

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель директора
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
В.И. Максимов

1 июня 2025 г.

О Т З Ы В

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ) на диссертацию Фазлиахметова Алмаза Наиловича «Исследование взаимодействия нейтрино с ядрами ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ », представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Исследования физики нейтрино характеризуется большим неисходяющим интересом со времени его предсказания и открытия. Несмотря на значительные успехи в понимании свойств нейтрино и его взаимодействий остается еще много открытых вопросов к его фундаментальной природе. Физика по изучению процессов взаимодействия нейтрино входит в программу многих действующих и планируемых в будущем экспериментов. Важную роль среди них занимают эксперименты с солнечными нейтрино и нейтрино, получаемых на ускорителях, где основную роль играют взаимодействия нейтрино средних энергий (менее 20 МэВ). При таких энергиях важнейшее значение имеет резонансная структура энергетического спектра при захвате нейтрино ядром. Для описания процессов захвата нейтрино ядром используется зарядово-обменная силовая функция ядра $S(E)$, которая характеризует интенсивность переходов в конечном ядре в зависимости от энергии возбуждения E . Такая силовая функция необходима для сравнения обработанных данных различных экспериментов и теоретических предсказаний. При этом измерение потоков солнечных нейтрино предоставляет уникальную возможность независимой калибровки различных экспериментов, которые в свое время привели к экспериментальному открытию нейтринных

осцилляций. Поэтому, **актуальность** темы диссертации Фазлиахметова Алмаза Наиловича, безусловно, не вызывает сомнений.

Основной **целью** диссертационной работы Фазлиахметова А.Н. является изучение влияния резонансной структуры зарядово-обменной силовой функции ядра $S(E)$ на сечение взаимодействия с нейтрино, на примере ядер ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ – популярных видов мишеней в детекторах действующих и планируемых международных нейтринных экспериментов, и оценка возможности использования изотопов теллура в детекторах нейтрино нового поколения, в частности, в проекте Большого Баксанского нейтринного телескопа (ББНТ).

Для достижения основной цели диссертации решались следующие **задачи**:

1. обработка опубликованных экспериментальных данных по реакциям перезарядки для изотопов ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$; разложение спектра возбуждения ядра на отдельные резонансы и квази-свободный фон и определение параметров возбужденных состояний;
2. вычисление сечения захвата нейтрино на ядрах ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ с учетом как дискретной части силовой функции, на основе последних данных измерений ядерных возбуждений в реакциях перезарядки, так и с учетом вклада от резонансной части, полученной из обработки экспериментальных данных;
3. исследование значимости вкладов различных ядерных резонансов в сечения и скорости захвата нейтрино от Солнца ядрами ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$;
4. исследование влияния выбора варианта функции Ферми на сечения и скорости захвата нейтрино;
5. оценить для планируемого жидко-сцинтилляционного детектора в проекте ББНТ количество событий от захвата солнечных нейтрино при добавлении изотопов $^{128,130}\text{Te}$ в мишень детектора;
6. разработка и создание концентратора света для оптического модуля 5-тонного прототипа ББНТ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения. Полный объём диссертации составляет 119 страниц, включая 44 рисунка и 11 таблиц. Список литературы содержит 102 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы. Приведена характеристика результатов, полученных в работе: их новизна, теоретическая и практическая значимость, степень их достоверности и их апробация. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** обсуждаются направления и методы разработок теоретических аспектов бета распада ядер, прецизионных расчетов матричных элементов

ядерных переходов, в особенности для сложных, деформированных ядер, что представляет исключительную важность для экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета распада ядер. Рассматривается важная роль исследований процессов захвата нейтрино ядрами для постановки и оптимизации прецизионных экспериментов по измерениям потоков солнечных нейтрино, геонейтрино и нейтрино от взрывов сверхновых звезд.

