

*На правах рукописи*

Баринов  
Владислав Валерьевич

Стерильные нейтрино как кандидаты  
на роль частиц темной материи

1.3.3 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**Научный руководитель:**

*Горбунов Дмитрий Сергеевич*, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел теоретической физики, главный научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Иванчик Александр Владимирович*, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), сектор теоретической астрофизики, ведущий научный сотрудник.

*Наумов Дмитрий Вадимович*, доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований» (ОИЯИ), лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова, заместитель директора лаборатории по научной работе.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте [www.inr.ru](http://www.inr.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.163.01,  
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы** Вопрос о природе темной материи является одним из наиболее актуальных вопросов современной фундаментальной физики. Как известно, темная материя проявляет себя только посредством гравитационного взаимодействия, и на сегодняшний день нет достаточно подтвержденных данных, раскрывающих не гравитационную природу темной материи. Тем не менее, продолжается активный поиск частиц темной материи, которые потенциально могут быть обнаружены вне рамок только гравитационного взаимодействия.

Одними из таких частиц являются так называемые стерильные нейтрино. Стерильные нейтрино – это гипотетические частицы, представляющие собой правые фермионы с нулевым электрическим зарядом [1, 2, 3, 4]. Они не участвуют в фундаментальных взаимодействиях кроме гравитационного. Данные частицы естественным образом возникают во многих расширениях Стандартной модели физики элементарных частиц и используются для объяснения различных аномалий, которые, к настоящему моменту, не находят объяснения в рамках Стандартной модели. Стерильные нейтрино не могут быть напрямую обнаружены в современных экспериментах, однако за счет того, что стерильные нейтрино могут смешиваться с активными нейтрино или распадаться на активные нейтрино и фотоны, их можно попытаться обнаружить по наблюдениям активных нейтрино или следов таких распадов в экспериментах и астрофизических наблюдениях.

В настоящий момент нет прямых свидетельств существования стерильных нейтрино. Однако можно интерпретировать результаты некоторых экспериментов по изучению осцилляций нейтрино или антинейтрино как переходы активных нейтрино в стерильные состояния с массами около 1 эВ. Однако, последние результаты реакторных экспериментов DANSS [5], STEREO [6], PROSPECT [7] сильно ограничивают допустимую область параметров стерильных нейтрино. Результат эксперимента MicroBooNE [8], так же расходится с результатом MiniBooNE [9], но не исключает наверняка гипотезу о стерильных нейтрино [10, 8]. Более того, на сегодняшний день единственное прямое свидетельство неполноты Стандартной модели физики элементарных

частиц дают нам осцилляции активных нейтрино. И в целом, результаты большинства экспериментов с нейтрино могут быть феноменологически описаны в моделях с 3 известными активными нейтрино [11]. Тем не менее, модели со стерильными нейтрино кажутся весьма интересными для объяснения ряда аномальных результатов, полученных в [12, 13, 14, 15, 16, 17], а также результатов, в которых зарегистрирован аномальный дефицит нейтрино в серии радиохимических экспериментов с искусственными источниками нейтрино SAGE [18, 19], GALLEX [20, 13], BEST [21, 22] и реакторного антинейтринного эксперимента NEUTRINO4 [23, 24]. Результаты последних экспериментов, по-видимому, не могут быть описаны лишь в рамках нейтринных осцилляций с участием активных нейтрино. Результаты экспериментов SAGE и GALLEX получили широкую известность как галлиевая аномалия.

Следовательно, все нейтринные аномалии должны быть тщательно исследованы [2, 25, 26, 27, 28, 29]. К примеру, любая неучтенная систематика ограничивает применение нейтрино как инструмента для изучения внутреннего строения Земли и Солнца [30, 31]. С другой стороны, возможное присутствие в природе стерильных нейтрино будет первым примером новой физики. Кроме того, ожидается, что стерильные нейтрино с параметрами смешивания, необходимыми для объяснения аномалий [25], могут рождаться в ранней Вселенной и находиться в равновесии с первичной плазмой до эпохи первичного нуклеосинтеза. Это изменило бы стандартные предсказания изначального содержания легких химических элементов, а также последующую позднейшую историю нашей Вселенной, включая рекомбинацию и формирование крупномасштабных космических структур. Однако, в современной согласованной космологической модели  $\Lambda$ CDM такие легкие стерильные нейтрино запрещены [32]. Заметим, что ситуация была совершенно противоположной около десяти лет назад, когда анализы первичного нуклеосинтеза [33] и анизотропии космического микроволнового фона [34] свидетельствовали в пользу гипотезы о стерильных нейтрино. Однако в более сложных моделях со стерильными нейтрино последние могут быть безопасны для космологии [35, 36, 37]. Более того, в настоящее время у нас есть несколько противоречий в последовательном описании космологических данных, наиболее серьезными из кото-

рых являются так называемый хаббловский кризис и расхождение в величине  $\sigma_8$  между анализом данных наблюдений космического микроволнового фона и наблюдениями скоплений галактик. Пока что у нас нет естественных простых решений, но некоторые предложения в литературе [38, 39] включают стерильные нейтрино в качестве одного из необходимых ингредиентов.

Стерильные нейтрино, составляющие всю темную материю, не подходят в качестве компонентов, находящихся в тепловом равновесии с первичной плазмой в ранней Вселенной, так как их скорости слишком велики, что будет препятствовать формированию структур. Однако они могут быть рождены нетепловым путем активными нейтрино, осциллирующими в первичной плазме, что имеет место в случае небольшого смешивания. Стоит отметить, что простейший случай, когда смешивание находится во взаимно однозначном соответствии с реликтовым производством стерильных нейтрино темной материи [40], уже исключен [41]. Тем не менее, для эффективного образования стерильных нейтрино в ранней Вселенной в космологических моделях с лептонной асимметрией в первичной плазме по-прежнему достаточно гораздо меньшего смешивания (ниже верхних рентгеновских пределов) [42] или расширения физической модели [43, 44, 45] для скаляров, связанных со стерильными нейтрино. Эти расширения физической модели поддерживались особенностью в рентгеновских спектрах на энергии около 3.5 кэВ, которая, как утверждается, наблюдалась в спектрах нескольких астрофизических объектов с преобладанием темной материи [46, 47] и [48, 49, 50]. Таким образом, поиски монохроматической линии в космическом рентгеновском излучении, предположительно инициированные распадами стерильных нейтрино, остаются полезными и многообещающими в отношении раскрытия природы темной материи или установлении еще более серьезных ограничений на параметры распадающихся стерильных нейтрино.

