УТВЕРЖДАЮ
Проректор Национального
исследовательского университета
«Высшая школа экономики»
_____
к.э.н., доцент Рощин Сергей Юрьевич
«05» октября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Диссертация Захарова Евгения Игоревича на тему: «Ограничения на параметры частиц темной материи, полученные с помощью рентгеновских телескопов СРГ/ART-XC и NuSTAR» выполнена на базовой кафедре физики космоса Института космических исследований Российской академии наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (далее - Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», НИУ ВШЭ).

В 2022 г. Захаров Евгений Игоревич окончил магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

С 2022 г. по настоящее время обучается в очной аспирантуре Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» по научной специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия, образовательная программа «Физика и астрономия».

В период обучения в аспирантуре сданы кандидатские экзамены по истории и философии науки, иностранному языку и по специальной дисциплине 1.3.1 - Физика космоса, астрономия, что подтверждается протоколами сдачи кандидатских экзаменов.

В период подготовки диссертации соискатель ученой степени Захаров Евгений Игоревич работал в отделе астрофизики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук в должности инженера с 15.08.2022 по настоящее время.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Вихлинин Алексей Александрович работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук в должности ведущего научного сотрудника.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Актуальность темы

Проблема природы темной материи, на долю которой приходится основная часть полной массы Вселенной, остается одной из центральных нерешенных проблем современной физики. Многолетние поиски наиболее популярного кандидата на роль ее частиц — слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP) — не увенчались успехом, что сместило интерес научного сообщества к альтернативным кандидатам, охватывающим существенно более широкий диапазон масс и типов взаимодействия. Особое место среди них занимают частицы кэВ-ного диапазона масс — распадающиеся стерильные нейтрино и аннигилирующая темная материя, — поскольку этот диапазон одновременно недоступен лабораторным экспериментам и значительно менее изучен, чем традиционно исследуемый ГэВ–ТэВ диапазон. Поиск сигнала методами рентгеновской астрономии предъявляет исключительно высокие требования к точности калибровки используемого детектора, так как узкая спектральная особенность должна быть выделена на фоне значительно превосходящего ее по интенсивности инструментального фона. Диссертация посвящена построению физически обоснованной модели отклика детекторов телескопа СРГ/ART-XC им. М.Н. Павлинского и получению на ее основе, а также по данным обсерватории NuSTAR, новых ограничений на параметры частиц темной материи кэВ-ного диапазона масс. Таким образом, тема диссертации находится на стыке задач приборостроения рентгеновских телескопов и физики частиц темной материи, что делает ее актуальной для современной астрофизики высоких энергий.

Научные положения диссертации

1. Разработана физически мотивированная модель энергетического отклика стриповых CdTe детекторов телескопа СРГ/ART-XC, обеспечивающая воспроизведение спектра бортового калибровочного источника во всём рабочем диапазоне энергий на протяжении всего срока эксплуатации телескопа. Модель позволила достигнуть точности восстановления энергии фотонов в 1.5%, и описать 10%-ые спектральные особенности ниже энергии 6 кэВ.

2. По данным телескопа СРГ/ART-XC проведен поиск линии излучения, соответствующей распаду стерильных нейтрино с массами 12–40 кэВ. Получен верхний предел на угол смешивания $\sin^2(2\theta) < 1\cdot10^{-11}-7\cdot10^{-14}$ для соответствующего диапазона масс, что при механизме рождения Додельсона–Уидроу соответствует верхним пределам на параметр плотности $\Omega_{DM}h^2 < 3\cdot10^{-4}-8\cdot10^{-6}$. Таким образом, для данного механизма рождения показано, что стерильные нейтрино с массами от 12 до 40 кэВ не могут обеспечить наблюдаемую плотность темной материи.

3. По данным телескопов СРГ/ART-XC и NuSTAR получены наиболее сильные ограничения на сечение аннигиляции частиц темной материи с массами 3–20 кэВ, находящихся в гало нашей Галактики: $\langle\sigma v\rangle < 5\cdot10^{-35}-1\cdot10^{-32}$ см^3/с. Полученный предел на порядок величины сужает разрешенную область параметров аннигиляции.

4. Для устранения возможных систематических неопределенностей поиск сигнала от аннигиляции был также проведен по данным наблюдений карликовых галактик Местной Группы телескопом СРГ/ART-XC. Получен верхний предел $\langle\sigma v\rangle < 2{,}5\cdot10^{-33}$ см^3/с.

