвящена алгоритму отделения спектральных искажений РИ μ -типа от фонов. Введение в рассматриваемую тему приводится в **Разделе 2.1**. В **Разделе 2.2** описан сам алгоритм метода наименьшего отклика (least response method, LRM), который представляет из себя вариант согласованного фильтра, оптимизированного для поиска искажений известной спектральной формы. В **Разделе 2.3** рассматривается применение этого алгоритма с учетом шума и присутствия фонов – космологического ИК-фона, диффузного излучения от галактической пыли, фона от приемной системы телескопа. В **Разделе 2.4** суммируются выводы **Главы 2**.

В **Главе 3** приводится дальнейшее описание разработанного алгоритма и его приложение для отделения спектральных искажений от фонов. После введения в рассматриваемую тему в **Разделе 3.1**, в **Разделе 3.2** описываются разработанный метод наименьшего отклика и другие способы выделения сигнала, основанные на методе внутренней комбинации и его вариантах. В **Разделе 3.3** производится сравнение этих методов и показывается, что метод наименьшего отклика позволяет достичь наибольшей чувствительности к спектральным искажениям. Также в этом разделе показано, что температура оптической системы телескопы должна заметно отличаться от температуры РИ для уменьшения паразитного влияния на выделение сигнала. В **Разделе 3.4** приводятся выводы из **Главы 3**.

В **Заключении** приводятся выводы и перечисляются основные результаты, полученные в диссертации.

Актуальность выполненной работы не вызывает сомнений. Исследования РИ проводятся со всё возрастающей точностью и стали краеугольным камнем современной космологии. Вид спектра

неоднородностей РИ позволил получить сильные ограничения на состав Вселенной, её топологию и распределение материи в ней. В этих измерениях достигнуты угловые разрешения порядка нескольких минут дуги. Однако исследование спектра неоднородностей практически достигло пределов, налагаемых стохастичностью процессов, приводящих к его формированию, поэтому необходимо применение новых подходов. Одним из таких подходов является исследование отклонения формы спектра РИ от чернотельной. Эти отклонения могут быть вызваны как астрофизическими, так и космологическими процессами. Исключительно важным является то, что анализ этих отклонений может быть использован для получения информации, недоступной другими способами, например, для оценки космологического диполя анизотропии РИ и разделения вкладов интегрального и обычного эффектов Сакса-Вольфа. Также локальные изменения спектра РИ, вызванные эффектом Сюняева-Зельдовича, используются для изучения распределения электронов в скоплениях галактик вплоть до их внешних радиусов. Задачи, поставленные и решённые в работе, становятся исключительно актуальными в связи с подготовкой миссии «Миллиметрон», которая будет обладать исключительной чувствительностью в мм- и суб-мм диапазоне.

Наиболее важные и новые результаты. По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, все они – в высокорейтинговом журнале Physical Review D. Основные результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также семинарах отдела наблюдательной астрофизики ФИАН-МФТИ. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы.

Основные **новые результаты** работы, представленные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Был выделен особый вид спектральных искажений параметров Стокса реликтового излучения, рассеянного на кластерах Сюняева-Зельдовича, названный анизотропным эффектом Сюняева-Зельдовича. Использование отношения амплитуды этого эффекта к амплитуде классического эффекта СЗ позволяет уменьшить влияние астрофизических неопределённостей, связанных со свойствами среды внутри скопления и получить оценку низших мультиполей РИ в местоположении скопления, что позволяет получить значение космологического диполя и разделить вклад в анизотропию от эффекта Сакса-Вольфа и интегрального эффекта Сакса-Вольфа.

2. Был разработан новый метод наименьшего отклика, который позволяет отделить компоненты сигнала, включающие искомые спектральные искажения типа μ и u , от вкладов всевозможных фонов галактического и внегалактического происхождения, включая существенный вклад от оптики телескопа. Созданный алгоритм был использован для очистки от основных фоновых компонент – галактической пыли, инфракрасного фона, синхротронного излучения и излучения свободно-свободных переходов). Было показано, что отклик на фон становится пренебрежимо малым по сравнению с откликом на искомый сигнал при достаточной чувствительности эксперимента.

3. Было проведено сравнение актуальных методов обработки сигнала, применяемых сейчас, которые основаны на вариантах метода внутренней линейной комбинации, с разработанным алгоритмом метода наименьшего отклика LRM и показано преимущество последнего в случае реалистичного уровня чувствительности экспериментов. Также было показано, что для поиска μ -искажений реликтового излучения существует оптимальная температура оптической системы телескопа, заметно отличающаяся от температуры РИ.

