На правах рукописи



Захаров Евгений Игоревич

Ограничения на параметры частиц темной материи, полученные с помощью рентгеновских телескопов СРГ/ART-XC и NuSTAR

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“» (НИУ ВШЭ).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Вихлинин Алексей Александрович

Официальные оппоненты: **Пширков Максим Сергеевич,**
доктор физико-математических наук, профессор РАН,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
заведующий отделом радиоастрономии

Барков Максим Владимирович,
доктор физико-математических наук,
Институт астрономии Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник отдела физики и эволюции звезд

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Защита состоится 29 января 2027 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 при Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте http://www.iki.rssi.ru/diss/2026/zakharov.htm.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал), ученому секретарю диссертационного совета 24.1.481.01.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.481.01,
кандидат физико-математических наук  Ткаченко Алексей Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Проблема природы темной материи и темной энергии, на долю которых в совокупности приходится около 95% полной плотности энергии Вселенной [1], остается одной из центральных нерешенных проблем современной физики. Существование темной материи надежно установлено по ее гравитационному воздействию, однако ее природа за пределами гравитации остается нераскрытой. В течение нескольких десятилетий центральное место среди кандидатов на роль частиц темной материи занимали слабовзаимодействующие массивные частицы (WIMP), масса которых естественным образом обеспечивает наблюдаемую плотность темной материи в рамках механизма термического вымораживания (freeze-out) [2]. Масштабная экспериментальная программа поиска WIMP, однако, к настоящему моменту привела лишь к последовательному сужению допустимой области параметров, что стимулировало смещение фокуса исследований в сторону альтернативных кандидатов на роль частиц темной материи, охватывающих значительно более широкий диапазон масс и типов взаимодействия [3].

Неполнота Стандартной модели физики частиц является общепризнанным фактом: она не в состоянии объяснить ненулевые массы и осцилляции нейтрино, барионную асимметрию Вселенной и природу темной материи. Особый интерес представляют расширения Стандартной модели, способные решить сразу несколько подобных проблем в рамках единого механизма [4; 5]. Одним из наиболее известных примеров служат расширения, вводящие один или несколько стерильных нейтрино [6] — массивных фермионов, не участвующих в известных взаимодействиях Стандартной модели и проявляющих себя лишь через смешивание с обычными нейтрино, которое естественным образом объясняет малость масс последних. Помимо этого, стерильные нейтрино являются одними из естественных кандидатов на роль частиц темной материи [7]. Тот же механизм смешивания делает их нестабильными, приводя к радиационному распаду на активное нейтрино и фотон [8] с характерной наблюдательной сигнатурой — монохроматической линией в электромагнитном спектре с энергией, равной половине массы распадающейся частицы [9].

Требование, чтобы стерильное нейтрино составляло всю темную материю Галактики, накладывает на его массу два независимых нижних предела. Первый вытекает из принципа Паули: анализ кинематики карликовых сфероидальных галактик показывает, что ограничение фазового объема запрещает массы ниже примерно 0.1 кэВ [10; 11]. Существенно более сильный предел возникает из требования согласия с наблюдаемой мелкомасштабной структурой Вселенной: обладая остаточной тепловой скоростью в момент выхода из равновесия с первичной плазмой, стерильные нейтрино свободно разлетаются, сглаживая неоднородности плотности вещества на малых масштабах, а сравнение с данными о поглощении в линии Lyman-α в спектрах далеких квазаров исключает массы вплоть до нескольких кэВ [12; 13].

Помимо согласования с приведенными космологическими ограничениями, стерильное нейтрино должно эффективно рождаться в ранней Вселенной в количестве, соответствующем наблюдаемой плотности темной материи. Простейшим вариантом служит нерезонансное рождение за счет осцилляций с активными нейтрино (механизм Додельсона–Уидроу) [14]. К более сложным относятся резонансное рождение в присутствии лептонной асимметрии первичной плазмы [15] и рождение при распадах дополнительных тяжелых частиц [16]. Различные механизмы приводят к различным распределениям стерильных нейтрино по скоростям, что позволяет частично ослабить ограничение, следующее из свободного разлета, и расширить область масс, совместимую с наблюдениями.

Заявленное в 2014 году обнаружение неопознанной линии на энергии около 3.5 кэВ [17; 18], согласующейся с гипотезой о распаде стерильного нейтрино с массой около 7.1 кэВ, впоследствии не подтвердилось [19; 20], однако послужило мощным стимулом для развития данного направления исследований. Основной урок этой истории состоит в том, что обнаружение сигнала от космологической популяции стерильных нейтрино принципиально возможно с помощью современных рентгеновских инструментов, но при этом необходимо использовать методы, свободные от систематических неопределенностей моделирования астрофизического фона.

Альтернативным сценарием, объясняющим стабильность частиц темной материи, служит наличие механизма, запрещающего распад отдельной частицы, но допускающего аннигиляцию пары частиц темной материи при их встрече (см., напр., [21]). Отсутствие прямых свидетельств существования подобных легких частиц вполне естественно, если их связь с видимым сектором крайне слаба: обширный класс таких сценариев составляет предмет активно развивающегося направления исследований слабосвязанных частиц (feebly interacting particles, FIPs) [22]. Конкретные модели, реализующие подобную сверхслабую связь для частиц кэВ-ного масштаба масс, активно рассматриваются в литературе [23; 24].

Для частиц с массами порядка ГэВ–ТэВ аналогичный поиск линии аннигиляции в гамма-диапазоне по данным наблюдений карликовых сфероидальных галактик Местной группы уже проведен обсерваторией Fermi и не выявил значимого сигнала, что дало одни из наиболее строгих ограничений на сечение аннигиляции в этом диапазоне масс и мотивирует смещение поиска в сторону меньших масс [25]. В кэВ-ном диапазоне поиск аннигиляции проводился по данным наблюдений Млечного Пути, галактики M31, карликовых галактик и других астрофизических источников [26—29]. Тем не менее этот канал изучен существенно слабее, чем радиационный распад, что делает его одной из наиболее перспективных областей для новых поисков.

Нижняя граница массы аннигилирующей темной материи определяется механизмом ее рождения в ранней Вселенной. Для частиц, рождающихся в тепловом равновесии с первичной плазмой и потому обладающих вполне

определенным сечением аннигиляции, она следует из того, что продукты аннигиляции в эпоху первичного нуклеосинтеза и рекомбинации изменяют степень ионизации плазмы и искажают анизотропию реликтового излучения, причем соответствующее ограничение на сечение ужесточается с уменьшением массы частицы [30; 31]. Для частиц со сверхслабой связью с видимым сектором подобного сечения не возникает по построению: они рождаются не в тепловом равновесии, а через вмораживание (freeze-in), что приводит к собственному распределению по скоростям и к ограничению снизу из требования согласия с наблюдаемой мелкомасштабной структурой Вселенной — по механизму, аналогичному по своей природе свободному разлету стерильных нейтрино [23]. Таким образом, кэВ-ный диапазон масс оказывается заключенным между этими ограничениями снизу и надежно исследованным ГэВ–ТэВ диапазоном сверху, что делает аннигилирующую темную материю этого масштаба масс во многом аналогичной, но существенно менее изученной альтернативой распадающимся стерильным нейтрино.