Обычно обнаружение сигнала от следов распада осуществляется при наблюдении рентгеновского фона поля пустого неба или при наблюдении галактик и скоплений галактик в заданном направлении. Затем вычисляется ожидаемый сигнал от темной материи в заданном направлении для заданного профиля распределения плотности темной материи и исследуется отношение сигнал/шум, чтобы полу-

чить ограничения на параметры стерильных нейтрино. Последние результаты сильно ограничивают пространство параметров распадающихся стерильных нейтрино [51, 52, 53]. Альтернативно, возможно ограничение пространства параметров распадающейся (аннигилирующей) темной материи из корреляционного анализа различных сигнатур [54, 55], [56, 57], [58, 59, 60, 61, 62]. Действительно, поскольку частицы темной материи концентрируются внутри галактик и скоплений галактик, каждый фотон от распада темной материи должен указывать на конкретный объект, где произошел распад. Если фотоны не отклонялись, то они указывают на часть этого объекта на небе, в том числе и на пространственное распределение этого объекта из-за красного смещения. Даже если объект не может быть распознан наблюдателем (неразрешенные источники), связь между фотоном и его источником существует и может быть прослежена статистически, путем совместного анализа распределения всех зарегистрированных фотонов по направлению прихода, энергии и карты распределения космических структур. Однако стоит отметить, что галактики и скопления галактик являются источниками рентгеновского излучения астрофизического происхождения, не связанного с распадающейся темной материей. Поэтому, корреляция между наблюдаемыми фотонами и космическими структурами должна существовать в любом случае, даже без какого-либо вклада распадающейся темной материи.

Отметим что, стерильные нейтрино в кэвном диапазоне масс могут проявлять свойства как холодной (CDM), так и теплой темной материи (WDM) [63, 64], что потенциально позволяет обойти некоторые проблемы, присущие моделям только с холодной темной материей (CDM) [40, 42, 43, 65, 44, 3, 45]. Таким образом, стерильные нейтрино кажутся весьма перспективными кандидатами на роль частиц темной материи.

### **Цели и задачи работы**

Целью настоящей работы является изучение чувствительности нейтринных экспериментов и астрофизических наблюдений к параметрам моделей стерильных нейтрино как возможных кандидатов на роль частиц темной материи, а также поиск ограничений на параметры стерильных нейтрино.

Для достижения поставленных целей были выделены следующие задачи:

1. Вычисление уточненных сечений захвата нейтрино на галлии для искусственных источников  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{37}\text{Ar}$  и  $^{65}\text{Zn}$  на основе данных измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки  $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$  и на основе значения пороговой энергии перехода галлия в основное состояния германия, равного  $Q = 233.5 \pm 1.2$  кэВ;
2. Проведение совместного анализа данных галлиевых экспериментов с искусственными источниками нейтрино и реакторных антинейтринных экспериментов, переоценка галлиевой аномалии и определение областей разрешенных параметров осцилляций в модели с одним стерильным нейтрино массой несколько эВ;
3. Оценка чувствительности телескопов миссии Спектр – Рентген – Гамма (СРГ) к обнаружению следов распада темной материи, состоящей из стерильных нейтрино с массами несколько кэВ, в рамках обзора нашей Галактики;
4. Оценка чувствительности телескопов миссии СРГ к обнаружению следов распада темной материи, состоящей из стерильных нейтрино с массами несколько кэВ в рамках корреляционного анализа космических структур и пространственного распределения галактик по данным каталога 2MRS.

### **Методы исследования**

Для достижения поставленных целей были использованы как численные, так и аналитические методы, успешно применяемые для самых разных задач теоретической физики, астрофизики и космологии. В ходе работы преимущественно использовалось программное обеспечение и библиотеки с открытым исходным кодом, а также собственные программы и методы, разработанные автором.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные результаты имеют важное значение в рамках теоретической физики и космологии, так как исследование новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели физики элементарных частиц, является необходимым для понимания и объяснения явлений и

процессов, которые пока что не могут быть объяснены в рамках существующих положений. В частности, изучение галлиевой аномалии представляет важность в контексте того, насколько хорошо мы представляем себе эффекты ядерной физики и физику нейтрино. Отметим, что радиохимические эксперименты уникальны своей возможностью поиска очень коротких нейтринных осцилляций в метровом масштабе и простотой используемой физики. Они могут предоставить уникальную информацию в поисках стерильных нейтрино. Исследование стерильных нейтрино в рамках астрофизики и космологии ценно для понимания процессов, происходивших в ранней Вселенной, формирования структур и галактик, а так же для понимания эволюции Вселенной в целом.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Вычислены сечения захвата нейтрино на галлии для искусственных источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$  на основе измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки  $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$  и на основе значения пороговой энергии перехода галлия в основное состояния германия, равного  $Q = 233.5 \pm 1.2$  кэВ. Это позволило уточнить сечение захвата нейтрино на галлии с результирующей ошибкой, не превышающей 2%, а также уточнить вклад возбужденных уровней в полное сечение захвата. На основе этих данных была пересмотрена галлиевая аномалия.
2. Вычислено сечение захвата нейтрино на галлии для искусственного источника  $^{65}\text{Zn}$ , на основе измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки  $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$  и на основе значения пороговой энергии перехода галлия в основное состояния германия, равного  $Q = 233.5 \pm 1.2$  кэВ, с точностью 2.3% и определен вклад возбужденных уровней в полное сечение захвата. На основе этих данных продемонстрирован потенциал цинкового источника для проверки галлиевой аномалии.
3. Показано, что результаты эксперимента BEST согласуются с результатами экспериментов SAGE и GALLEX, и реакторного антинейтринного эксперимента NEUTRINO4, однако результаты других реакторных антинейтринных экспериментов имеют расхождение с результатами последних. Показано, что объяснение

результата эксперимента BEST в рамках гипотезы о наличии одного легкого стерильного нейтрино, в ходе совместного анализа данных других осцилляционных экспериментов, указывает на область больших масс и углов смешивания стерильных нейтрино.

4. Была выполнена оценка чувствительности телескопов миссии CPG к монохроматическому сигналу от распадающихся стерильных нейтрино в области масс 6 – 30 кэВ. Были представлены ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино в данном диапазоне масс в рамках стратегии наблюдений Млечного пути с угловым радиусом  $60^\circ$  в направлении на центр галактики.
5. Был проведен корреляционный анализ космических структур (гало темной материи) и пространственного распределения галактик по данным каталога 2MRS с учетом обновленных данных о рентгеновском фоне для телескопов миссии CPG. Представлены ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино для телескопа eROSITA и показано, что предсказываемые ограничения в целом согласуются с тем, что было исследовано ранее другими группами. Такой же анализ впервые был выполнен для телескопа ART – XC. Были представлены ожидаемые ограничения в пространстве параметров стерильных нейтрино. Показано, что ожидаемые ограничения из анализа структур оказываются слабее, чем ожидаемые ограничения из локальных астрофизических наблюдений.

