

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Дворникова Максима Сергеевича на диссертационную работу Фазлиахметова Алмаза Наиловича «Исследование взаимодействия нейтрино с ядрами ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертация Фазлиахметова Алмаза Наиловича выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Диссертационная работа посвящена изучению влияния резонансной структуры зарядово-обменной силовой функции $S(E)$ на сечение взаимодействия с нейтрино, на примере ядер ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ и оценке возможности использования изотопов теллура в детекторах нейтрино нового поколения, в частности в проекте Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ). Интерес к этим изотопам связан с возможностью их использования в качестве мишеней в детекторах действующих и планируемых международных нейтринных экспериментов, направленных на поиск процесса двойного безнейтринного бета-распада (эксперимент SNO+ — изотопы $^{128,130}\text{Te}$, LEGEND — изотоп ^{76}Ge), темной материи, стерильных нейтрино (эксперимент BEST — изотоп ^{71}Ga), регистрации когерентного рассеяния нейтрино (эксперимент COHERENT — изотоп ^{127}I) и др. Взаимодействие нейтрино от Солнца с ядрами мишени

детектора могут имитировать целевой сигнал эксперимента. Детектирование нейтрино от Солнца является одной из целей для проекта (ББНТ). Это определяет **актуальность** данной работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 1 приложения.

Во **введении** автор обосновывает актуальность темы исследований, формулирует цели диссертационной работы, обсуждает ее новизну и практическую ценность.

В **первой главе** дан краткий обзор теории бета-распада. Описано получение значений $B(GT)$ из спектра зарядово-обменных реакций (p, n) , $(^3\text{He}, t)$. Дано определение коэффициента q , характеризующего *quenching*-эффект, или нарушение нормировки GT матричных элементов.

Вторая глава посвящена расчетам сечения и скорости захвата нейтрино при взаимодействии с ядрами ^{71}Ga , и ^{127}I . Оба этих изотопа предлагались (^{127}I), или были использованы (^{71}Ga) в качестве мишеней в радиохимических детекторах солнечных нейтрино. Используя современные методы обработки и анализа данных, автором были обработаны экспериментальные данные по реакциям перезарядки $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$, $^{127}\text{I}(p, n)^{127}\text{Xe}$ и рассчитаны сечения захвата солнечных нейтрино для ^{71}Ga и ^{127}I . Автором показано, что для изотопа ^{71}Ga учет резонансной части силовой функции дает дополнительный вклад порядка 5% в итоговую скорость захвата. Обратная ситуация для ^{127}I . Здесь неучет даже одного высоколежащего гамов-теллеровского резонанса приводит к существенному уменьшению скорости захвата солнечных нейтрино свыше 60%.

В **третьей главе** представлено сравнение разных вариантов расчета Ферми-функции, в том числе и наиболее современных из них, и их влияния на сечения захвата нейтрино на примере ядра ^{127}I . Диссертант показал, что разные Ферми-функции демонстрируют разницу в скоростях захвата, достигающую до $\approx 15\%$.

В **четвертой главе** рассчитаны сечения и скорости захвата солнечных нейтрино для ^{76}Ge , ^{128}Te и ^{130}Te , используя самые последние данные по

реакциям перезарядки. Интерес к этим изотопам связан с тем, что они являются популярными кандидатами в экспериментах по поиску процесса $0\nu\beta\beta$. Изотопы $^{128,130}\text{Te}$ также предлагается использовать для поиска процесса $0\nu\beta\beta$ в проекте Баксанского большого нейтринного телескопа. Для ^{76}Ge показано, что учет переходов в непрерывные состояния ниже энергии отрыва нейтрона увеличивает суммарное значение скорости захвата на величину порядка 50%. Аналогично для ^{128}Te и ^{130}Te : учет резонансной структуры значительно (до 2х раз для ^{128}Te) повышает итоговую скорость захвата.

В **пятой главе** обсуждается фон от солнечных нейтрино для 100-тонного детектора Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ) и разработка оптического модуля для прототипа 5 т. ББНТ. Используя полученные ранее диссертантом оценки на скорости захвата солнечных нейтрино изотопами ^{128}Te и ^{130}Te получена оценка числа событий от захвата нейтрино от Солнца этими же изотопами для 100-тонного сцинтилляционного детектора ББНТ: ≈ 0.3 события в год в области интереса. Также в этой главе описана разработка и создание концентратора света для прототипа 5 т. ББНТ. Оригинальным методом, реализованным автором, была получена форма огибающей концентратора. Полученные в этой главе диссертантом результаты имеют несомненную теоретическую и практическую значимость. В **заключении** приводятся основные итоги работы.

В работе впервые для изотопов ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ были рассчитаны сечения и скорости захвата нейтрино с учетом не только низколежащих дискретных частей, но и с учетом резонансного вклада экспериментальной зарядово-обменной силовой функции $S(E)$. Для всех ядер было показано, что с ростом энергии налетающих нейтрино, в сечении захвата нейтрино начинает доминировать вклад от резонансной части экспериментальной силовой $S(E)$. Показано, что для некоторых изотопов, например ^{71}Ga , доучет резонансной структуры в силовой функции не оказывает существенного влияния на итоговую скорость захвата. С другой стороны, для ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ учет

резонансной структуры значительно повышает итоговую скорость захвата нейтрино от Солнца, что говорит о **научной новизне** полученных результатов.

Теоретическая значимость работы состоит в получении значений сечений и скоростей захвата нейтрино от Солнца для упомянутых выше ядер, которые могут быть использованы для текущих и будущих международных экспериментов в нейтринной физике по измерению двойного безнейтринного бета-распада (SNO+, LEGEND и др.) и радиохимическому детектированию нейтрино от искусственных источников (SAGE, BEST).