Как показано выше, поиск монохроматической линии от распадающейся или аннигилирующей темной материи в кэВ-ном диапазоне масс, лежащем ниже масс, доступных для проверки в лабораторных экспериментах с нейтрино и на коллайдерах, остается актуальной и во многом еще не закрытой задачей современной астрофизики. Поиск столь узкой спектральной особенности на фоне значительно превосходящего ее по интенсивности континуума предъявляет исключительно высокие требования к качеству калибровки используемого детектора, поскольку любая неучтенная систематика в модели энергетического отклика способна как имитировать несуществующий сигнал, так и замаскировать реально присутствующую линию. Это делает построение физически обоснованной, а не эмпирической модели отклика необходимым условием достоверности итогового результата.

Большинство орбитальных рентгеновских обсерваторий предназначено для точечных наблюдений заранее выбранных целей и потому не приспособлено для поиска сигнала, распределенного по всему небу в соответствии с профилем гало Галактики. Телескоп СРГ/ART-XC им. М. Н. Павлинского [32], напротив, работает именно в режиме обзора и за первые два года эксплуатации четыре раза покрыл всю небесную сферу. При этом ART-XC обладает широким полем зрения и высокой чувствительностью в диапазоне энергий примерно 4–12 кэВ, оставаясь работоспособным вплоть до 30 кэВ, что делает его хорошо приспособленным к поиску сигнала от темной материи в обсуждаемом кэВ-ном диапазоне масс.

Независимую проверку результатов, полученных по данным СРГ/ART-XC, обеспечивает орбитальная обсерватория NuSTAR [33], также работающая в жестком рентгеновском диапазоне и охватывающая тот же диапазон масс частиц темной материи. Накопленный за 11 лет массив ее наблюдений в режиме боковой засветки позволяет искать узкую спектральную линию принципиально иным способом: по неоднородности ожидаемого сигнала в пределах детектора, а не по его распределению по небесной сфере. По этим данным ранее уже

был выполнен поиск радиационного распада стерильных нейтрино [34], а распространение того же подхода на аннигилирующую темную материю дополняет результаты ART-XC независимым ограничением, полученным другим методом и на другом инструменте.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью настоящей диссертационной работы является поиск наблюдательных проявлений темной материи кэВ-ного диапазона масс в жестком рентгеновском диапазоне по данным орбитальных телескопов СРГ/ART-XC и NuSTAR, а также построение физически мотивированной модели инструментального отклика детекторов СРГ/ART-XC, обеспечивающей необходимую для подобного поиска точность.

Гало Млечного Пути, внутри которого расположена Солнечная система, является ближайшим и потому наиболее ярким источником сигнала от распадающейся или аннигилирующей темной материи, что делает поиск подобного сигнала в данных обзора всего неба, выполняемого телескопом СРГ/ART-XC, естественной первой задачей настоящей работы. Достижение необходимой для такого поиска точности возможно лишь при использовании физически обоснованной модели энергетического отклика детекторов. Независимой проверкой результата по гало Галактики служит анализ карликовых сфероидальных галактик Местной группы: являясь темными гало той же природы, но существенно меньшей массы, они дают заведомо более слабый сигнал, однако почти полное отсутствие собственного астрофизического фона делает их чистой проверкой, свободной от систематических неопределенностей, характерных для анализа гало Галактики. Дополнительным подтверждением полученных результатов служит анализ данных обсерватории NuSTAR, выполненный по принципиально иной методике, но на основе данных, охватывающих тот же диапазон масс темной материи.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка физически мотивированной модели энергетического отклика детекторов телескопа СРГ/ART-XC, учитывающей ряд тонких физических эффектов формирования сигнала, ранее не принимавшихся во внимание.
2. Поиск сигнала радиационного распада стерильных нейтрино в диффузном рентгеновском спектре гало Млечного Пути по данным всего неба, полученным телескопом СРГ/ART-XC.
3. Поиск сигнала аннигиляции темной материи в гало Млечного Пути и в ансамбле карликовых сфероидальных галактик Местной группы по данным СРГ/ART-XC.
4. Поиск сигнала аннигиляции темной материи по данным 11-летних наблюдений обсерватории NuSTAR в режиме боковой засветки.

Научная новизна. Научная новизна результатов инструментальной части работы заключается в физически обоснованном описании ряда эффектов формирования сигнала в детекторах СРГ/ART-XC, которые ранее либо не рассматривались, либо учитывались лишь эмпирическими поправками. Ключевым

результатом является детальное исследование влияния взаимодействия рентгеновского излучения с приповерхностным слоем кристалла детектора на форму регистрируемого спектра: этот эффект ранее не был должным образом учтен в модели отклика детекторов ART-XC, хотя именно он вносит существенный вклад в систематические искажения формы спектральной линии в мягкой части рабочего диапазона телескопа. Впервые для детекторов СРГ/ART-XC предложено физически мотивированное описание нелинейности энергетического отклика, связывающее ее происхождение с конкретными физическими процессами формирования сигнала. Разработаны методы характеризации шумов считывающей электроники детекторов, позволяющие связать наблюдаемое уширение спектральных линий с конкретными источниками шума в электронном тракте прибора. Предложена и применена к многолетним данным ART-XC методика характеризации деградации детекторов, обусловленной накопленной радиационной дозой. Дополнительно рассмотрен качественный подход к описанию эффекта деления заряда между соседними стрипами детектора, носящий вспомогательный характер по отношению к перечисленным выше результатам.

Научная новизна результатов, связанных с поиском темной материи, определяется как полученными ограничениями на параметры распадающейся и аннигилирующей темной материи, так и особенностями использованных подходов к анализу данных. Поиск сигнала распада и аннигиляции темной материи по данным всего неба проводился и ранее, однако для этого использовались инструменты без фокусирующей оптики, в которых фон учитывался принципиально иначе. В настоящей работе для решения этой задачи впервые применен рентгеновский телескоп с фокусирующей оптикой — СРГ/ART-XC, — а сам поиск основан на методе дифференциального вычитания инструментального фона. Кроме того, в работе впервые выполнен совместный анализ сигнала от ансамбля карликовых сфероидальных галактик Местной группы в рентгеновском диапазоне: ранее подобный совместный анализ проводился лишь в гамма-диапазоне обсерваторией Fermi, тогда как построение изображений в жестком рентгеновском диапазоне, реализованное на телескопе ART-XC, впервые сделало такой подход возможным.

