

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИКИ РАН

Академик РАН

А. А. Петрукович

10 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) на диссертацию «Ограничения на параметры частиц темной материи, полученные с помощью рентгеновских телескопов CPG/ART-XC и NuSTAR», представленную Захаровым Евгением Игоревичем на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия».

Диссертация Захарова Евгения Игоревича выполнена в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН и на базовой кафедре физики космоса при ИКИ РАН факультета физики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). В период подготовки диссертации, с 15.08.2022 по настоящее время, соискатель работал в лаборатории 521 отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

В 2022 г. Захаров Е. И. окончил магистратуру НИУ ВШЭ по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». С 2022 г. по настоящее время он обучается в очной аспирантуре НИУ ВШЭ по научной специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия» (образовательная программа «Физика и астрономия»). Кандидатские экзамены по истории и философии науки, иностранному языку и специальной дисциплине сданы; справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана ИКИ РАН.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук Вихлинин Алексей Александрович, ведущий научный сотрудник ИКИ РАН.

Доклад Захарова Е. И. по результатам диссертационной работы был заслушан и обсуждён на заседании НТС отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН 01.10.2026. По итогам рассмотрения диссертации принято следующее заключение.

Актуальность темы и направление исследования

Природа темной материи, составляющей основную часть массы Вселенной, остаётся одной из ключевых нерешённых задач современной физики. Многолетние поиски

слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP), долгое время считавшихся наиболее вероятными кандидатами, не привели к обнаружению сигнала. Вследствие этого внимание научного сообщества закономерно сместилось к альтернативным моделям, охватывающим существенно более широкий диапазон масс и типов взаимодействия частиц.

Особое место среди таких моделей занимают частицы кэВ-ного диапазона масс: распадающиеся стерильные нейтрино и аннигилирующая темная материя. Этот диапазон недоступен лабораторным экспериментам и значительно менее изучен, чем традиционно исследуемая область масс ГэВ–ТэВ. Основным инструментом поиска в нём служит рентгеновская астрономия, поскольку и распад, и аннигиляция таких частиц должны проявляться в виде узкой линии в рентгеновском спектре.

Выделение столь узкой спектральной особенности на фоне инструментального фона, значительно превосходящего её по интенсивности, предъявляет исключительно высокие требования к точности калибровки используемого детектора. Диссертация посвящена построению физически обоснованной модели отклика детекторов телескопа *CPG/ART-XC* им. М. Н. Павлинского и получению на её основе, а также по данным обсерватории *NuSTAR*, новых ограничений на параметры частиц темной материи кэВ-ного диапазона масс. Тема работы лежит на стыке приборостроения рентгеновских телескопов и физики частиц темной материи, что определяет её актуальность для современной астрофизики высоких энергий.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. В первой главе представлена полётная калибровка спектрального отклика детекторов телескопа *CPG/ART-XC*: построена физически мотивированная модель отклика стриповых *CdTe* детекторов, учитывающая накопленные радиационные повреждения, и разработан алгоритм восстановления энергии событий. Во второй главе по данным обзора всего неба телескопа *CPG/ART-XC* выполнен поиск сигналов распада стерильных нейтрино и аннигиляции темной материи в гало Млечного Пути, а также поиск сигнала аннигиляции в ансамбле карликовых сфероидальных галактик Местной группы. В третьей главе по данным 11-летнего архива наблюдений обсерватории *NuSTAR* получены ограничения на сечение аннигиляции частиц темной материи кэВ-ного диапазона масс.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна работы определяется прежде всего тем, что для детекторов телескопа *CPG/ART-XC* впервые построена модель энергетического отклика, основанная на последовательном описании физических процессов формирования сигнала, а не на эмпирической подгонке калибровочных данных. Модель воспроизводит форму реги-

стрируемых спектральных линий во всём рабочем диапазоне энергий, включая особенности в мягкой его части, которые не описывались прежними матрицами отклика. Учёт накопленных радиационных повреждений детекторов сохраняет применимость модели на протяжении всего срока эксплуатации телескопа. В результате достигнута точность восстановления энергии фотонов, достаточная для поиска узких спектральных линий.