### Научная новизна

1. Вычислены уточненные сечения захвата нейтрино на галлии для искусственных источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$  по обновленным данным измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки  $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$  для пороговой энергии перехода галлия в основное состояние германия, равной  $Q = 233.5 \pm 1.2$  кэВ. На основе этих данных была пересмотрена галлиевая аномалия.
2. Впервые вычислено сечение захвата нейтрино на галлии для искусственного источника  $^{65}\text{Zn}$  по данным измерений матричных элементов переходов в реакции перезарядки  $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$  для

пороговой энергии перехода галлия в основное состояние германия, равной  $Q = 233.5 \pm 1.2$  кэВ, а также определен вклад возбужденных состояний в полное сечение захвата. На основе этих данных впервые показан потенциал источника  $^{65}\text{Zn}$  для дальнейшей проверки галлиевой аномалии.

3. Впервые представлен объединенный анализ галлиевых экспериментов, включая результат эксперимента BEST с искусственными источниками нейтрино, и реакторных антинейтринных экспериментов. Показано, что область масс и углов смешивания стерильных нейтрино, совместная с данными результатами, смещается к большим значениям по углу и массе.
4. Впервые представлены ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино с массами несколько кэВ, которые могут быть получены в рамках четырехлетнего обзора неба в широкоугольной области с угловым радиусом  $60^\circ$  вокруг центра нашей Галактики в рамках миссии CPG.
5. Впервые представлены ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино с массами несколько кэВ, которые могут быть получены телескопом ART – XC в рамках анализа структур и пространственного распределения галактик по данным каталога 2MRS в рамках четырехлетнего обзора неба.

### **Личный вклад автора**

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Все результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях, а также изложены на семинарах и международных конференциях:

1. Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2022 (HEA-2022). ИКИ РАН, Москва. 19 – 22 декабря, 2022 г.
2. Международная школа субъядерной физики. 58 курс: гравитация и материя в субъядерном мире. Фонд «Этторе Майорана» и Центр научной культуры, Эриче, Италия. 15 – 24 июня 2022 г.

3. Совместный астрофизический семинар Отдела теоретической астрофизики и лаборатории астрофизики высоких энергий. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт – Петербург. 26 октября, 2021 г.
4. Международная сессия – конференция секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий посвященная 50 – летию Баксанской нейтринной обсерватории. КБГУ, Нальчик. 6 – 8 июня, 2017 г.
5. Международная сессия – конференция секции ядерной физики ОФН РАН. ОИЯИ, Дубна. 12 – 15 апреля, 2016 г.
6. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2016». МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва. 11 – 15 апреля 2016 г.

### **Основные публикации по теме диссертации**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, входящих в WoS/Scopus.

1. Vladislav Barinov. Correlation analysis of decaying sterile neutrino dark matter in the context of the SRG mission // JCAP. – 02(2023)055 – Published 27 February 2023.
2. Vladislav Barinov and Dmitry Gorbunov. BEST impact on sterile neutrino hypothesis // Phys. Rev. D. – 105, L051703 – Published 14 March 2022.
3. V. V. Barinov, R. A. Burenin, D. S. Gorbunov and R. A. Krivonos. Towards testing sterile neutrino dark matter with the Spectrum – Roentgen – Gamma mission // Phys. Rev. D. – 103, 063512 – Published 15 March 2021.
4. Vladislav Barinov, Vladimir Gavrin, Valery Gorbachev, Dmitry Gorbunov, and Tatiana Ibragimova. BEST potential in testing the eV-scale sterile neutrino explanation of reactor antineutrino anomalies // Phys. Rev. D. – 99, 111702(R) – Published 28 June 2019.
5. Vladislav Barinov, Bruce Cleveland, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, and Tatiana Ibragimova. Revised neutrino-gallium cross section and

prospects of BEST in resolving the gallium anomaly // Phys. Rev. D. – 97, 073001 – Published 3 April 2018.

### **Прочие публикации**

1. E.I. Zakharov et al. All-sky limits on Sterile Neutrino Galactic Dark Matter obtained with SRG/ART-XC after two years of operations // e-Print: 2303.12673 [astro-ph.HE]. – 22 March, 2023.
2. V. V. Barinov et al. Search for electron-neutrino transitions to sterile states in the BEST experiment // Phys. Rev. C. – 105, 065502 – Published 9 June 2022.
3. V. V. Barinov et al. Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST) // Phys. Rev. Lett. – 128, 232501 – Published 9 June 2022.
4. S. A. Kulagin and V. V. Barinov. Hybrid model of proton structure functions // Phys. Rev. C. – 105, 045204 – Published 25 April 2022.
5. Vladislav Barinov, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, and Tatiana Ibragimova. BEST sensitivity to  $O(1)$  eV sterile neutrino // Phys. Rev. D. – 93, 073002 – Published 8 April 2016.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 107 страниц с 20 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 169 наименований.

# Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и дан краткий обзор современного состояния исследований по поиску стерильных нейтрино, а также выражены благодарности автора.

**Первая глава** посвящена анализу сечения поглощения нейтрино на галлии на основе результатов, полученных в [66, 67, 68]. В данной главе мы вычисляем уточненные сечения поглощения нейтрино от источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$ , а также впервые вычисляем сечение поглощения нейтрино для источника  $^{65}\text{Zn}$ , который потенциально может быть использован в будущих сериях измерений эксперимента BEST. Затем мы проводим пересмотр галлиевой аномалии и анализируем области возможных параметров осцилляций в различных сценариях с экспериментом BEST, проводя комбинированный анализ данных.

В **разделе 1.1** представлено описание эксперимента BEST, экспериментальных процедур и результатов эксперимента.

В **разделе 1.2** представлен формализм для вычисления сечений захвата нейтрино на галлии для разрешенных переходов и вкладов от возбужденных состояний.

В **разделе 1.3** приводятся вычисленные сечения поглощения нейтрино на галлии для искусственных источников  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , а также неопределенности сечений захвата. В Таблице 1 представлены сечения захвата нейтрино на галлии для каждой линии в спектре искусственных источников нейтрино.

Суммарные сечения поглощения нейтрино на галлии составляют

$$\sigma(^{51}\text{Cr}) = (59.10 \pm 1.14) \times 10^{-46} \text{cm}^2, \quad (1)$$

$$\sigma(^{37}\text{Ar}) = (71.38 \pm 1.46) \times 10^{-46} \text{cm}^2, \quad (2)$$

$$\sigma(^{65}\text{Zn}) = (87.76 \pm 2.03) \times 10^{-46} \text{cm}^2. \quad (3)$$

В **разделе 1.4** мы пересматриваем отношение измеренных событий к ожидаемым для всех четырех калибровочных измерений с искусственными источниками нейтрино в серии экспериментов SAGE и GALLEX с учетом полученных нами уточненных сечений поглощения нейтрино на галлии. Далее мы показываем потенциал цинкового

Таблица 1: Энергетические спектры нейтрино: энергии  $E_\nu$ , доли нейтрино  $f_{E_\nu}$  и соответствующие сечения захвата нейтрино на галлии для рассматриваемого набора искусственных источников [69].