Теоретическая и практическая значимость работы. Практическая значимость работы определяется в первую очередь построенной моделью энергетического отклика детекторов телескопа СРГ/ART-XC, которая в дальнейшем может использоваться для повышения точности любых спектральных измерений телескопа, выходящих за рамки задачи поиска темной материи. Кроме того, предложенная модель позволила усовершенствовать алгоритм восстановления энергии зарегистрированных событий, точность которого достигла 1.5%. Подобные усовершенствования представляют самостоятельную практическую ценность для всех научных задач, решаемых с использованием телескопа СРГ/ART-XC, включая измерение параметров горячего газа в скоплениях галактик и исследование узких спектральных особенностей в спектрах компактных объектов.

Теоретическая значимость работы обусловлена полученными ограничениями на параметры темной материи кэВ-ного диапазона масс. Ограничения на угол смешивания стерильных нейтрино, полученные по данным СРГ/ART-XC, согласуются с независимыми результатами обсерватории NuSTAR и дополняют их в области жестких энергий рентгеновского диапазона. В совокупности с независимыми ограничениями снизу, следующими из условий первичного нуклеосинтеза, эти результаты практически полностью закрывают допустимую область параметров для простейшего механизма образования стерильных нейтрино в ранней Вселенной, что ставит под сомнение жизнеспособность данного сценария в его простейшей форме и стимулирует развитие альтернативных механизмов образования подобной темной материи. Для сценария аннигилирующей темной материи аналогичного независимого ограничения снизу на сечение аннигиляции в настоящее время не существует, вследствие чего полученный верхний предел не позволяет полностью закрыть пространство параметров модели. Тем не менее это ограничение улучшает предыдущие результаты примерно на порядок величины и является наиболее сильным среди существующих на сегодняшний день, что делает его надежным ориентиром для проверки широкого круга теоретических моделей, предсказывающих аннигиляцию частиц темной материи в пару фотонов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана физически мотивированная модель энергетического отклика стриповых CdTe-детекторов телескопа СРГ/ART-XC, обеспечивающая воспроизведение спектра бортового калибровочного источника во всем рабочем диапазоне энергий на протяжении всего срока эксплуатации телескопа. Модель позволила достигнуть точности восстановления энергии фотонов в 1.5% и описать 10%-ные 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 $\sin^2(2\theta) < 1 \times 10^{-11}$–$7 \times 10^{-14}$ для соответствующего диапазона масс, что при механизме рождения Додельсона–Уидроу соответствует верхним пределам на параметр плотности $\Omega_s h^2 < 3 \times 10^{-4}$–$8 \times 10^{-6}$. 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: $\langle \sigma v \rangle < 5 \times 10^{-35}$–$1 \times 10^{-32}$ 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 $\langle \sigma v \rangle < 2.5 \times 10^{-33}$ см^3/с.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается комплексным подходом, сочетающим анализ данных наблюдений космических аппаратов СРГ/ART-XC и NuSTAR со статистическим моделированием и сопоставлением с теоретическими предсказаниями рассматриваемых моделей темной материи. Обработка данных обоих инструментов производилась с использованием стандартного, широко апробированного научным сообществом программного обеспечения. Ожидаемый сигнал от распада и аннигиляции темной материи рассчитывался на основе устоявшихся теоретических моделей, неоднократно применявшихся в независимых работах других авторов. Устойчивость и корректность используемых статистических методов поиска сигнала проверены путем моделирования на большом числе искусственных спектров, а достоверность построенной модели отклика детекторов СРГ/ART-XC подтверждается ее согласием с независимыми измерениями бортового калибровочного источника на всем протяжении срока эксплуатации телескопа. Дополнительным подтверждением достоверности служит согласие полученных ограничений на параметры темной материи с независимыми результатами других рентгеновских и гамма-обсерваторий. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных журналах и прошли апробацию на российских и международных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская конференция «*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2022*», 2022 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.
2. XX конференция молодых ученых «*Фундаментальные и прикладные космические исследования*», 2023 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.
3. XXI конференция молодых ученых «*Фундаментальные и прикладные космические исследования*», 2024 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.
4. Всероссийская астрономическая конференция 2024 года «*Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр*», 2024 год, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, Зеленчукский р-н, п. Нижний Архыз.
5. Международная конференция «*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2024*», 2024 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.
6. Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В. А. Рубакова, 2025 год, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 32А.
7. XXII конференция молодых ученых «*Фундаментальные и прикладные космические исследования*», 2025 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

8. Russian–Chinese Meeting on High Energy Astrophysics, 2025 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.
9. Всероссийская конференция «*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2025*», 2025 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.
10. Международная конференция молодых ученых по космическим исследованиям, 2026 год, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

Работа также докладывалась на семинарах отдела Астрофизики высоких энергий Института космических исследований Российской академии наук и на Астрофизическом семинаре Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Личный вклад автора. Работа выполнена в сотрудничестве с коллегами из Института космических исследований РАН и Института ядерных исследований РАН. Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Первые три работы из списка публикаций посвящены поиску темной материи: для анализа данных СРГ/ART-XC методика поиска сигнала разработана автором самостоятельно. При поиске темной материи по данным NuSTAR использовалась ранее предложенная коллегами методика анализа данных [34], однако представленные в диссертации ограничения на параметры аннигилирующей темной материи получены автором лично путем самостоятельной реинтерпретации этих данных. Четвертая работа посвящена калибровке детекторов телескопа СРГ/ART-XC: автором лично разработан программный комплекс, объединяющий пакет GEANT4 для моделирования взаимодействия излучения с кристаллом детектора и специализированное программное обеспечение собственной разработки для описания последующих физических процессов и работы считывающей электроники. Базовая модель электроники была предложена коллегами, тогда как ее последующее развитие и уточнение выполнены автором самостоятельно. Подготовка всех публикаций по теме диссертации, включая написание текста статей и ответов на замечания рецензентов, проводилась автором лично. Положения, выносимые на защиту, основаны на результатах указанных публикаций и согласованы со всеми соавторами.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель и задачи работы, излагаются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся сведения о достоверности, апробации и личном вкладе автора, а также о публикациях по теме диссертации. Диссертация посвящена решению двух взаимосвязанных задач: построению физически мотивированной модели энергетического отклика детекторов телескопа СРГ/ART-XC и поиску наблюдательных проявлений темной материи кэВ-ного диапазона масс по данным телескопов СРГ/ART-XC и NuSTAR. Эти задачи

тесно связаны между собой: чувствительность поиска узкой спектральной линии темной материи на фоне значительно превосходящего ее по интенсивности континуума напрямую определяется точностью, с которой инструментальные особенности спектра могут быть отделены от гипотетического астрофизического сигнала.

