

*На правах рукописи*

**Фазлиахметов Алмаз Наилович**

**Исследование взаимодействия нейтрино  
с ядрами  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$**

1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

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

**Научный руководитель:**

*Лубсандоржиев Баярто Константинович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Дворников Максим Сергеевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), теоретический отдел, и.о. заведующего теоретическим отделом, ведущий научный сотрудник.

*Егорычев Виктор Юрьевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ), директор.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе 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 и на сайте ИЯИ РАН по адресу: <https://www.inr.ru>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

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

Демидов Сергей Владимирович

## Общая характеристика работы

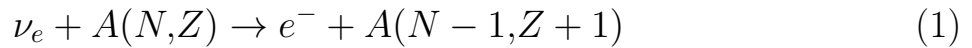
**Актуальность темы исследования.** Существование нейтрино в начале 30-х годов предположил Вольфганг Паули для объяснения загадки спектра электронов в бета-распаде. Со времен экспериментального обнаружения нейтрино (точнее антинейтрино) в 1956 году командой под руководством Клайда Коуэна и Фредерика Райнеса нейтринная физика достигла значительных успехов. Тем не менее в этой области все еще остаются открытыми ряд фундаментальных вопросов и задач, такие как:

- измерение массы нейтрино
- определение природы массы: является ли нейтрино дираковской или майорановской частицей
- иерархия массовых состояний
- существование стерильных нейтрино
- обнаружение реликтовых нейтрино
- прецизионные измерения потоков нейтрино от Солнца
- детектирование потоков нейтрино от астрофизических источников (сверхновые и др.)
- влияние структуры ядра на сечение захвата нейтрино
- неупругое рассеяние нейтрино в экспериментах с ускорительными источниками
- создание детекторов нейтрино нового поколения с большей массой мишени в низкофоновых подземных лабораториях, например в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН

Этот список проблем физики нейтрино далеко не полон. В данной работе рассматривается взаимодействие с нейтрино средних энергий,  $< 20$  МэВ для солнечных нейтрино и для нейтрино в ускорительных экспериментах. При таких энергиях налетающих частиц нельзя не учитывать резонансную структуру возбуждений ядра.

Сечения захвата нейтрино описывают реакции, в которых при поглощении налетающего нейтрино из ядра вылетает электрон с одновременным

превращением одного нейтрона в протон (реакция обратного бета-распада):



Эти сечения можно записать в виде произведения атомных и кинематических факторов и квадратов ядерных матричных элементов. Величина и энергетическая зависимость сечения захвата нейтрино  $\sigma(E)$  описывается зарядово-обменной силовой функцией  $S(E)$ , которая характеризует интенсивность переходов в конечном ядре в зависимости от энергии возбуждения. Зарядово-обменная силовая функция  $S(E)$  имеет резонансный характер, и её резонансная структура влияет на сечения нейтринного захвата  $\sigma(E)$ . Экспериментально она определяется в основном в реакциях перезарядки  $A(N, Z) + p \rightarrow A(N - 1, Z + 1) + n$  и  $A(N, Z) + {}^3\text{He} \rightarrow A(N - 1, Z + 1) + t$ , а теоретически может быть рассчитана, в том числе с применением микроскопической теории ядра [1]. Задача исследования взаимодействия нейтрино с атомными ядрами и учет тонких эффектов влияющих на вероятности таких процессов имеет большое значение при моделировании и обработке данных эксперимента.

Кроме того очень важным вопросом является сопоставление результатов разных экспериментальных групп и их сравнение с предсказаниями теоретических моделей.

Уникальную возможность независимой калибровки различных экспериментов дает измерение потоков солнечных нейтрино. В этой связи следует отметить радиохимические эксперименты по детектированию солнечных нейтрино — хлор-аргоновый, реализованный Р. Дэвисом в США (изотоп  ${}^{37}\text{Cl}$  [2]), галлий-германиевые в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (изотоп  ${}^{71}\text{Ga}$  SAGE [3]) и в лаборатории Гран-Сассо в Италии (изотоп  ${}^{71}\text{Ga}$  GALLEX/GNO [4]), которые показали дефицит потоков солнечных нейтрино относительно теоретических предсказаний.