Изотоп	$E_\nu$ , МэВ	$f_{E_\nu}$ , %	$\sigma(E_\nu)$ , $10^{-46}$ см <sup>2</sup>
<sup>51</sup> Cr	0.752	8.49(1)	$63.22 \pm 1.40$
	0.747	81.63(1)	$62.58 \pm 1.39$
	0.432	0.93(1)	$27.14 \pm 0.52$
	0.427	8.95(1)	$26.72 \pm 0.51$
<sup>37</sup> Ar	0.813	9.80(1)	$71.63 \pm 1.62$
	0.811	90.20(1)	$71.35 \pm 1.61$
<sup>65</sup> Zn	1.352	48.35(11)	$181.5 \pm 4.2$

источника для проверки галлиевой аномалии, в рамках схемы эксперимента аналогичной эксперименту BEST. Мы представляем пересмотренные значения галлиевой аномалии в Таблице 2.

Таблица 2: Отношения измеренного числа событий к ожидаемому для всех серий экспериментов SAGE [18], [19] и GALLEX [13], полученные на основе уточненных данных о сечении поглощения нейтрино [69] (New) в сравнении с отношениями, для сечения поглощения нейтрино, вычисленными Джоном Бакалом (Old). AVE – означает средневзвешенное значение по всем сериям экспериментов.

		SAGE1	SAGE2	GALLEX1	GALLEX2	AVE
Old	$R$	$0.95^{+0.12}_{-0.12}$	$0.79^{+0.09}_{-0.10}$	$0.95^{+0.11}_{-0.11}$	$0.81^{+0.11}_{-0.11}$	$0.86^{+0.05}_{-0.05}$
New	$R$	$0.93^{+0.12}_{-0.12}$	$0.77^{+0.09}_{-0.08}$	$0.93^{+0.11}_{-0.11}$	$0.80^{+0.11}_{-0.11}$	$0.84^{+0.05}_{-0.05}$

В разделе 1.5 анализируется влияние результатов эксперимента BEST на гипотезу о стерильных нейтрино и проводится совместный анализ всех галлиевых экспериментов. В ходе анализа мы показываем, что результаты эксперимента BEST согласуются с результатами экспериментов SAGE и GALLEX, и реакторного антинейтринного эксперимента NEUTRINO4, однако результаты других реакторных антинейтринных экспериментов имеют расхождение с результатами последних. Показано, что объяснение результата эксперимента BEST в рамках гипотезы о наличии одного легкого стерильного нейтрино указывает на область больших масс и углов смешивания стерильных нейтрино. Результаты анализа представлены на Рисунках 1 и 2.

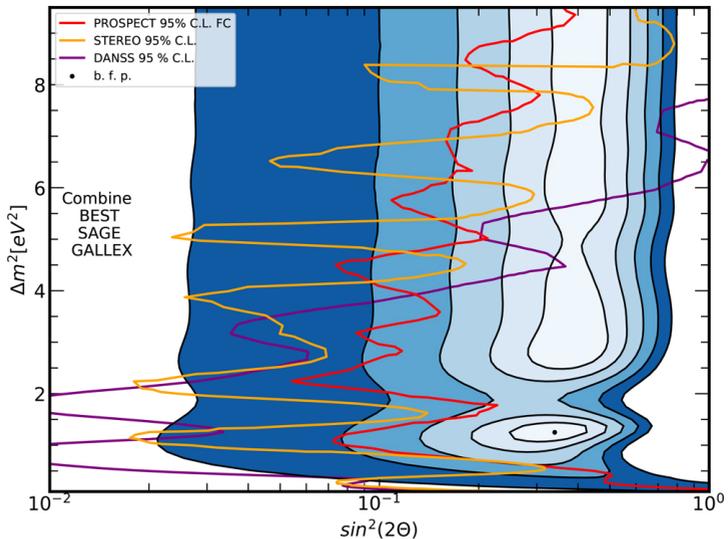


Рис. 1: Области разрешенных параметров осцилляций стерильных нейтрино (в оттенках синего) из совместного анализа всех галлиевых экспериментов [70]. Предполагая такое же смешивание с электронными антинейтрино, мы дополнительно накладываем области исключения из реакторных антинейтринных экспериментов STEREO [6], PROSPECT [7] и DANSS [71]. Области больших углов смешивания исключаются каждым из этих экспериментов на 95% уровне значимости [70].

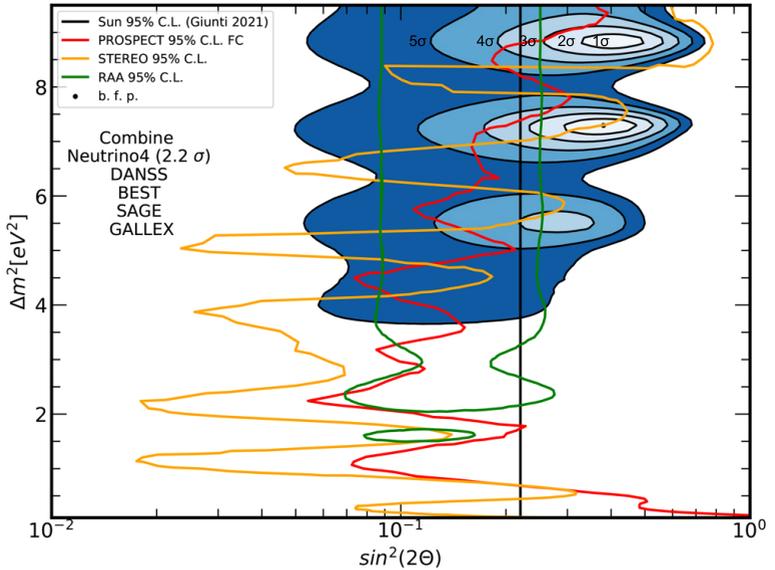


Рис. 2: Области (в оттенках синего), выделенные в результате совместного анализа галлиевых экспериментов, DANSS [71] и NEUTRINO4 [24]. Также на данном рисунке приведены области исключения на 95% уровне значимости по данным реакторных антинейтринных экспериментов STEREO [6] и PROSPECT [7]. Области, обведенные зеленой линией, построены для реакторной антинейтринной аномалии (RAA) [2] на 95% уровне значимости. Область справа от черной вертикальной линии исключена на 95% по наблюдениям солнечных нейтрино [72].

**Вторая глава** посвящена оценке чувствительности телескопов миссии СРГ и оценке ожидаемых ограничений на параметры распадающихся стерильных нейтрино, при рассмотрении Млечного пути в направлении на галактический центр как возможного источника монохроматических фотонов.

В **разделе 2.1** представлено описание космической обсерватории Спектр – Рентген – Гамма и приведена стратегия наблюдений при поисках сигнала от распадающейся темной материи в рамках миссии СРГ.

В **разделе 2.2** дается оценка сигнального потока от распадов стерильных нейтрино. В данном разделе мы вычисляем сигнальный поток в направлении на центр Млечного пути в конусе с углом раствора  $60^\circ$ . Так же мы обсуждаем вариации сигнального потока, обусловленные неопределенностями в профилях распределения темной материи в нашей Галактике.

