

ОТЗЫВ

официального оппонента Наумова Д.В. на диссертационную работу Баринаова Владислава Валерьевича «Стерильные нейтрино как кандидаты на роль частиц темной материи», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – «Теоретическая физика»

Диссертационная работа посвящена исследованию гипотезы существования стерильных нейтрино и возможному вкладу этой частицы в темную материю Вселенной.

Диссертация Баринаова В.В. состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 107 страниц, включая 20 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 169 наименований.

Во **Введении** обсуждается актуальность проведенного исследования. Дается краткий обзор современного состояния исследований. Формулируются цели и задачи диссертационной работы, методы исследования, теоретическая и практическая значимости, а также полученные результаты и пять положений, выносимых на защиту. Обсуждаются научная новизна (пять пунктов) и апробация работы (выступления на 6 международных и российских конференциях). Приводятся основные публикации автора по теме диссертации (пять публикаций) и прочие публикации автора (пять публикаций).

В **первой главе** обсуждаются: анализ величины и формы сечения поглощения нейтрино на ядре галлия, результаты вычисления соответствующих сечений для ядер хрома, аргона и цинка. Рассматривается галлиевая аномалия (дефицит в количестве атомов германия в калибровочных экспериментах) в контексте вычисленных сечений.

Предполагая, что галлиевая аномалия объясняется осцилляцией электронного нейтрино в стерильное нейтрино, оценивается область допустимых параметров стерильного нейтрино. Аналогичный анализ проводится для данных эксперимента BEST, также обнаружившего дефицит в количестве атомов германия во внутреннем и внешнем объемах детектора. Приводится сравнение с результатами эксперимента NEUTRINO4, заявляющего о наблюдении стерильного нейтрино, а также с результатами других экспериментов, не наблюдавших появления стерильного нейтрино.

Во **второй главе** представлены результаты оценки чувствительности астрофизической миссии СРГ (Спектр-Рентген-Гамма) к проверке гипотезы о том, что темная материя в нашей галактике состоит из стерильного нейтрино

с массой от 6 кэВ до 30 кэВ. Проверка этой гипотезы основана на наблюдении монохроматических фотонов от распада стерильного нейтрино в двухчастичное конечное состояние. Вычислена оценка потока таких фотонов и проведен статистический анализ для оценки чувствительности миссии SRG к параметрам смешивания стерильного нейтрино.

В **третьей главе** рассмотрен еще один метод тестирования гипотезы о том, что стерильное нейтрино является темной материей. Изучается авто и кросс-корреляция углового спектра мощности структур по данным каталога 2MRS. Получена оценка чувствительности телескопов миссии SRG к обнаружению стерильного нейтрино. Автор приходит к выводу, что данный метод заслуживает внимания, но является менее чувствительным, чем метод изложенный во второй главе.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, сформулированные в виде положений, выносимых на защиту.

Актуальность исследования связана с тем, что природа темной материи до сих пор не понята. Гипотетическое стерильное нейтрино с массой порядка десятка кэВ — возможный кандидат на роль частиц темной материи. Этим определяется актуальность исследований, проведенных в главах 2,3.

В последние годы ряд аномалий (реакторная аномалия, галлиевая аномалия, результаты MiniBooNE) рядом авторов интерпретировались как возможные проявления стерильного нейтрино с массой порядка эВ. Актуальность исследования, проведенной в первой главе диссертации, связана с аномалиями в физике частиц.

Достоверность

Результаты, выносимые на защиту представляются достоверными.

Новизна

1. Вычислены уточненные сечения захвата нейтрино на галлии для искусственных источников ^{51}Cr и ^{37}Ar . На основе этих данных была пересмотрена галлиевая аномалия.
2. Впервые вычислено сечение захвата нейтрино на галлии для искусственного источника ^{65}Zn . На основе этих данных впервые показан потенциал источника ^{65}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° вокруг центра нашей Галактики в рамках миссии СРГ.
5. Впервые представлены ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино с массами несколько кэВ, которые могут быть получены телескопом ART – ХС в рамках анализа структур и пространственного распределения галактик по данным каталога 2MRS в рамках четырехлетнего обзора неба.