Первая глава посвящена построению физически мотивированной модели энергетического отклика полупроводниковых CdTe-детекторов телескопа СРГ/ART-XC. Основным источником калибровочных данных служит бортовой калибровочный источник (БКИ) на основе изотопов америция-241 и железа-55. Спектр БКИ содержит набор спектральных линий в диапазоне от 5.89 до 59.54 кэВ и регулярно измеряется на протяжении всего срока эксплуатации телескопа. Сопоставление модельных и экспериментальных спектров калибровочного источника на каждом этапе построения модели позволяет последовательно выявлять и физически объяснять систематические эффекты формирования сигнала в детекторе, а не описывать их эмпирическими поправками.

Модель энергетического отклика построена по иерархическому принципу и включает четыре последовательно уточняемых уровня.

- **Базовая модель (уровень L0)**, включающая в себя взаимодействие фотонов с кристаллом, дрейф и деление заряда между стрипами, базовую модель электроники с постоянным шумом.
- **Расширенная модель электроники (уровень L1)**, включающая в себя зависимость шума электроники от энергии и нелинейность энергетической шкалы прибора.
- **Дополнительные эффекты, связанные с кристаллом (уровень L2)**, включающие в себя уточненную модель деления заряда и взаимодействие с приповерхностным слоем кристалла.
- **Модель радиационного повреждения детектора (уровень L3)**, включающая в себя моделирование изменения энергетического отклика за счет деградации кристалла детектора.

Последовательное включение перечисленных эффектов устраняет расхождения модели с экспериментом одно за другим, а полная модель уровня L3 точно воспроизводит форму, положение и ширину всех спектральных линий в важном для научного анализа диапазоне энергий (4–30 кэВ) на протяжении всего срока эксплуатации телескопа.

Уровень L0 моделирует поглощение фотона в кристалле детектора (средствами GEANT4), генерацию заряда с учетом статистики Фано, дрейф заряда по уравнению Хехта, геометрическое деление заряда между стрипами и базовую модель электроники. Модель качественно воспроизводит спектр калибровочного источника: верно предсказаны положения пиков вылета, уровень межстрипового континуума и асимметричный низкоэнергетический хвост самой жесткой линии. Вместе с тем модель выявляет два систематических расхождения с экспериментом: нелинейность энергетической шкалы и неучтенную зависимость ширины линий от энергии.

Уровень L1 дополняет базовую модель зависимостью шума электроники от энергии, определяемой по сигналу в боковых стрипах, и нелинейностью шкалы «канал–энергия», проявляющейся в различии коэффициентов усиления в мягкой и жесткой частях диапазона. Учет обоих эффектов приводит к точному совпадению положений всех линий калибровочного источника и заметно улучшает воспроизведение спектрального разрешения детектора. Тем не менее модель по-прежнему занижает уровень межстрипового континуума и число событий в низкоэнергетических хвостах линий, что наиболее заметно для линии 5.89 кэВ.

Уровень L2 включает эмпирическую поправку к размеру зарядового облака, устраняющую занижение межстрипового континуума, и модель взаимодействия излучения с приповерхностным слоем кристалла, объясняющую избыток событий в низкоэнергетическом хвосте линии 5.89 кэВ. Оба уточнения устраняют соответствующие расхождения с экспериментом, а достигнутое по данным боковых стрипов согласие проявляется и в спектре центрального стрипа. В техническом диапазоне энергий сохраняется небольшой избыток модельных событий, связанных с делением заряда, вблизи линии 59.54 кэВ, не влияющий на точность анализа в научном диапазоне.

Уровень L3 описывает деградацию детекторов вследствие накопленной радиационной дозы. Неэффективность переноса заряда приводит к дополнительному уширению и смещению спектральных линий, нарастающим со временем. Форма этого уширения точнее описывается обобщенным нормальным распределением, чем стандартной гауссианой, а его параметры определяются отдельно для каждой эпохи наблюдений. Учет данного эффекта устраняет последнее из выявленных систематических расхождений и обеспечивает точное восстановление энергии на протяжении всего срока эксплуатации телескопа, а не только в начальный период его работы.

На основе построенной модели разработан алгоритм восстановления энергии зарегистрированных событий, обеспечивающий точность около 1.5%. Сопоставление с ранее использовавшейся матрицей отклика показывает, что новая модель заметно точнее воспроизводит ширину и поток всех линий калибровочного источника, включая низкоэнергетический хвост линии 5.89 кэВ, отсутствующий в старой матрице (рис. 1). Учет данного эффекта необходим не только при анализе научных данных телескопа, но и при последующей калибровке его эффективной площади в мягком рентгеновском диапазоне. Помимо решения задачи поиска темной материи, построенная модель имеет самостоятельную практическую значимость: она позволяет повысить точность любых спектральных измерений телескопа СРГ/ART-XC, включая измерение параметров горячего газа в скоплениях галактик и исследование узких спектральных особенностей в спектрах компактных источников.

Вторая глава посвящена поиску сигнала радиационного распада и аннигиляции темной материи кэВ-ного диапазона масс по данным телескопа СРГ/ART-XC. Поиск проведен по данным первых четырех полных обзоров всего неба для двух независимых сценариев — радиационного распада стерильных

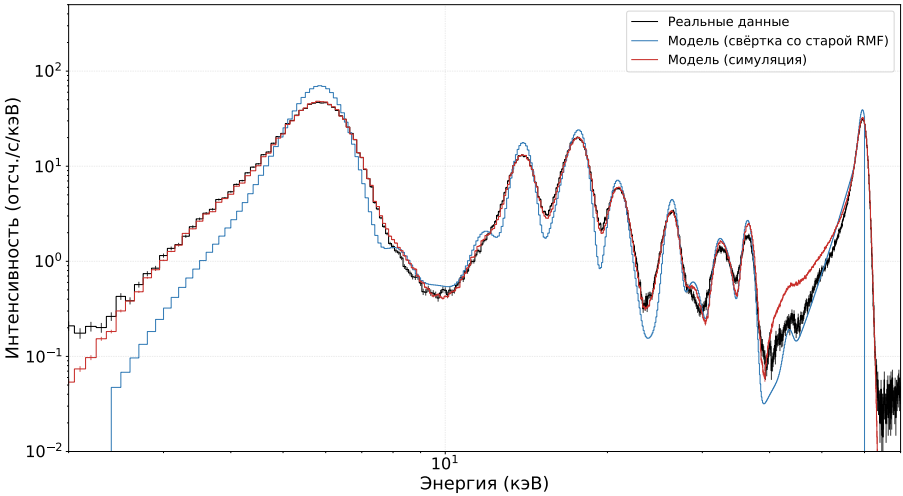


Рисунок 1 — Сравнение спектра, восстановленного новой моделью отклика (черная линия), с результатом моделирования (красная линия) и с расчетом по ранее использовавшейся матрице отклика (синяя линия).