В **разделе 2.3** представлена оценка чувствительности телескопов миссии СРГ к обнаружению сигнала от распадающихся стерильных нейтрино и ожидаемые ограничения на параметры темной материи. Для оценки ограничений на параметры распадающихся стерильных нейтрино мы применяем стратегию наблюдений, заключающуюся в обзоре очень широкой области вокруг центра Млечного пути.

Как для телескопа eROSITA так и для телескопа ART-XC мы оцениваем сигнальный поток в направлении на центр Млечного пути с углом раствора конуса  $60^\circ$ . Затем, используя информацию о фоне на обоих телескопах, мы ограничиваем пространство параметров стерильных нейтрино для данного времени наблюдения. Вычисленные сигнальные потоки мы используем для оценки ограничений, которые могут быть получены за время наблюдения  $T$ . А именно, наблюдение за период времени  $T$  позволяет установить ограничение на поток фотонов  $F_\gamma$  и следовательно на угол смешивания  $\theta$ , если ожидаемый сигнал за данное время не превышает требуемый уровень значимости. Наконец мы приводим ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино, которые могут быть получены в рамках миссии СРГ. Ожидаемые ограничения представлены на Рисунке 3.

В **разделе 2.4** мы обсуждаем полученные результаты и перспективы дальнейших исследований в рамках миссии СРГ к тестированию моделей с распадающимися стерильными нейтрино.

**Третья глава** посвящена оценке чувствительности телескопов миссии СРГ и получению ожидаемых ограничений на параметры распадающихся стерильных нейтрино в рамках кросс – корреляционного анализа структур и пространственного распределения галактик по данным каталога 2MRS. В данной главе мы используем подход, основанный на изучении авто и кросс – корреляционного углового спектра мощности темной материи и галактик.

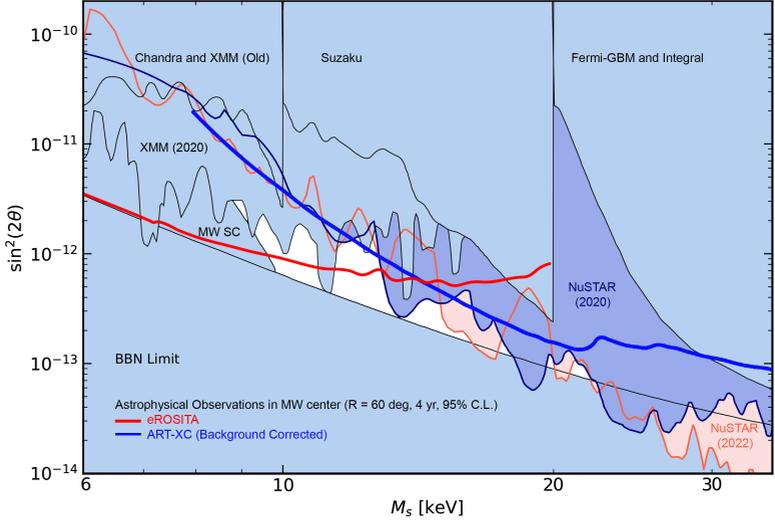


Рис. 3: Текущие и, представленные нами, ожидаемые ограничения в пространстве параметров стерильных нейтрино в направлении на центр Галактики с углом раствора конуса  $60^\circ$ , которые могут быть получены в ходе четырехлетнего обзора всего неба по данным eROSITA (красная сплошная линия) и ART-XC (синяя сплошная линия). Background Corrected означает, что фон был нормирован с учетом дополнительных особенностей для телескопа ART-XC [73] по сравнению с предварительными оценками [74].

В разделе 3.1 приводится формализм, использующийся при вычислении корреляционных функций и спектров мощности различных сигнатур.

В разделе 3.2 приводится описание приближения больших мультиполей (Лимберовское приближение) и расширенного Лимберовского приближения, используемого для вычисления спектров мощности на больших угловых масштабах (малые мультиполи).

В разделе 3.3 представлено вычисление авто и кросс – корреляционных спектров мощности для различных пар сигнатур. В рамках корреляционного анализа для каждой пары сигнатур (темная материя - темная материя, галактики - галактики, темная материя - га-

лактики) рассчитывается нелинейный спектр мощности, а затем для всех пар сигнатур строится кросс-корреляционная функция и вычисляется угловой корреляционный спектр мощности. Следуя анализу, представленному в [56, 57], мы вычисляем угловые корреляционные спектры темной материи вследствие распада стерильных нейтрино на активные нейтрино и фотоны, корреляционные спектры для каталога галактик и кросс-корреляционные спектры темной материи и каталога галактик. Мы используем каталог 2MRS [75] в качестве базового каталога, который охватывает большую часть неба и который также использовался в работе [61].

В **разделе 3.4** дано описание процедуры вычислений и оценки ожидаемых ограничений в пространстве параметров стерильных нейтрино. Мы выполняем расчеты как для телескопа eROSITA, так и для телескопа ART-XC с использованием оценок рентгеновского фона с этих телескопов [76, 77, 73, 74]. Мы не ограничиваемся стандартным подходом в рамках Лимберовского приближения [78], а также проводим корреляционный анализ с использованием расширенного Лимберовского приближения [79] и затем сравниваем результаты, полученные в рамках обоих подходов. Мы показываем, что полученные нами ограничения находятся в хорошем согласии с результатами предыдущих работ для телескопа eROSITA [56, 57]. Также мы впервые получаем ограничения на параметры стерильных нейтрино, которые могут быть получены для телескопа ART-XC. Дополнительно мы иллюстрируем диапазон мультиполей, преимущественно на которых набираются ограничения. Мы проводим комбинированный анализ ограничений в рамках корреляционного анализа и показываем, что ограничения, которые могут быть получены с помощью этого подхода, оказываются более консервативными, чем те, которые могут быть получены из прямых астрофизических наблюдений. Полученные нами ожидаемые ограничения представлены на Рисунках 4 и 5.

В **разделе 3.5** обсуждаются полученные результаты.

В **Заключении** диссертации перечислены основные результаты работы.