Общее впечатление

Тема диссертации интересная и актуальная. Автор проделал большой объем работы в довольно разных областях: ядерная физика, физика частиц, астрофизика и космология. В целом, работа производит хорошее впечатление. Работа написана ясным языком с приемлемым количеством орфографических ошибок и опечаток. В результате прочтения текста диссертации у меня возник ряд замечаний.

1. 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. Рекомендую ознакомиться с работой [1], где объясняется этот вопрос.
2. Говоря об актуальности исследования автор пишет “Однако, в современной согласованной космологической модели Λ 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?
3. Рисунок 3 упоминается до упоминания рисунков 1,2.
4. На стр.19 приводится результат измерения периода полураспада ^{51}Cr . Приведенная точность такая же как по ссылке [73]. Стало быть,

совместный анализ позволит уменьшить неопределенность измерения периода полураспада ^{51}Cr . Рекомендую это сделать.

5. 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. Мне не совсем понятны полученные значения в формулах (3) и (4) порядка 50 см. Почему, скажем, $L_{in}=52$ см меньше радиуса сферы 66.5 см? Нейтрино не распространяются внутри источника?
6. Если я правильно понял, то полученные средние расстояния потом используются автором для учета осцилляций. Однако если длина осцилляций меньше размера сферы, то усреднять (если уж так делать) следует, взвешивая с функцией вероятности осцилляций. Например, если допустить гипотетически, что длина осцилляций это одна сотая от радиуса сферы, то внутри сферы следует ожидать поток нейтрино, независимый от расстояния в силу усреднения по огромному числу осцилляций. Стало быть, никакой информации о разнице квадратов масс получить будет нельзя. В то же время, используя чисто геометрическое среднее можно будет прийти к неверному выводу о чувствительности эксперимента к разнице квадратов масс нейтрино.
7. Формулы (6) и (7) предполагают точечный источник. В тоже время, хотя автор не приводит размеры источника, нетрудно оценить, что объем 4кг источника хрома должен быть 556 куб. см, чему соответствует кубик с ребром более 8 см, что не так и мало по сравнению с размером внутренней мишени. Учитывая важность эксперимента BEST, странно, что автор использовал столь приближенный расчет.
8. Формула (15) использована для построения допустимых контуров в пространстве осцилляционных параметров. В изложенном в тексте диссертации подходе есть ряд концептуальных проблем и ошибок.
 - а. Ошибка заключается в том, что для определения интервала допустимых параметров стерильных нейтрино нужно использовать функцию $\Delta\chi^2$, а не χ^2 , где $\Delta\chi^2$ — это разница χ^2 (нет стерильных нейтрино)- χ^2 (есть стерильные нейтрино) вычисленных для двух тестируемых гипотез. Нетрудно сообразить, что гипотеза “нет стерильных нейтрино” обладает

малым значением χ^2 , если учесть нормировку потоков как варьируемый параметр. Действительно, почти одинаковые скорости счета во внутреннем и внешнем детекторах наилучшим образом согласуются с отсутствием осцилляций, а не с их наличием. Таким образом, 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 мне представляется необоснованным.

- b. Построение доверительных интервалов методом $\Delta\chi^2$ не годится в случае когда функция $\Delta\chi^2$ отличается от параболы. Для быстро осциллирующих функций, возникающих при анализе осцилляционных нейтринных экспериментов это заведомо так и более корректно использовать подход Фельдмана-Казинса и похожие методы. В результате, даже при наличии указания на дефицит и использования правильного метода, допустимые доверительные интервалы могут отличаться от полученных методом $\Delta\chi^2$.
 - c. Полагаю, что изложение статистического анализа в диссертации выиграло бы от более подробного обсуждения и обоснования всех коррелированных и некоррелированных теоретических и экспериментальных источников неопределенностей, источников фона, калибровок детектора.
 - d. В тексте, видимо, не совсем точно отражено то, что делалось на самом деле. Однако если векторы \mathbf{r} это абсолютные числа, а ϵ относительные неопределенности (как написано), то такой χ^2 построен не корректно.
9. 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?
10. Вопросы/замечания к разделу 1.4 про потенциал источника с цинком для второй фазы BEST.
- a. Для оценки чувствительности следует использовать $\Delta\chi^2$ и подход Фельдмана-Казинса или похожие методы вместо χ^2 .

