

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01**  
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от **12.10.2023**г. № **7/7**

О присуждении **Баринову Владиславу Валерьевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Стерильные нейтрино как кандидаты на роль частиц темной материи» по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика, принята к защите 22 июня 2023 г., протокол № 2/2, диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Баринов Владислав Валерьевич 1994 года рождения. В 2019 году соискатель окончил физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ). В 2023 г. соискатель В. В. Баринов окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ) по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника отдела теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук, в отделе теоретической физики.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН, **Горбунов Дмитрий Сергеевич**, 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), отделение физики плазмы, атомной физики и 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

— **дали положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация — **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (г. Москва)**, в своем **положительном заключении**, составленном Бурениным Родионом Анатольевичем (кандидат физико-математических наук, отдел астрофизики высоких энергий, старший научный сотрудник), подписанном Сазоновым Сергеем Юрьевичем (доктор физико-математических наук, отдел астрофизики высоких энергий, ведущий научный сотрудник) и утвержденном заместителем директора Лутовиновым Александром Анатольевичем (доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН)

- указала, что диссертация Баринаова В. В. удовлетворяет всем критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 5 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны при решающем участии соискателя.

Список работ, по результатам диссертационного исследования:

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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что работа является законченным исследованием и соответствует специальности 1.3.3 - Теоретическая физика, выполненным на высоком научном уровне, и полностью удовлетворяет всем

критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Отмечены следующие критические замечания и пожелания:

- В актуальности работы автор дает такое определение предмету своих исследований — стерильным нейтрино: “Они не участвуют в фундаментальных взаимодействиях кроме гравитационного.” Тем не менее, далее автор пишет: “стерильные нейтрино могут смешиваться с активными нейтрино или распадаться на активные нейтрино и фотоны”, что противоречит исходной формулировке. Если поле ни с чем не взаимодействует, то уж никак не может “смешиваться”, что тоже является формой взаимодействия. Рекомендуется ознакомиться с работой (<https://inspirehep.net/literature/1712704>), где объясняется этот вопрос.

- Говоря об актуальности исследования автор пишет “Однако, в современной согласованной космологической модели  $\Lambda$ CDM такие легкие стерильные нейтрино запрещены [33]”. Заканчивается раздел фразой “Таким образом, стерильные нейтрино кажутся весьма перспективными кандидатами на роль частиц темной материи.” К какому выводу следует прийти читателю?

- Рисунок 3 упоминается до упоминания рисунков 1, 2.

- На стр.19 приводится результат измерения периода полураспада  $^{51}\text{Cr}$ . Приведенная точность такая же, как по ссылке [73]. Стало быть, совместный анализ позволит уменьшить неопределенность измерения периода полураспада  $^{51}\text{Cr}$ . Рекомендуется это сделать.

- Использование стандартной терминологии “Эффективная длина пробега в объеме или средняя длина пробега” на стр.21 и формула (2) не обоснованы, т.к. не имеют отношения к общепринятой длине пробега, обратно пропорциональной сечению взаимодействия. Видимо, имеется в виду среднее расстояние, которое проходит нейтрино в заданном объеме. Формулы (6) и (7) предполагают точечный источник. Учитывая важность эксперимента BEST, странно, что автор использовал столь приближенный расчет. В изложенном

тексте не раскрывается, как именно учитывалась реальная геометрия мишени для учета осцилляций в расчетах.

- Формула (15) использована для построения допустимых контуров в пространстве осцилляционных параметров. В изложенном в тексте диссертации подходе есть ряд концептуальных проблем и ошибок: Ошибка заключается в том, что для определения интервала допустимых параметров стерильных нейтрино нужно использовать функцию  $\Delta\chi^2$ , а не  $\chi^2$ , где  $\Delta\chi^2$  — это разница  $\chi^2$  (нет стерильных нейтрино) -  $\chi^2$  (есть стерильные нейтрино) вычисленных для двух тестируемых гипотез. Если окажется, что не существует области параметров, для которых  $\Delta\chi^2$  больше 25 (открытие), то вместо области допустимых параметров следует указать область исключения. Результат на рис.2 представляется необоснованным. Построение доверительных интервалов методом  $\Delta\chi^2$  не годится в случае когда функция  $\Delta\chi^2$  отличается от параболы. Для быстро осциллирующих функций это заведомо так и более корректно использовать подход Фельдмана-Казинса и похожие методы. Изложение статистического анализа в диссертации выиграло бы от более подробного обсуждения и обоснования всех коррелированных и некоррелированных теоретических и экспериментальных источников неопределенностей. В тексте, видимо, не совсем точно отражено то, что делалось на самом деле, так как если векторы  $\mathbf{r}$  это абсолютные числа, а  $\epsilon$  относительные неопределенности (как написано), то такой  $\chi^2$  построен не корректно.

- Автор верно указывает на то, что найденные параметры (разница квадратов масс и угол смешивания) находятся в противоречии с результатами других, гораздо более точных экспериментов, но согласуются с результатами NEUTRINO4. Возникает закономерный вопрос — почему авторы не проделали глобальный анализ всех данных, чтобы сформулировать вывод — есть ли указание на стерильное нейтрино или нет?

