

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н.Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва
Ленинский проспект, 53 ФИАН
Телефон: (499) 135 1429
(499) 135 4264
Телефакс: (499) 135 7880
<http://www.lebedev.ru>

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИАН
академик РАН, д.ф.-м.н.

____ Н.Н.Колачевский

Дата **16.06.2025 г.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Диссертация «Искажения частотного спектра реликтового излучения и методы их исследования» выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН). В период подготовки диссертации Михальченко Артем Олегович работал в АКЦ ФИАН в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника.

А. О. Михальченко окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», физтех-школа физики и исследований им. Ландау (ЛФИ), по направлению 14.04.02 «Ядерная физика и технологии» в 2021 г. Он обучался в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» на базовой кафедре проблем физики и астрофизики ФИАН в период с 1 сентября 2021 г. по 10 августа 2025 г. по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» (специальность 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»). Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 88 выдана 24 апреля 2025 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Новиков Дмитрий Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник отдела теоретической астрофизики и космологии АКЦ ФИАН.

Рецензентом выступил: Иванов Павел Борисович, доктор физико-математических наук, высококвалифицированный главный научный сотрудник лаборатории теоретической астрофизики отдела теоретической астрофизики и космологии АКЦ ФИАН.

По итогам обсуждения диссертационной работы и рассмотрения диссертации на семинаре АКЦ ФИАН, а также на заседании Ученого совета АКЦ ФИАН 16 июня 2025 г. было принято следующее решение.

Актуальность темы. Обнаружение искажений частотного спектра реликтового излучения Вселенной является одной из важнейших задач современной космологии. Отклонения спектра данного излучения от спектра абсолютно чёрного тела, а также

распределение амплитуды этих отклонений по небесной сфере открывают уникальные возможности для изучения фундаментальных физических процессов, происходивших в ранней Вселенной. В частности, они позволяют получить информацию о физике возможных вбросов энергии в плазму на ранних стадиях эволюции Вселенной, об особенностях спектра мощности первичных возмущений на малых масштабах, о существовании первичных чёрных дыр и частиц с периодом жизни $10^9 - 10^{10}$ секунд, о затухании акустических волн в период рекомбинации и других явлениях. Наиболее ценным представляется обнаружение монопольной части μ искажений реликтового излучения, где μ – это химический потенциал Вселенной. Не менее важны u искажения реликтового излучения, измерение которых вместе с релятивистскими поправками к эффекту Сюняева-Зельдовича содержит большой пласт информации о структуре скоплений и физических свойствах плазмы. Согласно результатам, полученным космическими обсерваториями WMAP и Planck, наблюдается недостаток мощности в спектре угловой анизотропии реликтового излучения на больших угловых масштабах (случай низких мультиполей). Кроме того, квадруполь и октуполь имеют очень близкую друг к другу ориентацию в пространстве, что не соответствует гауссовой статистике и инфляционной модели эволюции Вселенной. Поэтому желательно иметь независимый источник информации для оценки мощности низких мультиполей и их ориентации в пространстве. Таким источником могут служить спектральные искажения, которые возможно наблюдать от скоплений галактик за счёт анизотропии реликтового фона, рассеиваемого на этих скоплениях.

Целью данной диссертации является исследование особенностей частотного спектра реликтового излучения и решение задачи обработки экспериментальных данных, полученных при измерении спектральных искажений реликтового излучения. Для достижения поставленных целей были сформулированы и решены следующие основные задачи: 1) Исследование спектральных искажений параметров Стокса реликтового излучения, рассеянного на скоплениях Сюняева-Зельдовича. Проведение независимой оценки низких мультиполей анизотропии реликтового фона. Разделение вклада в анизотропию от эффекта Сакса-Вольфа и интегрального эффекта Сакса-Вольфа посредством наблюдения близких и далеких скоплений галактик. 2) Оценка области определения параметров, наборы которых определяют спектры модельных фоновых компонент. Например, для излучения пыли такими параметрами являются излучательная способность, температура и показатель наклона спектра в модели модифицированного чёрного тела. Определение размеров и конфигурации областей изменения этих параметров для различных участков неба по результатам, полученным обсерваторией Planck. 3) Разработка алгоритма обработки данных для минимизации вклада от любых фонов, параметры которых лежат внутри заданной области изменения. Этот алгоритм одновременно минимизирует вклад от сигналов, создаваемых космическими источниками и оптикой телескопа, и вклад от сигналов с хорошо определёнными спектрами, такими как, эффект Сюняева-Зельдовича, релятивистские поправки к этому эффекту и возмущения спектра, связанные с анизотропией реликтового фона. Применение разработанного метода для отделения μ искажения, u искажений и поправок к ним. 4) Сравнение различных методов, предложенных ранее (ILC, MIRC), с разработанным методом для ограниченного набора фоновых компонент. Оценка оптимальной температуры для любого эксперимента, который направлен на измерение монопольной части μ искажения реликтового излучения.