Впервые данные обзора всего неба телескопа CPГ/ART-XC использованы для поиска сигналов темной материи кЭВ-ного диапазона масс. Для распадающихся стерильных нейтрино получены независимые ограничения на угол смешивания, основанные на равномерном обзоре неба, а не на наблюдениях отдельных областей. Для аннигилирующей темной материи по данным CPГ/ART-XC впервые выполнен поиск линии как в гало Млечного Пути, так и в ансамбле 33 карликовых сфероидальных галактик Местной группы, включая недавно открытую галактику Ursa Major III/UNIONS 1. Полученные ограничения на момент выполнения работы были наиболее сильными среди всех рентгеновских наблюдений для масс частиц 4–15 кЭВ.

Анализ 11-летнего архива наблюдений NuSTAR позволил независимо получить наиболее строгие на сегодняшний день ограничения на сечение аннигиляции частиц темной материи с массами 3–20 кЭВ, которые подтверждают и усиливают результаты CPГ/ART-XC. Новизну работе придаёт и методология в целом: поиск сигнала выполнен сразу в двух каналах, распада и аннигиляции, с помощью двух независимых инструментов, использующих принципиально разные методики выделения сигнала, и на нескольких астрофизических объектах.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Полученные ограничения на угол смешивания и сечение аннигиляции сужают область допустимых параметров сразу для двух широких классов моделей: распадающихся стерильных нейтрино и частиц со слабой связью с видимым сектором, рождающихся по механизму freeze-in. Таким образом, значимость результатов выходит за рамки собственно рентгеновской астрономии. Для стерильных нейтрино с массами 12–40 кЭВ ранее известные ограничения на угол смешивания подтверждены независимым методом, основанным на равномерном обзоре всего неба, а не на точечных наблюдениях отдельных областей. Это проверяет устойчивость прежних выводов к систематике, связанной с выбором наблюдаемой области и модели распределения темной материи в ней. Для частиц с массами 3–20 кЭВ, аннигилирующих в фотоны, полученные пределы проверяют жизнеспособность моделей со сверхслабой связью с видимым сектором в диапазоне масс, где прямые и коллайдерные методы поиска практически неприменимы.

Практическая значимость работы определяется прежде всего разработанной моделью энергетического отклика и алгоритмом восстановления энергии фотонов. Они

применимы к обработке любых научных данных телескопа CPГ/ART-XC, а не только к задаче поиска темной материи, поскольку точность калибровки напрямую влияет на достоверность измерений температуры горячего газа в скоплениях галактик, поиска циклотронных линий в спектрах аккрецирующих нейтронных звёзд и решения других задач рентгеновской спектроскопии. По сравнению с ранее использовавшейся матрицей отклика для калибровочной линии 5.89 кэВ расхождение восстановленного положения линии с номинальным значением сокращено до 1.5 %, а характерный низкоэнергетический хвост линии, не воспроизводившийся прежней моделью, корректно описан. Кроме того, модель учитывает накопленные радиационные повреждения детекторов, что позволяет сохранять точность калибровки на протяжении всей длительной космической миссии. Построенная модель отклика также образует необходимую основу для дальнейшего уточнения калибровки эффективной площади телескопа в мягкой части его рабочего диапазона энергий.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Достоверность результатов обеспечивается использованием обширной наблюдательной базы: двухлетнего обзора всего неба телескопом CPГ/ART-XC, 11-летнего архива данных обсерватории NuSTAR и специально проведённых калибровочных измерений. Модель отклика детекторов CPГ/ART-XC опирается на физически обоснованное моделирование в пакете GEANT4 и верифицирована по данным бортовых калибровочных источников и по наблюдениям опорных астрофизических объектов на протяжении всего космического полёта телескопа. Ограничения на параметры частиц темной материи получены с помощью стандартных статистических методов, принятых в современной рентгеновской астрономии.

Дополнительным подтверждением достоверности служит согласие результатов независимого анализа данных двух различных обсерваторий, CPГ/ART-XC и NuSTAR, в которых использованы принципиально разные методики выделения сигнала. Полученные ограничения согласуются с результатами независимых поисков темной материи, представленными в мировой литературе. Основные результаты работы прошли рецензирование и опубликованы в ведущих российских и международных журналах.