Обоснованность научных положений

Обоснованность научных положений подтверждается использованием обширной наблюдательной базы: двухлетнего обзора всего неба телескопом СРГ/ART-XC, одиннадцатилетнего архива данных обсерватории NuSTAR и специально проведенных калибровочных измерений. Построенная модель отклика детекторов опирается на физически обоснованное моделирование в пакете GEANT4 и проверена сопоставлением с бортовым калибровочным источником. Ограничения на параметры темной материи получены с помощью стандартных статистических методов, принятых в современной рентгеновской астрономии. Все научные положения опубликованы в рецензируемых журналах и прошли независимую экспертную оценку.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты диссертации получены автором лично либо при его непосредственном участии. Методика поиска темной материи по данным СРГ/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 базе GEANT4, а предложенная коллегами модель электроники детектора развита и уточнена автором самостоятельно. Тексты публикаций и положения, выносимые на защиту, подготовлены автором и согласованы со всеми соавторами.

Степень достоверности результатов проведенных соискателем ученой степени исследований

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием проверенных и широко применяемых в мировой практике методов анализа данных и моделирования: пакета GEANT4 для моделирования взаимодействия излучения с веществом и стандартных статистических подходов для построения ограничений на параметры темной материи. Построенная модель энергетического отклика детекторов ART-XC верифицирована по данным независимых бортовых калибровочных источников и по наблюдениям опорных астрофизических объектов на всем протяжении космического полета телескопа. Достоверность полученных ограничений на параметры частиц темной материи подтверждается их взаимной согласованностью при независимом анализе данных двух различных обсерваторий — СРГ/ART-XC и NuSTAR, — использующих принципиально разные методики выделения сигнала. Все основные результаты работы прошли рецензирование и опубликованы в высокорейтинговых российских и международных журналах: Physical Review D и «Письма в Астрономический журнал». Дополнительным подтверждением достоверности служит согласие полученных ограничений с результатами независимых поисков темной материи, представленными в мировой литературе.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертации определяется совокупностью впервые полученных результатов. Впервые построена физически мотивированная модель энергетического отклика детекторов телескопа СРГ/ART-XC им. М.Н.

Павлинского, основанная на последовательном описании процессов формирования сигнала, а не на эмпирической подгонке калибровочных данных. По данным первых четырех обзоров всего неба СРГ/ART-XC впервые получены независимые ограничения на угол смешивания распадающихся стерильных нейтрино массой 12–40 кэВ. Впервые по данным СРГ/ART-XC выполнен поиск линии аннигиляции темной материи в гало Млечного Пути и в 33 карликовых сфероидальных галактиках Местной группы, включая недавно открытую галактику Ursa Major III/UNIONS 1. Полученные ограничения на сечение аннигиляции являлись на момент выполнения работы наиболее сильными среди всех рентгеновских наблюдений для масс 4–15 кэВ. По данным одиннадцатилетнего архива наблюдений NuSTAR независимо получены наиболее строгие на сегодняшний день ограничения на сечение аннигиляции для масс 3–20 кэВ, подтверждающие и усиливающие результаты СРГ/ART-XC. Новизну работе придает и сама методология: поиск сигнала темной материи сразу в двух каналах — распаде и аннигиляции — с использованием двух независимых инструментов и нескольких астрофизических целей.

Теоретическая значимость

Полученные ограничения на угол смешивания и сечение аннигиляции сужают область допустимых параметров сразу для двух широких классов моделей темной материи — распадающихся стерильных нейтрино и слабосвязанных с видимым сектором частиц, рождающихся по механизму freeze-in, — что имеет значение, выходящее за рамки собственно рентгеновской астрономии. Для стерильных нейтрино массой 12–40 кэВ независимым методом — по равномерному обзору всего неба, а не по точечным наблюдениям отдельных областей — подтверждены ранее известные ограничения на угол смешивания, что проверяет их устойчивость к систематике, связанной с выбором конкретной наблюдаемой области и модели распределения темной материи в ней. Для частиц темной материи массой 3–20 кэВ, аннигилирующих в фотоны, полученные ограничения на сечение аннигиляции проверяют жизнеспособность моделей со сверхслабой связью с видимым сектором в диапазоне масс, для которого прямые и коллайдерные методы поиска практически неприменимы.

Практическая значимость результатов проведенных соискателем ученой степени исследований

Разработанная модель энергетического отклика и алгоритм восстановления энергии фотонов применимы к обработке произвольных научных данных телескопа ART-XC, а не только к задаче поиска темной материи, поскольку точность калибровки напрямую определяет достоверность результатов измерения температуры горячего газа в скоплениях галактик, поиска циклотронных линий в спектрах аккрецирующих нейтронных звезд и других задач рентгеновской спектроскопии. Сопоставление с ранее использовавшейся матрицей отклика демонстрирует практическое улучшение точности: например, для калибровочной линии 5.89 кэВ расхождение восстановленного положения с номинальным значением сокращено до 1.5%, а характерный низкоэнергетический хвост линии, ранее не воспроизводившийся моделью, корректно описан. Разработанная модель учитывает накопленные за годы радиационные повреждения детекторов, что позволяет сохранять точность калибровки на всем протяжении длительной

космической миссии, а не только на начальном этапе ее работы. Кроме того, построенная модель энергетического отклика образует необходимую основу для дальнейшего уточнения калибровки эффективной площади телескопа в мягкой части его рабочего диапазона энергий.