нейтрино и аннигиляции темной материи — и для двух астрофизических целей: гало Млечного Пути и ансамбля карликовых сфероидальных галактик Местной группы. В основе методики лежит контраст между двумя компонентами наблюдаемого спектра: инструментальным фоном и ожидаемым сигналом темной материи. Инструментальный фон возникает при взаимодействии заряженных частиц космических лучей с конструкцией аппарата и потому не зависит от направления наблюдения, оставаясь однородным по небу. Ожидаемый же сигнал темной материи, напротив, сосредоточен преимущественно в направлении центра Галактики, где выше плотность гало. Небо разделяется на внутреннюю область I — конус с углом полураствора $60°$ в направлении центра Галактики, — и внешнюю область II, охватывающую оставшуюся часть неба. Вычитание накопленных в этих областях спектров позволяет выделить искомую линию напрямую, без построения физической модели фона, что избавляет итоговый результат от систематических неопределенностей, неизбежно связанных с любой такой моделью. Ожидаемая интенсивность сигнала определяется D-фактором в случае распада и J-фактором в случае аннигиляции — интегралами вдоль луча зрения от плотности темной материи и от квадрата ее плотности соответственно.

Поиск линии распада проведен в диапазоне масс стерильных нейтрино 12–40 кэВ по данным первых двух лет наблюдений СРГ/ART-XC. Полученные невязки не отклоняются от нулевого уровня более чем на 2σ ни в одном энергетическом бине, что соответствует отсутствию сигнала в пределах статистической погрешности. Итоговое верхнее ограничение $\sin^2(2\theta) < 1 \times 10^{-11}$–$7 \times 10^{-14}$ для соответствующего диапазона масс является первым в истории ограничением

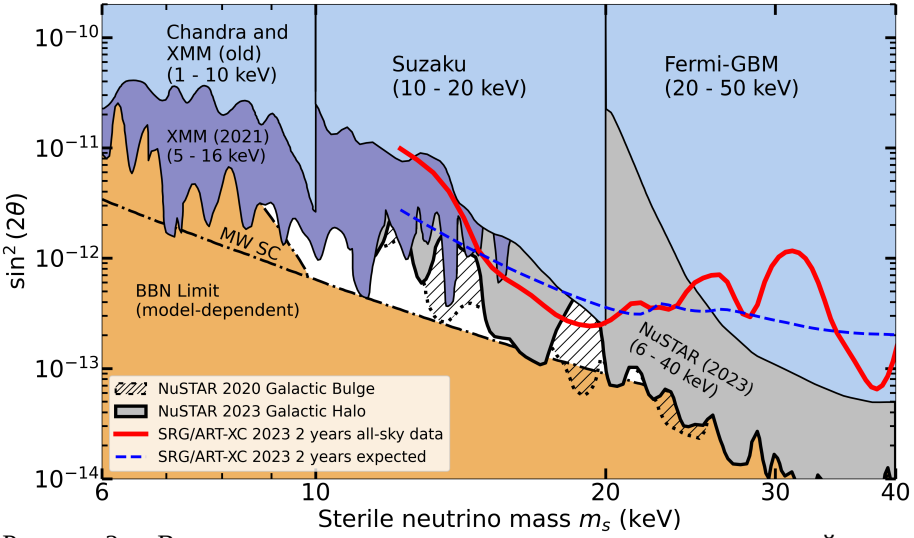


Рисунок 2 — Верхнее ограничение на угол смешивания стерильных нейтрино, полученное по данным СРГ/ART-XC (красная линия), в сравнении с ранее известными ограничениями.

на параметры распадающихся стерильных нейтрино, полученным по рентгеновским данным с равномерным покрытием всего неба, и практически совпадает с ожидаемой чувствительностью обзора. Оно независимо подтверждает ограничения, ранее полученные телескопом NuSTAR по точечным наблюдениям балджа и других областей Галактики, — результат, особенно ценный с учетом того, что оба ограничения опираются на принципиально разные наборы данных и подвержены влиянию собственных статистических флуктуаций (рис. 2).

Поиск аннигилирующей темной материи в гало Млечного Пути выполнен по тем же данным, что и поиск распада, однако в расширенном диапазоне энергий 4–30 кэВ, ставшем доступным благодаря повышенной точности модели энергетического отклика детекторов. Для оценки ожидаемой чувствительности метод дополнен процедурой бутстрепа: на основе фонового спектра сгенерировано 5000 искусственных наборов данных, для каждого из которых повторена полная процедура поиска сигнала. Полученное верхнее ограничение на сечение аннигиляции в в s-волне хорошо согласуется с медианным значением этого ожидаемого распределения на всем рассмотренном диапазоне масс, что свидетельствует об отсутствии значимых систематических отклонений результата. Дополнительное сопоставление с несколькими альтернативными профилями плотности темной материи позволяет оценить систематическую неопределенность результата, связанную с выбором профиля. Полученное ограничение являлось на момент выполнения работы наиболее сильным среди ограничений,

полученных по данным рентгеновских наблюдений, для частиц темной материи с массами 4–15 кэВ.

Независимой проверкой результата по гало Галактики служит анализ ансамбля из 33 карликовых сфероидальных галактик Местной группы, а также отдельно рассмотренной недавно открытой ультратусклой галактики Ursa Major III/UNIONS 1, выделенной ввиду ее исключительно высокого ожидаемого J-фактора. Почти полное отсутствие у таких галактик собственных ярких рентгеновских источников делает их существенно более чистой целью, чем протяженное гало Млечного Пути, свободной от систематических неопределенностей, связанных с моделированием астрофизического фона. Для каждой галактики применена та же методика вычитания спектров двух областей неба, а итоговый сигнал получен суммированием вкладов по всей выборке. Полученное ограничение на сечение аннигиляции статистически независимо от результата по гало Галактики и сопровождается дополнительной оценкой систематической неопределенности, связанной с погрешностью самих J-факторов галактик.

Сводное сопоставление всех полученных в настоящей главе ограничений на сечение аннигиляции показано на рис. 3: результат по гало Млечного Пути сопоставлен с результатами по ансамблю из 33 карликовых сфероидальных галактик, отдельно с результатом по галактике Ursa Major III/UNIONS 1, а также с независимыми ограничениями, полученными по наблюдениям галактики M31 телескопом NuSTAR, по данным Planck и INTEGRAL/SPI. Ограничение по карликовым галактикам оказывается слабее ограничения для гало Галактики ввиду меньшей суммарной статистики, однако опирается на принципиально иной набор целей со значительно меньшими систематическими неопределенностями в определении плотности темной материи и потому служит ценным независимым перекрестным свидетельством. Поиск радиационного распада и поиск аннигиляции темной материи, представленные в настоящей главе, дополняют друг друга: ожидаемый сигнал по-разному зависит от плотности темной материи вдоль луча зрения в этих двух каналах, что делает их чувствительными к разным классам моделей темной материи.