Научная новизна. Впервые получен теоретически важный результат о возникновении особого вида спектральных искажений параметров Стокса реликтового излучения, рассеянного на горячей плазме скоплений галактик. Показано, что этот эффект даёт возможность для независимой оценки низких мультиполей анизотропии реликтового излучения, таких как диполь, квадруполь и октуполь. Также показано, что, используя искажённые сигналы от близлежащих и удалённых скоплений, можно различить вклады в анизотропию от эффекта Сакса-Вольфа и интегрального эффекта Сакса-Вольфа. Разработан новый универсальный метод отделения малых спектральных искажений реликтового излучения от фоновых компонент с плохо определёнными формами спектра, которые сложно предсказать или смоделировать, названный методом наименьшего отклика LRM («Least Response Method») и основанный на идее одновременной минимизации отклика на все возможные фоны и фотонный шум с сохранением постоянного отклика на искомый

сигнал. Показана недостаточная для исследования спектральных искажений эффективность существующих в настоящее время методов разделения компонент (ILC, cILC, MILC) по сравнению с разработанным в рамках данного исследования подходом. Впервые получено ограничение на оптимальную температуру оптической системы телескопа в экспериментах, связанных с исследованием μ искажения реликтового излучения.

Достоверность представленных результатов подтверждается апробацией на российских и зарубежных конференциях, где присутствовали специалисты в данной области, и публикациями в ведущих рецензируемых научных журналах.

Ценность и практическая значимость научных работ соискателя. Теоретически полученный в ходе исследования анизотропный эффект Сюняева-Зельдовича может быть использован для независимой оценки мощности низких мультиполей $\ell = 1, 2, 3$ анизотропии реликтового излучения и их ориентации в пространстве. Разработанный метод наименьшего отклика, позволяющий отделить малые искажения спектра реликтового излучения от фонов с плохо определёнными формами спектра, будет востребован при анализе данных эксперимента «Миллиметрон», одной из основных задач которого является обнаружение μ и u искажений спектра реликтового излучения. Более того, этот метод найдёт применение в любом эксперименте, где спектр фона известен недостаточно хорошо, но при этом известны интервалы возможных изменений параметров этого фона. Результат определения оптимальной температуры оптической системы телескопа позволит избежать критических ошибок при планировании экспериментов для измерения монопольной части μ искажений.

Личный вклад. Автор внёс определяющий вклад во все результаты диссертационной работы, выносимые на защиту. Автор совместно с научным руководителем и соавторами активно участвовал в анализе данных, интерпретации и обсуждении результатов, формулировке выводов работы. Диссертантом проведены все расчёты, получены рисунки и графики. Вклад диссертанта определяющий в аналитическом выводе спектральных искажений параметров Стокса реликтового излучения, в обработке и анализе данных (на языках Fortran, Python). Равный вклад в разработке алгоритма и определяющий в адаптации метода разделения компонент и оптимизации компьютерного кода алгоритма с целью увеличения быстродействия программы с сохранением точности вычислений. Также диссертант внёс основной вклад в проведение сравнения эффективности разработанного метода с актуальными методами ILC и MILC.

Диссертация соответствует всем требованиям, установленным пунктами 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Диссертация соответствует специальности «Физика космоса, астрономия» по физико-математическим наукам (1.3.1). Материалы диссертации представлены соискателем в трех научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах из списка ВАК. Содержание диссертации изложено доступно, корректно и полно.

Диссертация Михальченко Артема Олеговича «Искажения частотного спектра реликтового излучения и методы их исследования» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физика космоса, астрономия» (1.3.1).

Заключение принято на заседании Ученого совета АКЦ ФИАН. Присутствовало на заседании 11 чел. Результаты голосования: "за" - 11 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол № 3/25 от "16" июня 2025 г.

Руководитель АКЦ ФИАН,
д.ф.-м.н.

С. Ф.Лихачев