Научное значение полученных в диссертации результатов. Научная значимость работы прежде всего заключается в разработке подхода с использованием анизотропного эффекта Сюняева-Зельдовича, который позволит оценить важнейшие космологические параметры, недоступные для оценки другими методами.

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что даже при условии высокой чувствительности экспериментов нового поколения, таких как «Миллиметрон», задача выделения слабого сигнала из фона, превосходящего его по уровню на несколько порядков, не может быть решена без разработки эффективных алгоритмов. Также, разработанные в ходе выполнения работы методы и модели могут быть использованы другими авторами для широкого круга приложений.

Замечания по содержанию диссертации.

1. Основное замечание – несмотря на то, что в тексте работы неоднократно упоминается телескоп «Миллиметрон», нигде не приведено строгих оценок его возможностей в поиске рассматриваемых спектральных искажений. Т.е. достаточно ли ожидаемой инструментальной чувствительности при реалистичной программе наблюдений для детектирования γ -искажений различных порядков и μ -искажения?

2. Структура диссертации не выглядит оптимизированной, материал глав 2 и 3 частично пересекается и повторяет друг друга. Лучше было бы разделить материал иным способом, чтобы главы были более независимы.

3. Общие замечания по оформлению: сокращений степеней и званий научного руководителя на титульном листе делать не принято; список иллюстраций в принципе не нужен, но если его и делать, то помещать в конец, а не перед Введением.

4. Есть некоторые не слишком удачные выражения, которые в такой краткой форме могут запутать читателя, например, «химический потенциал Вселенной».

5. В подписях к рисункам штриховая линия упорно называется пунктирной. Например, в подписи к Рис. 1.3 «Непрерывной линией показан классический тепловой эффект СЗ, точками – релятивистские поправки к нему вплоть до четвёртого порядка, и пунктирной линией – искажение второго типа (т.н. анизотропный эффект СЗ)».

6. Стр. 45: «Важно обозначить, что этот подход может быть применён к любым наблюдениям, в которых спектральная форма излучения плохо определена». Имеется в виду излучение фона.

7. Стр. 59: «Как и ранее, использовались 128 каналов шириной 15 ГГц от 10 ГГц до 2 ТГц. Для сравнения эффективности различных конфигураций Фурье-спектрометра показаны результаты для двух разных случаев: с одним и пятью диапазонами... Когда диапазон Фурье-спектрометра делится на пять частей, такая конфигурация даёт лучшую чувствительность». Не очень удачно сформулировано, сложно понять, как в итоге полный диапазон делится на каналы.

8. Стр. 64: «Однако для избавления от всех фоновых компонент необходимо учитывать спектральные вариации пыли, космического инфракрасного фона, синхротронного излучения и других фонов вдоль линии наблюдения...». Не объясняется почему недостаточно учитывать только то, что мы наблюдаем, а именно спектральные вариации в зависимости от направления, а нужно ещё как-то оценивать вариации вдоль луча зрения.

9. На стр. 67 было бы полезнее привести пример описания фона с реалистичным спектром, например, синхротронного со степенным, а не просто дельта-функции.

10. Стр. 74: не очень удачная формулировка: «В общем случае M может меняться от 1 (когда нет корреляций между фонами) до M (для 100% корреляции между всеми фонами)».

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация А.О. Михальченко представляет значительный вклад в исследование искажений спектра реликтового излучения. В работе был исследован новый эффект рассеяния анизотропного РИ электронами скоплений галактик и было показано, что этот анизотропный эффект Сюняева-Зельдовича может быть использован для оценки величины космологического диполя анизотропии РИ, недоступной для измерений другими методами и для разделения вкладов интегрального и обычного эффектов Сакса-Вольфа. Диссертантом был разработан новый метод выделения слабого сигнала известной формы из фонов, превосходящих его на несколько порядков – метод наименьшего отклика. Было проведено сравнение с используемыми сейчас методами и показано преимущество нового метода при анализе данных реальных телескопов.

Результаты диссертации опубликованы в 3 статьях в ведущем международном рецензируемом журнале и имеют на данный момент 13 цитирований, что указывает на научный и практический интерес в астрономическом сообществе.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Михальченко Артема Олеговича «Искажения частотного спектра реликтового излучения и методы их исследования» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия».

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 18 членов Совета из 26. Результаты голосования: «за» – 18; «против» – 0; «воздержалось» – 0. Протокол № 1 от «27» августа 2025 г.

Отзыв составил зав. отделом радиоастрономии ГАИШ МГУ, доктор физико-математических наук, профессор РАН М.С. Пширков.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

К.А. Постнов