Третья глава посвящена независимому поиску сигнала аннигиляции темной материи в гало Млечного Пути по данным одиннадцатилетнего архива наблюдений обсерватории NuSTAR в режиме боковой засветки. Реализация общего принципа поиска сигнала здесь отличается от использованной для телескопа СРГ/ART-XC: в основе лежит не карта всего неба, а особый режим наблюдений, при котором детектор регистрирует излучение, попадающее в него нефокусированным образом. Прежде чем перейти к спектральному анализу, из данных удаляется вклад фотонов, сфокусированных оптической системой NuSTAR: автоматизированный алгоритм на основе вейвлет-преобразования выявляет и маскирует локализованные на детекторе структуры, связанные со сфокусированными точечными источниками, отделяя их от плавно меняющегося сигнала боковой засветки. После этой процедуры на детекторе остаются лишь две компоненты: пространственно однородный инструментальный фон и сигнал

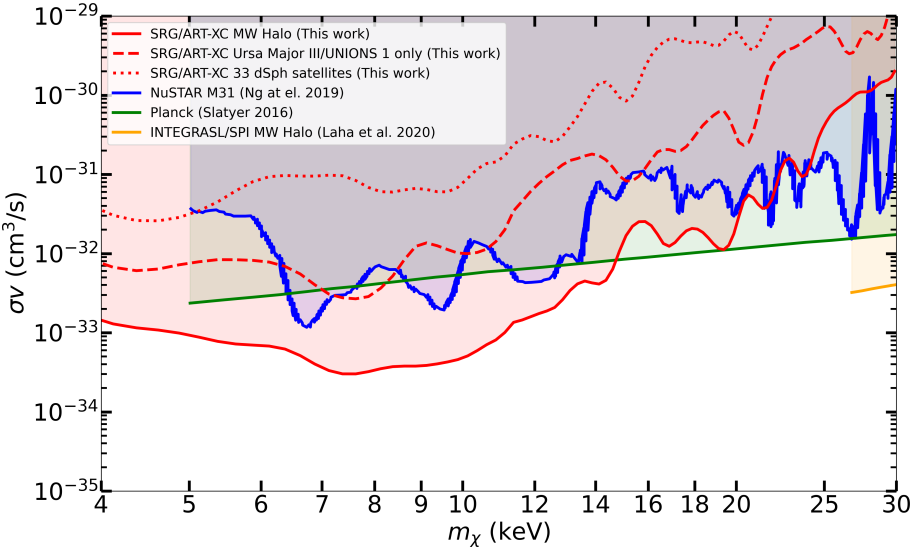


Рисунок 3 — Верхние ограничения на сечение аннигиляции темной материи, полученные по гало Млечного Пути и по ансамблю карликовых сфероидальных галактик по данным СРГ/ART-XC, в сравнении с результатами других инструментов.

от боковой засветки, интенсивность которого в каждом пикселе пропорциональна доле открытого ему участка неба и потому неоднороден по детектору. Обе компоненты одновременно определяются максимизацией функции правдоподобия по данным каждого отдельного наблюдения, что позволяет выделить спектр боковой засветки без построения физической модели инструментального фона. Именно этот контраст между однородным фоном и повторяющим геометрию апертуры телескопа сигналом лежит в основе поиска сигнала темной материи, аналогично тому, как это сделано для телескопа СРГ/ART-XC в предыдущей главе, хотя и в существенно иной наблюдательной реализации.

Извлеченный спектр боковой засветки содержит вклад двух астрофизических компонент. Первая — длительно усредненное излучение Солнца, описываемое крутым степенным законом. Вторая — космический рентгеновский фон, описываемый степенным законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях, часть параметров которого зафиксирована по данным из литературы. Совместная аппроксимация этих двух компонент хорошо описывает наблюдаемый спектр в диапазоне энергий 3–20 кэВ. Построенная модель фона используется далее как основа для поиска узкой линии темной материи: искомый сигнал ищется как локальное отклонение данных от этого гладкого континуума.

Систематический поиск узкой линии в диапазоне масс 3–20 кэВ, соответствующей аннигиляции темной материи в пару фотонов, не выявил статистически значимого избытка. Полученное верхнее ограничение на не зависящее от

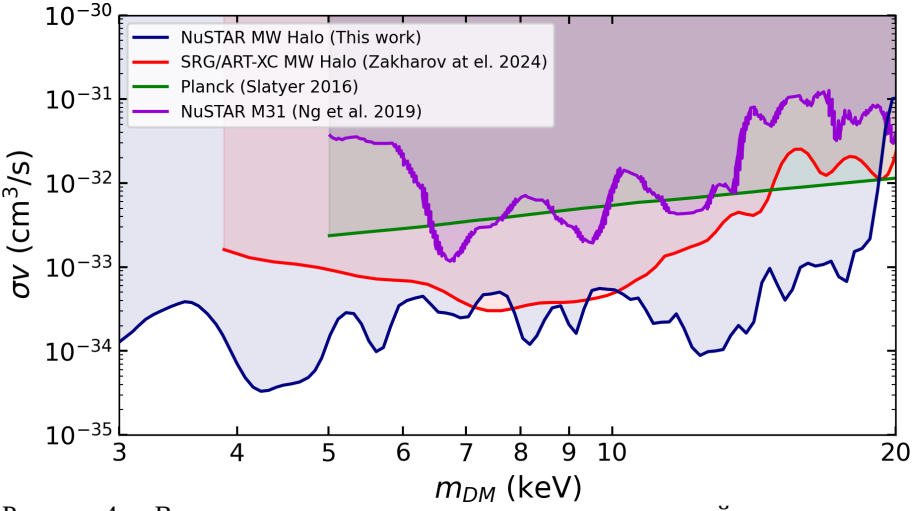


Рисунок 4 — Верхние пределы на сечение аннигиляции темной материи, полученные обсерваторией NuSTAR (темно-синяя линия), в сравнении с результатом СРГ/ART-XC (красная линия) и результатами других инструментов.

скорости сечение аннигиляции является на сегодняшний день наиболее жестким в данном диапазоне масс и хорошо согласуется с пределами, полученными на других рентгеновских инструментах (рис. 4). Этот результат служит независимым подтверждением и существенным усилением ограничения, полученного для того же гало Млечного Пути по данным двухлетнего обзора всего неба во второй главе. Поскольку два метода опираются на принципиально разные подходы к выделению сигнала — пространственно-дифференциальный анализ карты всего неба в одном случае и неоднородность полезного сигнала по детектору в другом, — эти результаты следует рассматривать как взаимно дополняющие, а не конкурирующие.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработана физически мотивированная модель энергетического отклика детекторов рентгеновского телескопа ART-XC обсерватории «Спектр-РГ», основанная на последовательном описании физических процессов формирования сигнала и обеспечивающая точное восстановление энергетических характеристик детекторов во всем рабочем диапазоне энергий и на всем протяжении космического полета.
2. По данным первых четырех полных обзоров всего неба, выполненных телескопом СРГ/ART-XC, получены независимые верхние ограничения на угол смешивания распадающихся стерильных нейтрино массой 12–40 кэВ, подтверждающие и дополняющие ранее известные ограничения, полученные другими рентгеновскими инструментами. Также показано, что в рамках механизма рождения Додельсона–Уидроу

стерильные нейтрино с исследованными параметрами массы и смешивания заведомо не способны обеспечить полностью наблюдаемую плотность темной материи во Вселенной.