Интерес к изотопам  ${}^{71}\text{Ga}$ ,  ${}^{76}\text{Ge}$ ,  ${}^{127}\text{I}$ ,  ${}^{128,130}\text{Te}$  связан с возможностью их использования в качестве мишеней в детекторах действующих и планируемых международных нейтринных экспериментов, направленных на поиск процесса двойного безнейтринного бета-распада, темной материи, стерильных нейтрино и др. Так для экспериментов по поиску процесса двойного безнейтринного бета-распада (изотопы  ${}^{128,130}\text{Te}$  — SNO+ [5], изотоп  ${}^{76}\text{Ge}$

– LEGEND [6], изотоп  $^{100}\text{Mo}$  – CUPID [7] и др.), по регистрации частиц темной материи (XENON [8] и др.) или регистрации когерентного рассеяния нейтрино (изотоп  $^{127}\text{I}$  – COHERENT [9; 10]) взаимодействие нейтрино от Солнца с ядрами мишени детектора могут имитировать целевой сигнал эксперимента. При этом, особенностью такого процесса является его принципиальная неустранимость [11; 12].

Детектирование нейтрино от Солнца заявляется в качестве одной из целей для проекта Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ). В этом проекте предполагается постройка жидко-сцинтилляционного детектора нейтрино нового поколения с массой мишени 10 кт, направленного на измерение потоков нейтрино и антинейтрино от Солнца, Земли и астрофизических источников [13]. Установка будет размещена в подземных залах Баксанской нейтринной обсерватории (БНО ИЯИ РАН) на глубине около 4700 метров водного эквивалента. На данный момент построен и испытан прототип детектора с массой мишени 0.5 т и идет строительство прототипа с мишенью 5 т. Также предлагается использование изотопа  $^{130}\text{Te}$ , растворенного в жидком сцинтилляторе, в третьей фазе проекта, на прототипе с массой мишени в 100 т. для поиска процесса  $0\nu\beta\beta$ .

**Цели и задачи диссертационной работы.** Целью настоящей работы является изучение влияния резонансной структуры зарядово-обменной силовой функции  $S(E)$  на сечение взаимодействия с нейтрино, на примере ядер  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  – популярных мишеней в детекторах действующих и планируемых международных нейтринных экспериментов, и оценка возможности использования изотопов теллура в детекторах нейтрино нового поколения, в частности в проекте Баксанского большого нейтринного телескопа. В ходе выполнения работы решались следующие **задачи**:

1. Обработать опубликованные экспериментальные данные по реакциям перезарядки для изотопов  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$ ; разложить спектр возбуждения ядра на отдельные резонансы и квази-свободный фон и определить параметры возбужденных состояний.
2. Вычислить сечение захвата нейтрино на ядрах  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  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. Исследовать значимость вкладов различных ядерных резонансов в сечения и скорости захвата нейтрино от Солнца ядрами  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$ .
4. Проанализировать влияние выбора варианта функции Ферми на сечение и скорости захвата нейтрино.
5. Для планируемого жидко-сцинтилляционного детектора в проекте Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ) оценить число событий от захвата солнечных нейтрино при добавлении изотопов  $^{128,130}\text{Te}$  в мишень детектора.
6. Разработать и создать концентратор света для оптического модуля прототипа 5 т. Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ).

**Научная новизна.** Все результаты, полученные в диссертационной работе являются новыми.

1. Впервые из обработки экспериментальных спектров для реакций перезарядки ( $p, n$ ) и ( $^3\text{He}, t$ ) для ядер  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  получены параметры ядерных возбуждений и фона от переходов в квази-свободные состояния.
2. Впервые для этих ядер было рассчитано сечение и скорости захвата солнечных нейтрино с учетом не только низколежащих дискретных уровней, но и ядерных резонансов в зарядово-обменной силовой функции.
3. Впервые для ядер  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  проведен анализ величины вкладов различных ядерных резонансов в сечения и скорости захвата солнечных нейтрино.
4. В проекте Баксанского большого нейтринного телескопа для детектора нейтрино массой 100 т вычислено число событий от захвата солнечных нейтрино ядрами  $^{128,130}\text{Te}$  при концентрации природного теллура в мишени 1%.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты теоретических расчетов могут быть использованы при оценке фона от солнечных нейтрино 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). Сечения нейтринного захвата и количество событий при взаимодействии зависят от резонансной структуры силовой функции  $S(E)$ , определяющей спектр возбуждения ядра и характер ее зависимости от энергии. В работе показано, что при учете вклада от резонансной части силовой функции, сечения и скорости захвата солнечных нейтрино сильно возрастают.