Во **второй главе** исследовано влияние высоколежащих резонансов в зарядово-обменной силовой функции $S(E)$ на сечения захвата солнечных нейтрино ядрами ^{71}Ga и ^{127}I , так как ^{71}Ga использовался в качестве мишеней в радиохимических детекторах солнечных нейтрино, а изотоп ^{127}I предлагался к использованию. Проведен анализ известных экспериментальных данных по силовой функции $S(E)$, полученных в реакциях $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$ и $^{127}\text{I}(p, n)^{127}\text{Xe}$. Проведены расчеты сечений захвата $\sigma(E)$ для солнечных нейтрино для ядер ^{71}Ga и ^{127}I .

В **третьей главе** представлено сравнение разных вариантов расчета Ферми-функции и их влияние на сечения захвата нейтрино на примере ядра ^{127}I . Проведены расчеты сечений захвата $\sigma(E_\nu)$ для солнечных нейтрино и проанализирован вклад всех компонентов солнечного нейтринного спектра в величину скорости захвата нейтрино R .

В **четвертой главе** проведен анализ экспериментальных данных по реакции перезарядки $^{76}\text{Ge}(^3\text{He}, t)^{76}\text{As}$, рассчитаны сечения и скорости захвата солнечных нейтрино для ^{76}Ge . Также, проведен анализ экспериментальных данных по реакциям перезарядки $^{128}\text{Te}(^3\text{He}, t)^{128}\text{I}$ и $^{130}\text{Te}(^3\text{He}, t)^{130}\text{I}$, рассчитаны сечения и скорости захвата солнечных нейтрино для ^{128}Te и ^{130}Te .

В **пятой главе** сделана оценка числа событий от захвата солнечных нейтрино ядрами $^{128,130}\text{Te}$ для 100-тонного сцинтилляционного детектора ББНТ при концентрации природной смеси изотопов теллура в сцинтилляторе 1%: ≈ 0.3 события в год около значения $Q_{\beta\beta} = 2527.51$ кэВ. Оценка на число событий $0\nu\beta\beta$ распада ^{130}Te при ожидаемой $T^{0\nu}_{1/2}(^{130}\text{Te}) = 10^{27}$ дает значение ≈ 1 событие в год.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Обработаны экспериментальные данные по реакциям перезарядки (p, n) и $(^3\text{He}, t)$ для изотопов ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$. Проведен анализ этих спектров, выполнено разложение экспериментального спектра возбуждения на отдельные ядерные резонансы (пигми, гигантский Гамов-Теллеровский, аналоговые) и на подложку фона от переходов в квазисвободные состояния. Для каждого

резонанса, в зависимости от его формы, были получены его параметры: положения пика и ширина. Исходя из параметров резонансов, полученных при разложении спектров реакций перезарядки, для каждого изотопа: ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ была построена экспериментальная силовая функция $S(E)$, характеризующая интенсивность переходов в конечном ядре в зависимости от энергии возбуждения.

2. Впервые для ядер ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ были рассчитаны сечения захвата нейтрино $\sigma(E_\nu)$ с учетом не только низколежащих дискретных частей, но и с учетом резонансного вклада экспериментальной зарядово-обменной силовой функции $S(E)$. Для всех ядер было пока зано, что с ростом энергии налетающих нейтрино, в сечении захвата нейтрино $\sigma(E_\nu)$ начинает доминировать вклад от резонансной части экспериментальной силовой $S(E)$.

3. Впервые для ядер ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ были рассчитаны скорости захвата нейтрино R с учетом резонансной структуры зарядово-обменной силовой функции $S(E)$. Результаты расчетов с учетом только вклада дискретных частей в силовую функцию хорошо согласовались с результатами других научных групп. 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 ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ учет резонансной структуры значительно (до 2х раз для ^{128}Te) повышает итоговую скорость захвата R . Такое поведение, в первую очередь, связано с порогом реакции захвата нейтрино, в зависимости от которого в R будут доминировать вклады либо от низкоэнергетичных pp -нейтрино (для ^{71}Ga), либо от высокоэнергетичных нейтрино от канала 8 В (^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$).