3. По данным СРГ/ART-XC проведен поиск линии от аннигиляции темной материи в гало Млечного Пути. Получены верхние ограничения на сечение аннигиляции, являвшиеся на момент выполнения работы наиболее сильными среди ограничений, полученных по данным рентгеновских наблюдений, для частиц темной материи с массами 4–15 кэВ.
4. Независимо получены ограничения на параметры аннигилирующей темной материи по наблюдениям 34 карликовых сфероидальных галактик Местной группы: ансамбля из 33 галактик и отдельно ультратусклой галактики Ursa Major III/UNIONS 1.
5. По данным одиннадцатилетнего массива наблюдений рентгеновской обсерватории NuSTAR в режиме боковой засветки получены наиболее строгие на сегодняшний день ограничения на сечение аннигиляции частиц темной материи с массами 3–20 кэВ, независимо подтверждающие и дополняющие ограничения, полученные ранее по данным СРГ/ART-XC.

Согласованность результатов, полученных в разных главах, при независимости использованных инструментов и методик анализа служит ключевым подтверждением надежности полученной физической картины. Ограничение на сечение аннигиляции, полученное по данным СРГ/ART-XC для гало Млечного Пути, было независимо подтверждено и значительно усилено анализом архива обсерватории NuSTAR, а результат по ансамблю карликовых сфероидальных галактик, опирающийся на существенно иной набор целей, дополнительно снижает зависимость итогового вывода от неопределенностей в моделировании гало самой Галактики. Дальнейшее развитие построенной модели энергетического отклика связано с переходом к полному самосогласованному расчету формирования сигнала в детекторе, а также с ее применением для калибровки других характеристик телескопа, в частности эффективной площади в мягкой части энергетического диапазона. Перспективы дальнейшего поиска темной материи связаны с анализом данных последующих обзоров всего неба телескопом СРГ/ART-XC, привлечением данных телескопа eROSITA обсерватории «Спектр-РГ» и расширением набора исследуемых астрофизических целей, включая близкие скопления галактик.

В заключение хочу выразить благодарность своим научным руководителям: Р. А. Буренину — за приглашение в отдел и первые шаги в науке; А. А. Вихлинину — за научную школу и поддержку на всех этапах подготовки диссертации. Благодарю соавторов публикаций и коллег, принимавших участие в обсуждении результатов работы, за плодотворное сотрудничество. Признателен сотрудникам отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН за моральную поддержку и ценные советы. Благодарю также близких мне людей, чьи забота и поддержка позволили сосредоточиться на научной работе.

Публикации автора по теме диссертации

A1. All-sky limits on sterile neutrino galactic dark matter obtained with SRG/ART-XC after two years of operations / E. I. Zakharov [et al.] // Physical Review D. — 2024. — Jan. — Vol. 109, no. 2. — P. L021301. — arXiv: 2303.12673 [astro-ph.HE]. — URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.L021301.

A2. Constraints on the parameters of keV-scale mass annihilating dark matter obtained with SRG/ART-XC observations / E. I. Zakharov [et al.] // Physical Review D. — 2024. — Dec. — Vol. 110, no. 12. — P. 123026. — arXiv: 2407.18371 [astro-ph.HE]. — URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.123026.

A3. Search for a photon peak from keV-scale dark matter annihilation with NuSTAR: Constraints on σv after 11 years of observations / E. I. Zakharov [et al.] // Physical Review D. — 2025. — Nov. — Vol. 112, no. 10. — P. 103037. — arXiv: 2509.08506 [astro-ph.HE]. — URL: https://doi.org/10.1103/f1w8-bcny.

A4. Полетная калибровка спектрального отклика детекторов телескопа ART-XC обсерватории «Спектр-РГ» / Е. И. Захаров [и др.] // Письма в Астрономический журнал. — 2026. — Т. 52, № 9. — С. 457. — URL: https://doi.org/10.31857/S0320010826090013.

Список литературы

1. *Planck Collaboration*. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters / Planck Collaboration, N. Aghanim, et al. // Astronomy and Astrophysics. — 2020. — Sept. — Vol. 641. — A6. — arXiv: 1807.06209 [astro-ph.CO]. — URL: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910.

2. *Jungman, G.* Supersymmetric dark matter / G. Jungman, M. Kamionkowski, K. Griest // Physics Reports. — 1996. — Mar. — Vol. 267, no. 5/6. — P. 195—373. — arXiv: hep-ph/9506380 [hep-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/0370-1573(95)00058-5.

3. *Cirelli, M.* Dark Matter / M. Cirelli, A. Strumia, J. Zupan // arXiv e-prints. — 2024. — June. — arXiv:2406.01705. — arXiv: 2406.01705 [hep-ph]. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.01705.

4. *Asaka, T.* The νMSM, dark matter and neutrino masses / T. Asaka, S. Blanchet, M. Shaposhnikov // Physics Letters B. — 2005. — Dec. — Vol. 631, no. 4. — P. 151—156. — arXiv: hep-ph/0503065 [hep-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2005.09.070.

5. *Asaka, T.* The νMSM, dark matter and baryon asymmetry of the universe / T. Asaka, M. Shaposhnikov // Physics Letters B. — 2005. — July. — Vol. 620, no. 1/2. — P. 17—26. — arXiv: hep-ph/0505013 [hep-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2005.06.020.

6. *Schechter, J.* Neutrino masses in SU(2) $\otimes$ U(1) theories / J. Schechter, J. W. F. Valle // Physical Review D. — 1980. — Nov. — Vol. 22, no. 9. — P. 2227—2235. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.22.2227.

7. *Boyarsky, A.* The Role of Sterile Neutrinos in Cosmology and Astrophysics / A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, M. Shaposhnikov // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2009. — Nov. — Vol. 59, no. 1. — P. 191—214. — arXiv: 0901.0011 [hep-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1146/annurev.nucl.010909.083654.

8. *Pal, P. B.* Radiative decays of massive neutrinos / P. B. Pal, L. Wolfenstein // Physical Review D. — 1982. — Feb. — Vol. 25, no. 3. — P. 766—773. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.25.766.

9. *Abazajian, K.* Direct Detection of Warm Dark Matter in the X-Ray / K. Abazajian, G. M. Fuller, W. H. Tucker // The Astrophysical Journal. — 2001. — Dec. — Vol. 562, no. 2. — P. 593—604. — arXiv: astro-ph/0106002 [astro-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1086/323867.

10. *Tremaine, S.* Dynamical Role of Light Neutral Leptons in Cosmology / S. Tremaine, J. E. Gunn // Physical Review Letters. — 1979. — Feb. — Vol. 42, no. 6. — P. 407—410. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.407.