Создание прототипа на 5 т. является вторым этапом работ по проекту ББНТ. Этот детектор позволит отработать системы глубокой очистки сцинтиллятора, системы мюонного вето на основе детекторов черенковского излучения в водном баке и пластиковых сцинтилляторов над горловиной установки, обновленной системы регистрации и многого другого. Оптический модуль для прототипа с концентратором света позволяет не только увеличить чувствительность установки, но и снизить денежные расходы на весь проект, уменьшая необходимое число фотодетекторов и каналов электроники.

**Методология и методы исследования.** Для расчета сечения захвата нейтрино использовалась силовая функция, разделенная на дискретную (для малых энергий возбуждения) и резонансную части. Для расчета с дискретной частью использовались данные по ядерным возбуждениям из реакций перезарядки, резонансная часть получена разложением спектров реакций на отдельные резонансы и фон от квази-свободных состояний и более высокоспиновых резонансов. Для резонансов использовалась сглаженная Брейт-Вигнеровская аппроксимация, при фите подбирались положение пика и его ширина. Форма подложки от квази-свободных состояний выбрана согласно методу, описанному в работе [14]. Далее силовая функция нормировалась с учетом правила сумм Икеды и значению параметра квенчинга. Для расчета скорости захвата солнечных нейтрино использовалась модель Солнца BS05(OP) [15].

Для расчета формы профиля концентратора света был реализован «метод струны» [16].

### **Положения выносимые на защиту.**

1. Результаты разложения экспериментального спектра зарядово-обменных возбуждений ядер  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  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  $^{127}\text{I}$ .
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 прототипа 5 т. ББНТ.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием с уже полученными результатами других авторов [17; 18], рассчитывающих сечение и скорости захвата нейтрино с учетом дискретных уровней.

Публикации А1–А9 по результатам диссертации были опубликованы в российских и международных изданиях, где прошли процедуру рецензирования.

Результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. 69-я Международная конференция «Ядро-2019» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 1 — 5 Июля 2019, Дубна, Россия.



2. LXX Международная конференция «Ядро-2020. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии, 11 – 17 Октября 2020, Онлайн.
3. Conference on Neutrino and Nuclear Physics 2020 (CNNP2020), Cape Town (South Africa) 24-28 February 2020.
4. LXXI Международная конференция «Ядро–2021. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии», 20 – 25 Сентября 2021, Онлайн.
5. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021», 12 – 23 Апреля 2021, Москва, Россия.
6. 37th International Cosmic Ray Conference ICRC2021, 12 – 24 July 2021
7. International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2022), Moscow, Russia, 29th of November - 2nd of December 2022.
8. 73-я международная конференция по ядерной физике «ЯДРО-2023: Фундаментальные вопросы и приложения», 9 – 13 Октября 2023, Саров, Россия
9. 74-я международная конференция «Ядро-2024: Фундаментальные проблемы и приложения», 1 – 5 Июля 2024, Дубна, Россия.

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 10 статьях (A1–A10), 9 из которых опубликованы в рецензируемых международных научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**Личный вклад.** Все результаты, выносимые на защиту, получены лично Фазлиахметовом А. Н. или при его определяющем вкладе. А.Н. Фазлиахметовым лично решены следующие задачи:

- а) разработка и тестирование программ для разложения спектров ядер  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  на отдельные резонансы и определение их параметров
- б) построение силовой функции, учитывающей вклад от ядерных резонансов

- в) расчеты сечений и скоростей захвата солнечных нейтрино, анализ величины вкладов различных ядерных резонансов в сечение для ядер  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$
- г) расчеты и сравнения сечений захвата нейтрино при различных вариантах расчета Ферми-функций для ядра  $^{127}\text{I}$
- д) расчет профиля концентратора света, разработка оптического модуля для прототипа 5 т. ББНТ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения. Полный объём диссертации составляет 119 страниц, включая 44 рисунка и 11 таблиц. Список литературы содержит 102 наименования

## Содержание работы.

**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 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  $^{71}\text{Ga}$ , и  $^{127}\text{I}$ . Оба этих изотопа предлагались ( $^{127}\text{I}$ ), или были использованы ( $^{71}\text{Ga}$ ) в качестве мишеней в радиохимических детекторах солнечных нейтрино. В главе проведен анализ экспериментальных данных 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  $^{71}\text{Ga}$  и  $^{127}\text{I}$ . Глава основывается на результатах, опубликованных в работах (А5), (А7) и (А8) из списка публикаций автора.