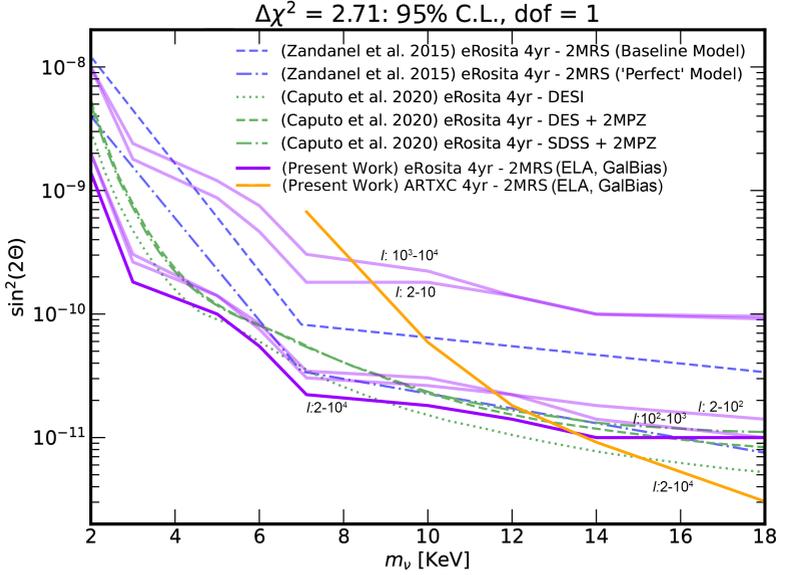


Рис. 4: Ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино, полученные в рамках нашего анализа для различных диапазонов мультиполей. Фиолетовая линия соответствует ограничениям для телескопа eROSITA (полупрозрачные фиолетовые линии показывают вклады в ограничения для разных диапазонов мультиполей). Желтая линия соответствует телескопу ART-XC. Для сравнения представлены ограничения из работ [56, 57]. Время наблюдений 4 года в режиме полного обзора неба [80].

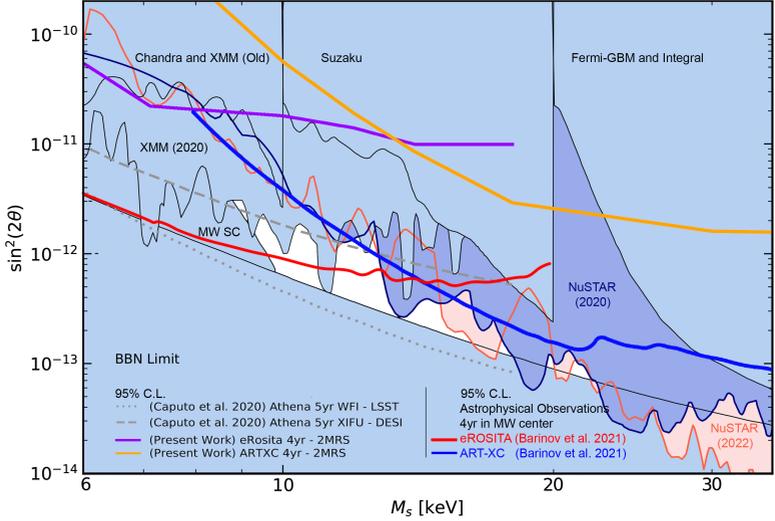


Рис. 5: Ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино, полученные в нашем анализе (такие же, как на Рисунке 4) по сравнению с ограничениями, которые могут быть получены в рамках астрофизических наблюдений центра Млечного Пути в конусе с углом раствора 60 градусов [74] (красная линия соответствует ограничениям для телескопа eROSITA, синяя линия соответствует телескопу ART-XC). Кроме того, мы дополнительно иллюстрируем ограничения, которые можно получить при реализации проекта Athena [57].

## Список литературы

- [1] Pontecorvo, Bruno. Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge // Sov. Phys. JETP. — 1968. — Vol. 26, no. 984-988. — P. 165.
- [2] Abazajian K. N. et al. Light Sterile Neutrinos: A White Paper. — 2012. — 4. — 1204.5379.
- [3] Drewes M. et al. A White Paper on keV Sterile Neutrino Dark Matter // JCAP. — 2017. — Vol. 01. — P. 025. — 1602.04816.
- [4] Acero M. A. et al. White Paper on Light Sterile Neutrino Searches and Related Phenomenology. — 2022. — 3. — 2203.07323.
- [5] Skrobova, Nataliya and others. New results from the DANSS experiment // International Journal of Modern Physics A. — 2020. — Vol. 35, no. 34n35. — P. 2044015. — <https://doi.org/10.1142/S0217751X20440157>.
- [6] Almazán, H. and others. Improved sterile neutrino constraints from the STEREO experiment with 179 days of reactor-on data // Phys. Rev. D. — 2020. — Sep. — Vol. 102. — P. 052002. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.102.052002>.
- [7] Andriamirado, M. and others. Improved short-baseline neutrino oscillation search and energy spectrum measurement with the PROSPECT experiment at HFIR // Phys. Rev. D. — 2021. — Feb. — Vol. 103. — P. 032001. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.103.032001>.
- [8] C. A. Argüelles and others. MicroBooNE and the  $\nu_e$  Interpretation of the MiniBooNE Low-Energy Excess. — 2021. — 2111.10359.
- [9] Abratenko, P and others. Search for an Excess of Electron Neutrino Interactions in MicroBooNE Using Multiple Final State Topologies // arXiv preprint arXiv:2110.14054. — 2021.

- [10] Peter B. Denton. Sterile Neutrino Searches with MicroBooNE: Electron Neutrino Disappearance. — 2021. — 2111.05793.
- [11] Esteban, Ivan and Gonzalez-Garcia, M. C. and Maltoni, Michele and Schwetz, Thomas and Zhou, Albert. The fate of hints: updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations // JHEP. — 2020. — Vol. 09. — P. 178. — 2007.14792.
- [12] Athanassopoulos, C. and others. Evidence for  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  Oscillations from the LSND Experiment at the Los Alamos Meson Physics Facility // Phys. Rev. Lett. — 1996. — Oct. — Vol. 77. — P. 3082–3085. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.77.3082>.
- [13] Kaether, F. and Hampel, W. and Heusser, G. and Kiko, J. and Kirsten, T. Reanalysis of the GALLEX solar neutrino flux and source experiments // Phys. Lett. B. — 2010. — Vol. 685. — P. 47–54. — 1001.2731.
- [14] Mueller, Th. A. and others. Improved predictions of reactor antineutrino spectra // Phys. Rev. C. — 2011. — May. — Vol. 83. — P. 054615. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.83.054615>.
- [15] Huber P. On the determination of anti-neutrino spectra from nuclear reactors // Phys. Rev. — 2011. — Vol. C84. — P. 024617. — [Erratum: Phys. Rev.C85,029901(2012)]. 1106.0687.
- [16] Aguilar-Arevalo, A. A. and others. Significant Excess of ElectronLike Events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment // Phys. Rev. Lett. — 2018. — Vol. 121, no. 22. — P. 221801. — 1805.12028.
- [17] Aartsen, M. G. and others. eV-Scale Sterile Neutrino Search Using Eight Years of Atmospheric Muon Neutrino Data from the IceCube Neutrino Observatory // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 125, no. 14. — P. 141801. — 2005.12942.
- [18] Abdurashitov, J. N. and others. Measurement of the response of the Russian-American gallium experiment to neutrinos from a Cr-51