11. New constraints on the mass of fermionic dark matter from dwarf spheroidal galaxies / J. Alvey [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — Feb. — Vol. 501, no. 1. — P. 1188—1201. — arXiv: 2010.03572 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa3640.

12. *Colombi, S.* Large Scale Structure Tests of Warm Dark Matter / S. Colombi, S. Dodelson, L. M. Widrow // The Astrophysical Journal. — 1996. — Jan. — Vol. 458. — P. 1. — arXiv: astro-ph/9505029 [astro-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1086/176788.

13. New Constraints on the free-streaming of warm dark matter from intermediate and small scale Lyman-α forest data / V. Iršič [et al.] // Physical Review D. — 2017. — July. — Vol. 96, no. 2. — P. 023522. — arXiv: 1702.01764 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.96.023522.

14. *Dodelson, S.* Sterile-neutrinos as dark matter / S. Dodelson, L. M. Widrow // Physical Review Letters. — 1994. — Jan. — Vol. 72, no. 1. — P. 17—20. — arXiv: hep-ph/9303287 [hep-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.17.

15. *Shi, X.-D.* New Dark Matter Candidate: Nonthermal Sterile Neutrinos / X.-D. Shi, G. M. Fuller // Physical Review Letters. — 1999. — Apr. — Vol. 82, no. 14. — P. 2832—2835. — arXiv: astro-ph/9810076 [astro-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.2832.

16. *Shaposhnikov, M.* The νMSM, inflation, and dark matter / M. Shaposhnikov, I. Tkachev // Physics Letters B. — 2006. — Aug. — Vol. 639, no. 5. — P. 414—417. — arXiv: hep-ph/0604236 [hep-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2006.06.063.

17. Detection of An Unidentified Emission Line in the Stacked X-ray Spectrum of Galaxy Clusters / E. Bulbul [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2014. — July. — Vol. 789, no. 1. — P. 13. — arXiv: 1402.2301 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/789/1/13.

18. Unidentified Line in X-Ray Spectra of the Andromeda Galaxy and Perseus Galaxy Cluster / A. Boyarsky [et al.] // Physical Review Letters. — 2014. — Dec. — Vol. 113, no. 25. — P. 251301. — arXiv: 1402.4119 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.251301.

19. *Dessert, C.* The dark matter interpretation of the 3.5-keV line is inconsistent with blank-sky observations / C. Dessert, N. L. Rodd, B. R. Safdi // Science. — 2020. — Mar. — Vol. 367, no. 6485. — P. 1465—1467. — arXiv: 1812.06976 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.aaw3772.

20. Was There a 3.5 keV Line? / C. Dessert [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2024. — Apr. — Vol. 964, no. 2. — P. 185. — arXiv: 2309.03254 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ad2612.

21. *Batell, B.* Dark discrete gauge symmetries / B. Batell // Physical Review D. — 2011. — Feb. — Vol. 83, no. 3. — P. 035006. — arXiv: 1007.0045 [hep-ph]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.83.035006.

22. *Lanfranchi, G.* The Search for Feebly Interacting Particles / G. Lanfranchi, M. Pospelov, P. Schuster // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2021. — Sept. — Vol. 71. — P. 279—313. — arXiv: 2011.02157 [hep-ph]. — URL: https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102419-055056.

23. *D'Eramo, F.* Lower mass bounds on FIMP dark matter produced via freeze-in / F. D'Eramo, A. Lenoci // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2021. — Oct. — Vol. 2021, no. 10. — P. 045. — arXiv: 2012.01446 [hep-ph]. — URL: https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/10/045.

24. *Cheek, A.* Gemini dark matter / A. Cheek, Y.-C. Qiu, L. Tan // Physical Review D. — 2024. — Oct. — Vol. 110, no. 7. — P. 075021. — arXiv: 2407.01099 [hep-ph]. — URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.075021.

25. Searching for Dark Matter Annihilation from Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies with Six Years of Fermi Large Area Telescope Data / M. Ackermann [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — Dec. — Vol. 115, no. 23. — P. 231301. — arXiv: 1503.02641 [astro-ph.HE]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.231301.

26. New constraints on sterile neutrino dark matter from NuSTAR M31 observations / K. C. Y. Ng [et al.] // Physical Review D. — 2019. — Apr. — Vol. 99, no. 8. — P. 083005. — arXiv: 1901.01262 [astro-ph.HE]. — URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.083005.

27. *Laha, R.* INTEGRAL constraints on primordial black holes and particle dark matter / R. Laha, J. B. Muñoz, T. R. Slatyer // Physical Review D. — 2020. — June. — Vol. 101, no. 12. — P. 123514. — arXiv: 2004.00627 [astro-ph.CO]. — URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.123514.

28. An INTEGRAL/SPI view of reticulum II: particle dark matter and primordial black holes limits in the MeV range / T. Siegert [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2022. — Mar. — Vol. 511, no. 1. — P. 914—924. — arXiv: 2109.03791 [astro-ph.HE]. — URL: https://doi.org/10.1093/mnras/stac008.

29. *Siegert, T.* Sub-GeV dark matter annihilation: limits from Milky Way observations with INTEGRAL / T. Siegert, F. Calore, P. D. Serpico // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2024. — Feb. — Vol. 528, no. 2. — P. 3433—3440. — arXiv: 2401.03795 [astro-ph.HE]. — URL: https://doi.org/10.1093/mnras/stae104.

30. *Slatyer, T. R.* CMB Constraints on WIMP Annihilation: Energy Absorption During the Recombination Epoch / T. R. Slatyer, N. Padmanabhan, D. P. Finkbeiner // Physical Review D. — 2009. — Aug. — Vol. 80, no. 4. — P. 043526. — arXiv: 0906.1197 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.80.043526.

31. CMB constraints on Dark Matter models with large annihilation cross-section / S. Galli [et al.] // Physical Review D. — 2009. — July. — Vol. 80, no. 2. — P. 023505. — arXiv: 0905.0003 [astro-ph.CO]. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.80.023505.

32. The ART-XC telescope on board the SRG observatory / M. Pavlinsky [et al.] // Astronomy and Astrophysics. — 2021. — June. — Vol. 650. — A42. — arXiv: 2103.12479 [astro-ph.HE]. — URL: https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040265.

33. The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) High-energy X-Ray Mission / F. A. Harrison [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2013. — June. — Vol. 770, no. 2. — P. 103. — arXiv: 1301.7307 [astro-ph.IM]. — URL: https://doi.org/10.1088/0004-637X/770/2/103.

34. Strong Limits on keV-Scale Galactic Sterile Neutrino Dark Matter with Stray Light from NuSTAR after 11 Years of Operation / R. A. Krivonos [et al.] // Physical Review Letters. — 2024. — Dec. — Vol. 133, no. 26. — P. 261002. — arXiv: 2405.17861 [hep-ph]. — URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.261002.