В ходе работы над диссертацией был разработан и создан концентратор света для 5 т. ББНТ. Производство концентратора света по оптимизированной форме было внедрено на предприятии ООО «Гидромания». Использование концентраторов света в проекте ББНТ позволит увеличить светосбор детекторов и, соответственно, улучшить энергетическое разрешение, что говорит о **практической ценности** полученных в диссертации результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием с уже полученными результатами других зарубежных научных групп, рассчитывающих сечение и скорости захвата нейтрино с учетом дискретных уровней, а также обсуждением результатов диссертационной работы на многочисленных конференциях как международных, так и российских. Следует также отметить, что по теме диссертации опубликовано 9 работ в рецензируемых журналах.

Исследования, представленные в диссертации, выполнены на высоком уровне. В ходе работы Фазлиахметов А.Н. показал высокую научную квалификацию. Автор обладает широким кругозором в своей научной области, хорошо владеет современными инструментами исследовательской работы: в области обработки экспериментальных данных, в том числе и самостоятельно создавая инструменты для этого, расчетов на основе этих данных, практической реализации результатов расчетов. В целом, диссертация оставляет хорошее впечатление. Но в диссертационной работе не обошлось без **недостатков**:

1. Неплохо было бы более конкретное название диссертационной работы, «Исследование взаимодействия ...» выглядит слишком общим.

2. В работе рассмотрены только взаимодействие с электронными нейтрино от Солнца, с энергиями < 20 МэВ и не рассматривались взаимодействие с более высокоэнергетичными нейтрино.

3. Влияние выбора Ферми-функции на сечение захвата нейтрино рассмотрено только на примере ядра ^{127}I . Расчеты для других ядер (например ^{71}Ga) могли бы быть важным дополнением к тексту диссертации.

4. Не обошлось без стилистических ошибок и опечаток. Например стр. 9: «Публикации [1-9] по результатам», хотя они нумеруются A1-A9. В некоторых местах ^3He пишется курсивом (стр. 5) в других (стр. 22) прямым шрифтом. Функции «exp», «sin» и «cos» в формулах (1.7), (2.10), (5.3) и (5.4) написаны наклонным шрифтом. Кроме того, в русскоязычной литературе следует использовать обозначение «tg» вместо «tan». В формуле (1.2) пропущена скобка в одной из реакций. Во многих местах диссертации пропущены знаки тире. В качестве опечаток можно отметить «Пологая» на стр. 15, «полноя» на стр. 19, «вклада полный фон» на стр. 65. Не понятен смысл фраз «Большая часть силы переходов Ферми» на стр. 21, «Формула F_0 и в поправочный член L_0 явно зависят значения радиуса ядра R » на стр. 52.

5. Часть иллюстраций, например Рис. 1.1, 2.1-2.3, приведены без указания источников.

Указанные выше замечания незначительны и несколько не снижают высокой научной ценности представленной диссертации. Диссертация выполнена на актуальную тему и является глубоким, самостоятельным и законченным научным исследованием.

Содержание диссертации полно и правильно отражено в автореферате.

Представленная диссертация «Исследование взаимодействия нейтрино с ядрами ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ » отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к

диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Фазлиахметов Алмаз Наилович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук о специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент

Дворников Максим Сергеевич,

доктор физико-математических наук,

и.о. заведующего теоретическим отделом, ведущий научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт

Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н.В. Пушкина Российской Академии наук (ИЗМИРАН)

адрес: 108840, город Москва, город Троицк, Калужское ш., д. 4

тел.: +7 (495) 851-0912

e-mail: maxdvo@izmiran.ru

18 марта 2025

Дворников Максим Сергеевич

Подпись заверяю, ученый секретарь ИЗМИРАН,

кандидат физ. мат. наук

Рез Александр Иосифович

Дворников Максим Сергеевич, доктор физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

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

1. Дворников М.С. Neutrino spin oscillations in a magnetized Polish doughnut // JCAP, 2023. – № 09. – 039.
2. Дворников М.С. Neutrino Spin and Flavor Oscillations in Gravitational Fields // Phys.Part.Nucl.Lett., 2023. – № 77. – 439-441.
3. Дворников М.С. Neutrino Oscillations in Gravitational Fields and Astrophysical Applications // Moscow Univ.Phys.Bull., 2023. – № 20. – 461-465.
4. Дворников М.С. Gravitational scattering of spinning neutrinos by a rotating black hole with a slim magnetized accretion disk // Class.Quant.Grav., 2023. – № 40. – 015002.
5. Дворников М.С. Interaction of supernova neutrinos with stochastic gravitational waves // Phys.Rev.D, 2021. – № 104. – 043018.
6. Дворников М.С. Impact of hypermagnetic fields on relic gravitational waves, neutrino oscillations and baryon asymmetry // Int.J.Mod.Phys.D, 2023. – № 32. – 2250141.
7. Дворников М.С. Neutrino scattering off a black hole surrounded by a magnetized accretion disk // JCAP, 2021. – № 04. – 005.
8. Дворников М.С. Flavor ratios of astrophysical neutrinos interacting with stochastic gravitational waves having arbitrary spectra // JCAP, 2020. – № 12. – 022.
9. Дворников М.С. Spin oscillations of neutrinos scattered off a rotating black hole // Eur.Phys.J.C, 2020. – № 80. – 474.
10. Дворников М.С. Spin effects in neutrino gravitational scattering // Eur.Phys.J.C, 2020. – № 5. – 056018.