4. Исследовано влияние выбора варианта Ферми-функции на сечение и скорости захвата солнечных нейтрино ядром ^{127}I . Показано, что разные варианты расчета Ферми-функции дают разницу в скоростях захвата нейтрино R до $\approx 15\%$. Наиболее чувствительно точное определение Ферми-функции для изучения спектра борных нейтрино.

5. Используя полученные ранее оценки на скорости захвата солнечных нейтрино изотопами ^{128}Te и ^{130}Te сделана оценка числа событий от захвата нейтрино от Солнца этими же изотопами для 100-тонного сцинтилляционного детектора ББНТ при концентрации природной смеси изотопов теллура в сцинтилляторе 1% : ≈ 0.31 события в год около значения $Q_{\beta\beta} = 2527.51$ кэВ. Оценка на число событий $0\nu\beta\beta$ распада ^{130}Te при ожидаемой $T_{1/2}^{0\nu}(^{130}\text{Te}) = 10^{27}$ дает значение ≈ 1 событие в год.

Хотя и для детектора такой массы данным фоновым процессом можно пренебречь, для нового поколения детекторов массой больше 1 кт относительный вклад фона от процесса захвата солнечных нейтрино будет расти. Для экспериментов следующего поколения требуется тщательная оценка этого фона.

6. Для 5-тонного прототипа ББНТ разработан и создан концентратор света. Форма профиля концентратора была рассчитана с использованием метода струны («string method»). Был создан алгоритм, оптимизирующий светосбор концентратора, в зависимости от профиля фотокатода ФЭУ, расстояния до светоизлучающей сферы, ее диаметра и пр. Программная реализация данного алгоритма была сделана на языке Python с привлечением библиотеки numpy. Производство концентратора света по оптимизированной форме было внедрено на предприятии ООО «Гидромания».

Положения выносимые на защиту.

1. результаты разложения экспериментального спектра зарядово-обменных возбуждений ядер ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ на отдельные ядерные резонансы и квази-свободный фон, результаты определения параметров ядерных возбуждений;
2. результаты вычисления сечения и скорости захвата солнечных нейтрино в модели BS05(OP) для упомянутых ранее ядер с использованием силовой функции, учитывающей ядерные резонансы;
3. анализ вкладов парциальных ядерных резонансов в силовую функцию на величину сечений и скоростей захвата для каждой из компонент спектра солнечных нейтрино;
4. анализ влияния выбора Ферми-функций на сечение захвата нейтрино на примере ядра ^{127}I ;
5. оценка числа событий от захвата солнечных нейтрино при добавлении изотопов $^{128,130}\text{Te}$ в мишень ББНТ;
6. разработка и создание концентратора света для 5-тонного прототипа ББНТ.

В качестве замечаний следует отметить следующее: диссертация написана в сжатом, но довольно ясном стиле, имеется местами фрагментарность изложения, и хорошо оформлена. Тем не менее, все же присутствуют некоторые недостатки и опечатки. Например, опечатки в словах «постулировал» на стр. 14, «отличие» и «полагая» на стр. 15, «полная» и «очередь» на стр. 19 и т. п., также имеется

проблема с отсутствием запятых. Предпоследнее предложение на стр. 15 нуждается в редакции, включая слово «отличие». Также, отсутствуют комментарии к Рис. 2б, имеется только ссылка на оригинальную работу автора, что не совсем удобно для читателя.

Также, на наш взгляд, хорошо бы было привести или сделать оценку влияния эффекта осцилляции нейтрино. Несмотря на то, что этот вопрос выходит за рамки основной цели диссертационной работы, он особенно важен для детекторных калибровок на потоки солнечных нейтрино.

Конечно, все эти упомянутые недостатки не меняют общей положительной оценки диссертации.

Отметим, что **достоверность результатов**, полученных диссертантом, доказывается тем, что методы их получения широко апробированы в научной практике, они, там где это возможно проверить, в значительной степени согласуются с экспериментальными данными, достаточным объемом публикаций в реферируемых научных изданиях и их широкой апробацией на международных и российских конференциях и совещаниях.