- b. Не указано какую статистику событий следует накопить с цинковым источником, чтобы получить пять стандартных отклонений.
- c. Не указано, почему именно цинковый источник представляется автору предпочтительным.
- d. 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?
- e. 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- σ областям”. Я считаю, что интерпретация этих ограничений тут следующая: STEREO не исключает 2- σ контур BEST, а PROSPECT исключает. Совместно, STEREO+PROSPECT исключают на уровне 95%CL практически все допустимые области стерильного нейтрино эксперимента BEST.

11. Замечания к главе 2.

- a. Перевод “охват” слова “grasp” в контексте телескопа мне не кажется подходящим, хотя я тут не специалист. Больше подходит “светособирающая способность”
- b. Вдруг, ни с того, ни с сего, без всякого пояснения, автор использует нестандартную, жаргонную терминологию “балдж”, видимо от английского “bulge”. Я не против, но хорошо бы ее пояснять в тексте, если уж так хочется использовать жаргонную речь.
- c. Я не обнаружил в тексте диссертации обсуждения учета поглощения и рассеяния фотонов от гипотетических распадов стерильного нейтрино. Разве галактика прозрачна для кэВ фотонов?
- d. Не хватает сравнительных выводов о чувствительности миссии SRG с конкурентными проектами.

12.К главе 3

- a. стр. 67 есть ли полная уверенность в том, что средний читатель знает, что такое “линейный байес”?
- b. Не определены в тексте величины в формуле (78).

Ссылки:

[1] The Sterile Neutrino: A short introduction. Dmitry V. Naumov
<https://inspirehep.net/literature/1712704>

Вместе с тем указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Баринов Владислав Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент,
заместитель директора по научной работе ЛЯП ОИЯИ,
доктор физико-математических наук
01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц
e-mail: dmitryvnaumov@gmail.com
тел.: 7 (49621) 6-59-12

Д.В. Наумов

17.08.2023 г.

Подпись Д.В. Наумова удостоверяю:
ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ,
кандидат физико-математических наук

И.В. Титкова

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова
Адрес: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри 6
Телефон: +7 (49621) 6-21-21, e-mail: dlnp@jinr.ru

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.V. Avrorin, ... D.V. Naumov, ... **High-Energy Neutrino Follow-up at the Baikal-GVD Neutrino Telescope**//Astron.Lett. 47 (2021) 2, 94-104, Astron.Zh. 47 (2021) 2, 114-124
2. Jarosław Stasielak... D.V. Naumov, ... **High-Energy Neutrino Astronomy—Baikal-GVD Neutrino Telescope in Lake Baikal**//Symmetry 13 (2021) 3, 377
3. F.P. An... D.V. Naumov, ...**Search for electron-antineutrinos associated with gravitational-wave events GW150914, GW151012, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814, and GW170817 at Daya Bay**//Chin.Phys.C 45 (2021) 5, 055001. Daya Bay Collaboration
4. F.P. An... D.V. Naumov, ... et al. **Precision Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation at Kilometer-Scale Baselines by Daya Bay**. Daya Bay Collaboration. Phys.Rev.Lett. 130 (2023) 16, 161802
5. A.V. Avrorin, ... D.V. Naumov, ... et al. **Deep-Underwater Cherenkov Detector in Lake Baikal**. J.Exp.Theor.Phys. 134 (2022) 4, 399-416, Zh.Eksp.Teor.Fiz. 161 (2022) 4, 476-796
6. F.P. An... D.V. Naumov, ... et al. **First Measurement of High-Energy Reactor Antineutrinos at Daya Bay**. Daya Bay Collaboration. Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 4, 041801
7. Jun Wang... D.V. Naumov, ... et al. **Damping signatures at JUNO, a medium-baseline reactor neutrino oscillation experiment**. JUNO Collaboration JHEP 06 (2022) 062