- Для оценки чувствительности следует использовать  $\Delta\chi^2$  и подход Фельдмана-Казинса или похожие методы вместо  $\chi^2$ . Не указано, какую статистику событий следует накопить с цинковым источником, чтобы получить пять стандартных отклонений. Не указано, почему именно цинковый источник

представляется автору предпочтительным. Не ясно, ожидается ли разница в скорости счета во внутреннем и внешнем детекторах и, если нет, то как доказать, что нет ошибки в общей нормировке вместо утверждения о наблюдении осцилляций. При обсуждении рис.9 автор пишет, что “что пределы STEREO согласуются с аномальной областью из совместного анализа, представленного на Рисунке 9, в то время как пределы PROSPECT не благоприятствуют 2- $\sigma$  областям”. Вероятно, интерпретация этих ограничений тут следующая: STEREO не исключает 2- $\sigma$  контур BEST, а PROSPECT исключает. Совместно, STEREO+PROSPECT исключают на уровне 95%CL практически все допустимые области стерильного нейтрино эксперимента BEST.

- Перевод “охват” слова “grasp” в контексте телескопа не кажется подходящим. Больше подходит “светособирающая способность”. Автор использует нестандартную, жаргонную терминологию “балдж”, видимо от английского “bulge”. Следовало бы ее пояснять в тексте. В тексте отсутствует обсуждение учета поглощения и рассеяния фотонов от гипотетических распадов стерильного нейтрино. Разве галактика прозрачна для кэВ фотонов? Не хватает сравнительных выводов о чувствительности миссии СРГ с конкурентными проектами.

- Стр. 67. Нет объяснения понятия “линейный байес”? Не определены в тексте величины в формуле (78).

- При описании Баксанского эксперимента говорится о мерах защиты от космических лучей, от гамма и нейтронного фона горных пород, однако ни слова не говорится о нейтрино и прежде всего солнечных, преодолевающих эти защиты. Возможно влиянием космических нейтрино можно пренебречь, но как минимум упомянуть и пояснить это обстоятельство имело бы смысл.

- На рисунке 2 представлены значения наилучшего соответствия параметров стерильного нейтрино. Формально это информация безупречна, но из левого рисунка видно, что имеются два локальных минимума, возможно они есть и на правом рисунке. В такой ситуации желательно приводить не только

сами величины, но и их значимость, что бы было понятно, как сильно эти локальные минимумы отличаются друг от друга.

- В разделе 1.4 отсутствует обсуждение причин того, какие физические особенности источника  $^{65}\text{Zn}$  могут способствовать существенному сужению области оцениваемых параметров стерильного нейтрино и почему.

- В главе 2 и 3 при представлении разрешенных областей параметров стерильного нейтрино (рисунки 15, 16, 17, 20) желательно разделять прямые наблюдательные ограничения и теоретические, модельно-зависимые ограничения, поскольку последние могут сильно варьироваться при изменении параметров модели (что нередко случается). В диссертации они выделены единым цветом, как абсолютно равноправные, что далеко не так.

- Присутствует некоторая непоследовательность и сумбурность изложения материала, что затрудняет чтение и его восприятие. Так, например, первым в тексте возникает ссылка на рисунок 3 (стр. 16) и только затем на рисунок 1 (стр. 18), сам же рисунок 3 расположен на тридцатой странице. Текст изобилует огромным количеством ссылок, при этом зачастую фраза, предваряющая ссылку слишком краткая и чтобы ее понять, действительно нужно обращаться к цитируемой работе. Цитирование работ диссертанта ничем не выделено в сравнении с другими работами.

- Стоило бы подробнее обсудить возможность существования нейтрино с параметрами, полученными по результатам галлиевых экспериментов, с точки зрения космологии.

- Диапазон энергий фотонов, которые регистрируются телескопом СРГ/еРОЗИТА, более правильно следует обозначить как 0.2 - 8 кэВ. Следовало бы подробнее обсудить, почему для ограничений сигнала от распада стерильных нейтрино в нашей Галактике выбран раствор конуса размером именно 60 градусов. В оригинальной работе Баринова В. В. были оценены также ограничения на распад стерильных нейтрино от других астрофизических объектов, таких как галактика Андромеды и карликовая галактика в Драконе. Эти ограничения также стоило бы обсудить и в диссертационной работе.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией ученых и наличием работ высокого уровня по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

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.

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.

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.

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.

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 СРГ. 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 – XС. 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.

Теоретическая и практическая значимость обосновываются тем, что 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. Отметим, что радиохимические эксперименты уникальны своей возможностью поиска очень коротких нейтринных осцилляций в метровом масштабе и простотой используемой физики. Они могут предоставить важнейшую информацию по поиску стерильных нейтрино. Исследование стерильных нейтрино в рамках астрофизики и космологии важно для понимания процессов, происходивших в ранней Вселенной, формирования структур и галактик, а так же для понимания эволюции Вселенной в целом.

Личный вклад соискателя состоит в том, что он получил основные результаты диссертации и внес определяющий вклад в работы, выполненные в соавторстве.

На заседании 12.10.2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Баринову Владиславу Валерьевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 23, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель  
диссертационного совета 24.1.163.01  
доктор техн. наук, чл.-корр. РАН \_\_\_\_\_ Кравчук Л.В.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета 24.1.163.01  
доктор физ.-мат. наук, проф. РАН \_\_\_\_\_ Рубцов Г.И.

12.10.2023

М.П.