Результаты работы своевременно и достаточной полнотой опубликованы в реферируемых научных журналах. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

В целом, диссертационная работа Фазлиахметова А.Н. является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Полученные автором результаты, являются шагом вперед в для экспериментальной физики нейтрино, единого описания процессов захвата нейтрино атомными ядрами. Автором был проведен тщательный анализ многочисленных факторов, где им было продемонстрировано глубокое понимание широкого круга проблем физики элементарных частиц и атомного ядра.

Диссертация Фазлиахметова А.Н. «Исследование взаимодействия нейтрино с ядрами ^{71}Ga , ^{76}Ge , ^{127}I , $^{128,130}\text{Te}$ » соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК и Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям, а соискатель Фазлиахметов Алмаз Наилович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертационная работа Фазлиахметова А.Н. была представлена, обсуждена и одобрена на Объединенном семинаре Отделения физики высоких энергий

(ОФВЭ) и Отделения теоретической физики (ОТФ) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ 3 апреля 2025 года.

01.06.2025

Федин Олег Львович
д.ф.-м.н., руководитель
Отделения физики высоких энергий

Ким Виктор Тимофеевич
д.ф.-м.н., заместитель руководителя
Отделения физики высоких энергий

Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»
мкн Орлова роща, д. 1, г. Гатчина Ленинградской обл, 188300
тел.: 8 (81371) 4-67-22, e-mail: kim_vt@pnpi.nrcki.ru

Подписи О.Л. Федина и В.Т. Кима заверяю
Ученый Секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

С. И. Воробьев

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Отделение физики высоких энергий
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ
Организационно правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение
Ведомственная принадлежность	Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Место нахождения	Российская Федерация, Ленинградская обл., г. Гатчина
Почтовый индекс, адрес организации	Россия, 188300, Ленинградская область, Гатчинский район, город Гатчина, мкр Орлова роща, д. 1, НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ
Телефон	Тел.: +7 (81371) 46025, +7 (81371) 46047 Факс: +7 (81371) 36025
Адрес электронной почты	dir@pnpi.nrcki.ru
Веб-сайт	https://www.pnpi.nrcki.ru/

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. O. Fedin et al., *Observation of quantum entanglement with top quarks at the ATLAS detector*, Nature **633** (2024) 8030, 542-547.
2. V. Kim et al., *Probing Heavy Majorana Neutrinos and the Weinberg Operator through Vector Boson Fusion Processes in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, Phys. Rev. Lett. **131** (2023) 1, 011803.
3. O. Fedin et al., *A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery*, Nature **607** (2022) 7917, 52-59; Nature **612** (2022) 7941, E24 (erratum).
4. V. Kim et al., *A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery*, Nature **607** (2022) 7917, 60-68; Nature **623** (2023) 7985, E4 (erratum).
5. O. Fedin, V. Kim et al., *Evidence for the Higgs Boson Decay to a Z Boson and a Photon at the LHC*, Phys. Rev. Lett. **132** (2024) 2, 021803.
6. A.Iu. Egorov, V.T. Kim, *Next-to-leading BFKL evolution for dijets with large rapidity separation at different LHC energies*, Phys. Rev. D **108** (2023) 1, 014010.

7. V. Kim et al., *The SHiP experiment at the proposed CERN SPS Beam Dump Facility*, Eur. Phys. J. C **82** (2022) 5, 486.
8. V. Kim et al., *FLAP Collaboration: Tasks and Perspectives. Study of Fundamentals and New Applications of Controllable Generation of Electromagnetic Radiation by Relativistic Electrons Using Functional Materials*, Phys. Part. Nucl. Lett. **18** (2021) 3, 338-353.
9. V. Kim, *Higgs Boson and Naturalness Problem in the Standard Model*, Phys. Part. Nucl. **55** (2024) 1, 156-159.
10. V. Kim et al., *Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA*, Natural Science Review 1 (2024) **1**, 1-325