- source // Phys. Rev. C. — 1999. — Vol. 59. — P. 2246–2263. — hep-ph/9803418.
- [19] Abdurashitov et al J. N. Measurement of the response of a Ga solar neutrino experiment to neutrinos from a  $^{37}\text{Ar}$  source // Phys. Rev. C. — 2006. — Apr. — Vol. 73. — P. 045805. — Access mode: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.73.045805>.
- [20] Hampel W. et al. Final results of the  $^{51}\text{Cr}$  neutrino source experiments in GALLEX // Physics Letters B. — 1998. — Vol. 420, no. 1. — P. 114–126. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269397015621>.
- [21] Barinov V. V. et al. Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST) // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 128, no. 23. — P. 232501. — 2109.11482.
- [22] Barinov, V. V. and others. Search for electron-neutrino transitions to sterile states in the BEST experiment // Phys. Rev. C. — 2022. — Vol. 105, no. 6. — P. 065502. — 2201.07364.
- [23] Serebrov, A. P. and others. First Observation of the Oscillation Effect in the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino // Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 2019. — Vol. 109, no. 4. — P. 209–218. — 1809.10561.
- [24] Serebrov A. P. et al. Search for sterile neutrinos with the Neutrino-4 experiment and measurement results // Phys. Rev. D. — 2021. — Vol. 104, no. 3. — P. 032003. — 2005.05301.
- [25] Böser, Sebastian and others. Status of light sterile neutrino searches // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2020. — Mar. — Vol. 111. — P. 103736. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnpnp.2019.103736>.
- [26] Giunti, C. and Li, Y. F. and Ternes, C. A. and Tyagi, O. and Xin, Z. Gallium Anomaly: critical view from the global picture of  $\nu_e$  and  $\bar{\nu}_e$  disappearance // JHEP. — 2022. — Vol. 10. — P. 164. — 2209.00916.

- [27] Giunti, C. and Li, Y. F. and Ternes, C. A. and Xin, Z. Inspection of the detection cross section dependence of the Gallium Anomaly. — 2022. — 12. — 2212.09722.
- [28] Haxton, W. C. and Rule, E. J. and Elliott, S. R. and Gavrin, V. N. and Ibragimova, T. V. The Gallium Neutrino Absorption Cross Section and its Uncertainty. — 2023. — 3. — 2303.13623.
- [29] Brdar, Vedran and Gehrlein, Julia and Kopp, Joachim. Towards Resolving the Gallium Anomaly. — 2023. — 3. — 2303.05528.
- [30] Sramek, Ondrej and McDonough, William F. and Kite, Edwin S. and Lekic, Vedran and Dye, Steve and Zhong, Shijie. Geophysical and geochemical constraints on geoneutrino fluxes from Earth’s mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 2013. — Vol. 361. — P. 356–366. — 1207.0853.
- [31] Adelberger E. G. et al. Solar fusion cross sections II: the pp chain and CNO cycles // *Rev. Mod. Phys.* — 2011. — Vol. 83. — P. 195. — 1004.2318.
- [32] Aghanim N. et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 641. — P. A6. — [Erratum: *Astron.Astrophys.* 652, C4 (2021)]. 1807.06209.
- [33] Izotov Y. I., Thuan T. X. THE PRIMORDIAL ABUNDANCE OF  $^4\text{He}$ : EVIDENCE FOR NON-STANDARD BIG BANG NUCLEOSYNTHESIS // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — Jan. — Vol. 710, no. 1. — P. L67–L71. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/710/1/L67>.
- [34] Komatsu E. et al. Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation // *Astrophys. J. Suppl.* — 2011. — Vol. 192. — P. 18. — 1001.4538.
- [35] Hannestad S., Hansen R. S., Tram T. How Self-Interactions can Reconcile Sterile Neutrinos with Cosmology // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — Vol. 112, no. 3. — P. 031802. — 1310.5926.

- [36] Dasgupta B., Kopp J. Cosmologically Safe eV-Scale Sterile Neutrinos and Improved Dark Matter Structure // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — Vol. 112, no. 3. — P. 031803. — 1310.6337.
- [37] Chu X., Dasgupta B., Kopp J. Sterile neutrinos with secret interactions—lasting friendship with cosmology // *JCAP.* — 2015. — Vol. 10. — P. 011. — 1505.02795.
- [38] Zhao, Ming-Ming and He, Dong-Ze and Zhang, Jing-Fei and Zhang, Xin. Search for sterile neutrinos in holographic dark energy cosmology: Reconciling Planck observation with the local measurement of the Hubble constant // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 96, no. 4. — P. 043520. — 1703.08456.
- [39] Archidiacono, Maria and Gariazzo, Stefano and Giunti, Carlo and Hannestad, Steen and Tram, Thomas. Sterile neutrino self-interactions:  $H_0$  tension and short-baseline anomalies // *JCAP.* — 2020. — Vol. 12. — P. 029. — 2006.12885.
- [40] Dodelson S., Widrow L. M. Sterile-neutrinos as dark matter // *Phys. Rev. Lett.* — 1994. — Vol. 72. — P. 17–20. — hep-ph/9303287.
- [41] Boyarsky, A. and Drewes, M. and Lasserre, T. and Mertens, S. and Ruchayskiy, O. Sterile neutrino Dark Matter // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2019. — Vol. 104. — P. 1–45. — 1807.07938.
- [42] Shi X.-D., Fuller G. M. A New dark matter candidate: Nonthermal sterile neutrinos // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Vol. 82. — P. 2832–2835. — astro-ph/9810076.
- [43] Shaposhnikov M., Tkachev I. The nuMSM, inflation, and dark matter // *Phys. Lett. B.* — 2006. — Vol. 639. — P. 414–417. — hep-ph/0604236.
- [44] Bezrukov F., Gorbunov D. Relic Gravity Waves and 7 keV Dark Matter from a GeV scale inflaton // *Phys. Lett. B.* — 2014. — Vol. 736. — P. 494–498. — 1403.4638.
- [45] Bezrukov F., Chudaykin A., Gorbunov D. Induced resonance makes light sterile neutrino Dark Matter cool // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Vol. 99, no. 8. — P. 083507. — 1809.09123.