Апробация работы

Основные тезисы работы апробированы на научных конференциях:

1. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2022», Россия, г. Москва, 19–22 декабря 2022 г. Тема доклада: «Ограничения на параметры распадающейся темной материи из стерильных нейтрино по данным телескопа ART-XC на борту обсерватории СРГ».
2. XX конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Россия, г. Москва, 12–14 апреля 2023 г. Тема доклада: «Ограничения на параметры распадающейся темной материи из стерильных нейтрино по данным телескопа ART-XC на борту обсерватории СРГ».
3. XXI конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Россия, г. Москва, 10–12 апреля 2024 г. Тема доклада: «Ограничения на параметры аннигилирующей темной материи кэВ-ого диапазона масс по данным телескопа СРГ/ART-XC».
4. Всероссийская астрономическая конференция 2024 года «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», Россия, п. Нижний Архыз, 25–31 августа 2024 г. Тема доклада: «Ограничения на параметры частиц темной материи кэВ-ого диапазона масс по данным телескопа СРГ/ART-XC».
5. Международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2024», Россия, г. Москва, 23–26 декабря 2024 г. Тема доклада: «Ограничения на параметры частиц темной материи кэВ-го диапазона масс по данным телескопа СРГ/ART-XC».
6. Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова, 2025 год, Россия, г. Москва, 17–21 февраля 2025 г. Тема доклада: «Ограничения на параметры частиц темной материи кэВ-го диапазона масс по данным телескопа СРГ/ART-XC».
7. XXII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Россия, г. Москва, 21–23 апреля 2025 г. Тема доклада: «Ограничения на параметры частиц аннигилирующей темной материи кэВ-го диапазона масс по данным обсерватории NuSTAR после 11 лет работы».
8. Russian–Chinese Meeting on High Energy Astrophysics, 2025 год, Россия, г. Москва, 25–29 августа 2025 г. Тема доклада: «X-ray constraints on keV-scale Sterile Neutrino Dark Matter from SRG/ART-XC and NuSTAR observations».
9. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2025», Россия, г. Москва, 22–25 декабря 2025 г. Тема доклада: «Поиск сигнала от темной материи с помощью рентгеновских телескопов SRG/ART-XC и NuSTAR».
10. Международная конференция молодых учёных по космическим исследованиям, Россия, г. Москва, 22–24 апреля 2026 г. Тема доклада: «The Dark Universe. The story of the two main mysteries of modern physics».

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 4 работах общим объемом 4,28 п.л.; личный вклад автора составляет 3,76 п.л.

Научная публикация	**Личный вклад**	**Публикация входит в**		
		Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК (Перечень), Категория (К1/К 2/К3)	База данных RSCI	Международные базы данных и системы цитирования (Scopus/ Web of Science и др.)
1. All-sky limits on sterile neutrino galactic dark matter obtained with SRG/ART-XC after two years of operations / Zakharov E.I., Barinov V.V., Burenin R.A. [et al.] // Physical Review D — 2024. — Vol. 109, No. 2 — P. L021301	С соавт., авторский вклад — 0,47 п.л. (первый автор)	Да, К1	Нет	Scopus, Q1
2. Constraints on the parameters of keV-scale mass annihilating dark matter / Zakharov E.I., Barinov V.V., Burenin R.A. [et al.] // Physical Review D — 2024. — Vol. 110, No. 12 — P. 123026	С соавт., авторский вклад — 0,9 п.л. (первый автор)	Да, К1	Нет	Scopus, Q1
3. Search for a photon peak from keV-scale dark matter annihilation with NuSTAR: Constraints on ⟨σv⟩ after 11 years of observations / Zakharov E.I.,	С соавт., авторский вклад — 0,77 п.л. (первый автор)	Да, К1	Нет	Scopus, Q1

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», протокол № 2 от «01» октября 2026 г.

Присутствовало на заседании 9 человек. Участвовало в голосовании 9.

Результаты голосования:

«за» – 9 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек.

Заведующий базовой кафедрой физики космоса
Института космических исследований РАН
Факультета физики НИУ ВШЭ, профессор,
Директор ИКИ РАН, академик РАН Петрукович А.А.