Личный вклад автора

Все результаты диссертации получены автором лично либо при его непосредственном участии. Методика поиска темной материи по данным CPГ/ART-XC разработана автором самостоятельно. Ограничения на параметры аннигилирующей темной

материи по данным NuSTAR получены автором лично на основе методики выделения сигнала, предложенной коллегами.

Для калибровки детекторов ART-XC автором лично разработан программный комплекс на основе GEANT4. Базовая модель электроники детектора была предложена коллегами, а её развитие и уточнение выполнены автором самостоятельно. Тексты публикаций подготовлены автором, а положения, выносимые на защиту, согласованы со всеми соавторами.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации изложены в четырёх статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК (категория К1) и индексируемых в Scopus. Во всех работах вклад соискателя является основным, он является первым автором каждой из них.

1. **Zakharov E. I.**, Barinov V. V., Burenin R. A. et al. All-sky limits on sterile neutrino galactic dark matter obtained with SRG/ART-XC after two years of operations // Physical Review D. — 2024. — Vol. 109, No. 2. — P. L021301.
2. **Zakharov E. I.**, Barinov V. V., Burenin R. A., Gorbunov D. S., Krivonos R. A. Constraints on the parameters of keV-scale mass annihilating dark matter obtained with SRG/ART-XC observations // Physical Review D. — 2024. — Vol. 110, No. 12. — P. 123026.
3. **Zakharov E. I.**, Barinov V. V., Gorbunov D. S., Krivonos R. A., Mukhin A. A. Search for a photon peak from keV-scale dark matter annihilation with NuSTAR: Constraints on $\langle\sigma v\rangle$ after 11 years of observations // Physical Review D. — 2025. — Vol. 112, No. 10. — P. 103037.
4. **Захаров Е. И.**, Лапшов И. Ю., Левин В. В., Ткаченко А. Ю., Лутовинов А. А., Вихлинин А. А. Полётная калибровка спектрального отклика детекторов телескопа ART-XC обсерватории «Спектр-РГ» // Письма в Астрономический журнал. — 2026. — Т. 52, № 9. — С. 457.

Публикации полностью соответствуют теме диссертации и отражают её основные положения.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях, а также на семинарах отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Среди конференций:

1. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2022», Москва, 19–22 декабря 2022 г.
2. XX конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 12–14 апреля 2023 г.
3. XXI конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 10–12 апреля 2024 г.
4. Всероссийская астрономическая конференция «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», п. Нижний Архыз, 25–31 августа 2024 г.
5. Международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2024», Москва, 23–26 декабря 2024 г.
6. Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвящённая 70-летию В. А. Рубакова, Москва, 17–21 февраля 2025 г.
7. XXII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 21–23 апреля 2025 г.
8. Russian–Chinese Meeting on High Energy Astrophysics, Москва, 25–29 августа 2025 г.
9. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2025», Москва, 22–25 декабря 2025 г.
10. Международная конференция молодых учёных по космическим исследованиям, Москва, 22–24 апреля 2026 г.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

Диссертационная работа соответствует следующим направлениям исследований паспорта специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия» (отрасль науки — физико-математические науки). Построение модели отклика детекторов телескопа и алгоритма

восстановления энергии событий относится к п. 14 (экспериментальные методы, научные приборы и алгоритмы обработки данных для космических и астрономических исследований). Поиск узких линий в рентгеновских спектрах соответствует п. 1 (разработка методов анализа излучения в различных спектральных и энергетических диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям), а ограничения на параметры частиц темной материи, как одной из составляющих Вселенной, относятся к п. 4.

ВЫВОД

Диссертационная работа Захарова Евгения Игоревича «Ограничения на параметры частиц темной материи, полученные с помощью рентгеновских телескопов SRG/ART-XC и NuSTAR» является завершённой научно-квалификационной работой и соответствует специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия», а также требованиям пунктов 9, 10 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Результаты диссертации изложены в четырёх статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК и индексируемых в международной системе цитирования Scopus.

Диссертация Захарова Е. И. соответствует всем требованиям ВАК и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Присутствовало на заседании 17 чел. Результаты голосования: «за» — 17 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол от «01» октября 2026 г.

Ученый секретарь НТС
отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН,
к.ф.-м.н.

В. А. Арефьев