- [46] Bulbul, Esra and others. Detection of An Unidentified Emission Line in the Stacked X-ray spectrum of Galaxy Clusters // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 789. — P. 13. — 1402.2301.
- [47] Boyarsky, Alexey and Ruchayskiy, Oleg and Iakubovskiy, Dmytro and Franse, Jeroen. Unidentified Line in X-Ray Spectra of the Andromeda Galaxy and Perseus Galaxy Cluster // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — Vol. 113. — P. 251301. — 1402.4119.
- [48] Anderson M. E., Churazov E., Bregman J. N. Non-detection of X-ray emission from sterile neutrinos in stacked galaxy spectra // *MNRAS.* — 2015. — Окт. — Vol. 452, no. 4. — P. 3905–3923. — 1408.4115.
- [49] Aharonian F. A. et al. *Hitomi* constraints on the 3.5 keV line in the Perseus galaxy cluster // *Astrophys. J. Lett.* — 2017. — Vol. 837, no. 1. — P. L15. — 1607.07420.
- [50] Dessert C., Rodd N. L., Safdi B. R. The dark matter interpretation of the 3.5-keV line is inconsistent with blank-sky observations // *Science.* — 2020. — Mar. — Vol. 367, no. 6485. — P. 1465–1467.
- [51] Perez, Kerstin and others. Almost closing the  $\nu$  MSM sterile neutrino dark matter window with NuSTAR // *Phys. Rev. D.* — 2017. — June. — Vol. 95, no. 12. — P. 123002. — 1609.00667.
- [52] Ng, Kenny C. Y. and others. New constraints on sterile neutrino dark matter from NuSTAR M31 observations // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Apr. — Vol. 99, no. 8. — P. 083005. — 1901.01262.
- [53] Roach, Brandon M. and others. Long-exposure NuSTAR constraints on decaying dark matter in the Galactic halo // *Phys. Rev. D.* — 2023. — Vol. 107, no. 2. — P. 023009. — 2207.04572.
- [54] Cooray A., Sheth R. K. Halo Models of Large Scale Structure // *Phys. Rept.* — 2002. — Vol. 372. — P. 1–129. — astro-ph/0206508.
- [55] Fornengo N., Regis M. Particle dark matter searches in the anisotropic sky // *Front. Physics.* — 2014. — Vol. 2. — P. 6. — 1312.4835.

- [56] Zandanel F., Weniger C., Ando S. The role of the eROSITA all-sky survey in searches for sterile neutrino dark matter // JCAP. — 2015. — Vol. 09. — P. 060. — 1505.07829.
- [57] Caputo A., Regis M., Taoso M. Searching for Sterile Neutrino with X-ray Intensity Mapping // JCAP. — 2020. — Vol. 03. — P. 001. — 1911.09120.
- [58] Ando S., Pavlidou V. Imprint of galaxy clustering in the cosmic gamma-ray background // MNRAS. — 2009. — Dec. — Vol. 400, no. 4. — P. 2122–2127. — 0908.3890.
- [59] Ando S., Benoit-Lévy A., Komatsu E. Mapping dark matter in the gamma-ray sky with galaxy catalogs // Phys. Rev. D. — 2014. — Vol. 90, no. 2. — P. 023514. — 1312.4403.
- [60] Ando S. Power spectrum tomography of dark matter annihilation with local galaxy distribution // JCAP. — 2014. — Vol. 10. — P. 061. — 1407.8502.
- [61] Ando S., Benoit-Lévy A., Komatsu E. Angular power spectrum of galaxies in the 2MASS Redshift Survey // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2018. — Vol. 473, no. 4. — P. 4318–4325. — 1706.05422.
- [62] Cuoco, Alessandro and others. Dark Matter Searches in the Gamma-ray Extragalactic Background via Cross-correlations With Galaxy Catalogs // Astrophys. J. Suppl. — 2015. — Vol. 221, no. 2. — P. 29. — 1506.01030.
- [63] Abazajian K., Fuller G. M., Tucker W. H. Direct detection of warm dark matter in the X-ray // Astrophys. J. — 2001. — Vol. 562. — P. 593–604. — astro-ph/0106002.
- [64] Abazajian K., Fuller G. M., Patel M. Sterile neutrino hot, warm, and cold dark matter // Phys. Rev. D. — 2001. — Vol. 64. — P. 023501. — astro-ph/0101524.
- [65] Lovell, Mark R. and others. The properties of warm dark matter haloes // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 439. — P. 300–317. — 1308.1399.

- [66] Frekers et al, D. The  $^{71}\text{Ga}$  ( $^3\text{He}$ ,  $t$ ) reaction and the low-energy neutrino response // *Physics Letters B.* — 2011. — Vol. 706, no. 2 - 3. — P. 134 – 138. — Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269311013153>.
- [67] D. Frekers and others. Penning-trap Q-value determination of the  $\text{Ga}^{71}(\nu, e^-)\text{Ge}^{71}$  reaction using threshold charge breeding of on-line produced isotopes // *Physics Letters B.* — 2013. — Vol. 722, no. 4. — P. 233–237. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269313002980>.
- [68] Frekers, D. and others. Precision evaluation of the  $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)$  solar neutrino capture rate from the ( $^3\text{He}$ ,  $t$ ) charge-exchange reaction // *Phys. Rev. C.* — 2015. — Mar. — Vol. 91. — P. 034608. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.91.034608>.
- [69] Barinov, V. and others. Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the gallium anomaly // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Apr. — Vol. 97. — P. 073001. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.97.073001>.
- [70] Barinov, Vladislav and Gorbunov, Dmitry. BEST impact on sterile neutrino hypothesis // *Phys. Rev. D.* — 2022. — Vol. 105, no. 5. — P. L051703. — 2109.14654.
- [71] Danilov M. New results from the DANSS experiment // *PoS.* — 2021. — Vol. ICHEP2020. — P. 121. — 2012.10255.
- [72] Giunti, C. and Li, Y. F. and Ternes, C. A. and Zhang, Y. Y. Neutrino-4 anomaly: oscillations or fluctuations? // *Phys. Lett. B.* — 2021. — Vol. 816. — P. 136214. — 2101.06785.
- [73] Pavlinsky M. et al. The ART-XC telescope on board the SRG observatory // *Astron. Astrophys.* — 2021. — Vol. 650. — P. A42. — 2103.12479.
- [74] Barinov, V. V. and Burenin, R. A. and Gorbunov, D. S. and Krivonos, R. A. Towards testing sterile neutrino dark matter with the *Spectrum – Roentgen – Gamma* mission // *Phys. Rev. D.* — 2021. — Vol. 103, no. 6. — P. 063512. — 2007.07969.

- [75] John P. Huchra and others. THE 2MASS REDSHIFT SURVEY—DESCRIPTION AND DATA RELEASE // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2012. — mar. — Vol. 199, no. 2. — P. 26. — Access mode: <https://doi.org/10.1088/0067-0049/199/2/26>.
- [76] Predehl P. et al. The eROSITA X-ray telescope on SRG // Astron. Astrophys. — 2021. — Vol. 647. — P. A1. — 2010.03477.
- [77] Pavlinsky M. et al. SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first year // Astron. Astrophys. — 2022. — Vol. 661. — P. A38. — 2107.05879.
- [78] Limber D. N. The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field. // ApJ. — 1953. — Jan. — Vol. 117. — P. 134.
- [79] LoVerde M., Afshordi N. Extended Limber Approximation // Phys. Rev. D. — 2008. — Vol. 78. — P. 123506. — 0809.5112.
- [80] Barinov V. V. Correlation analysis of decaying sterile neutrino dark matter in the context of the SRG mission // JCAP. — 2023. — Vol. 02. — P. 055. — 2211.05919.

Научное издание

Баринов Владислав Валерьевич

Стерильные нейтрино как кандидаты  
на роль частиц темной материи

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 08.06.2023

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,3 Зак. № 22516 Тираж 70 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а