Полное сечение захвата нейтрино с энергией  $E_\nu$  можно записать в виде суммы низколежащих дискретных и высоколежащих резонансных частей  $\sigma_{total}(E_\nu)$ :

$$\sigma_{total}(E_\nu) = \sigma_{diskr}(E_\nu) + \sigma_{res}(E_\nu) \quad (2)$$

Резонансная и дискретная части сечения равны нулю при энергиях нейтрино, меньших пороговой энергии  $Q_{EC}$ .

При  $E_\nu > Q_{EC}$  дискретное сечение может быть записано как [19]:

$$\sigma_{discr}(E_\nu) = \frac{1}{\pi} \sum_k G^2 p_e E_e F(Z, E_e) [B(F)_k + \left(\frac{g_A}{g_V}\right)^2 B(GT)_k] \quad (3)$$

где  $E_e, p_e$  энергия и импульс образовавшегося электрона (при условии, что  $E_e - m_e c^2 = E_\nu - Q_{EC} - E > 0$ ),  $F(Z, E_e)$  – функция Ферми,  $G$  – константа взаимодействия, отношение констант аксиального и векторного взаимодействия взято равным 1.276 [20].

Резонансное сечение определяется как [21]:

$$\sigma_{res}(E_\nu) = \frac{g_A^2}{\pi} \int_{\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} G^2 p_e E_e F(Z, E_e) S(E) dE \quad (4)$$

где пределы интегрирования  $\varepsilon_{min}, \varepsilon_{max}$  задаются выбранной областью энергий, на которой учитывается вклад непрерывной зарядово-обменной силовой функции  $S(E)$ .

Силовая функция GT-состояний в резонансной области энергий может быть представлена как сумма силовых функций отдельных резонансов, в нашем случае GTR и пигми-резонансов (PR1, PR2, ...):

$$S(E) = S_{GTR}(E) + S_{PR1}(E) + S_{PR2}(E) + \dots \quad (5)$$

Форма каждого резонанса с квадратом матричного элемента  $M_k^2 \equiv B(GT)_k$  определяется положением максимума  $E_k$  и шириной  $\Gamma_k$  Брейт-Вигнеровской аппроксимации:

$$S_k(E) = M_k^2 \frac{\Gamma_k}{(E - E_k)^2 + \Gamma_k^2} \phi(E) \quad (6)$$

где функция  $\phi(E) = 1 - e^{-(\frac{E}{\Gamma_k})^2}$  является форм-фактором [1] который отвечает за выполнение условия  $S(E) = 0$  (или  $\phi(E) = 0$ ) при энергиях  $E_\nu \leq Q_{EC}$ , то есть энергиях ниже порога реакции.

Нормировка силовой функции производилась согласно правилу GT-сумм:

$$\sum_k B(GT)_k + \int_{\Delta_{min}}^{\Delta_{max}} S(E) dE = q_{exp} \cdot 3(N - Z) \quad (7)$$

где  $\Delta_{min} = 3$  МэВ и  $\Delta_{max} = 30$  МэВ – максимальная экспериментально известная энергия спектра возбуждений ядра  $^{71}\text{Ge}$ ,  $q_{exp}$  – «экспериментальный» параметр *quenching*-эффекта. В теории конечных ферми-систем параметру  $q$  соответствует эффективный заряд квазичастиц  $e_q^2$  [1].

Для  $^{71}\text{Ga}$  экспериментальные данные с разрешением 45 кэВ в зарядово-обменной реакции  $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$  были получены на циклотроне исследовательского центра RCNP в Осаке [22]. Было распознано 20 дискретных уровней возбуждения ниже энергии 3 МэВ (Рис. 1а) и определены их значения  $B(GT)_k$ . Эти данные были использованы для построения экспериментальной силовой функции, как для дискретной, так и для непрерывной части спектра.

Форма спектра от переходов в квази-свободные состояния выбрана согласно методу, описанному в работе [14].

Скорость захвата нейтрино вычисляется через свертку сечений с плотностями потока налетающих солнечных нейтрино:

$$R = \int_0^{E_{max}} \rho_{solar}(E_\nu) \sigma(E_\nu) dE_\nu, \quad (8)$$

где  $E_{max} = 18.79$  МэВ соответствует максимальной энергии нейтрино в her канале:  $^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$ . Потоки нейтрино брались из модели Солнца BS05(OP) [15].

В Таблице 1 приведено сравнение оценки скорости захвата в единицах SNU (количеству событий в секунду на  $10^{36}$  ядер мишени) из [22] для  $^{71}\text{Ga}$  с

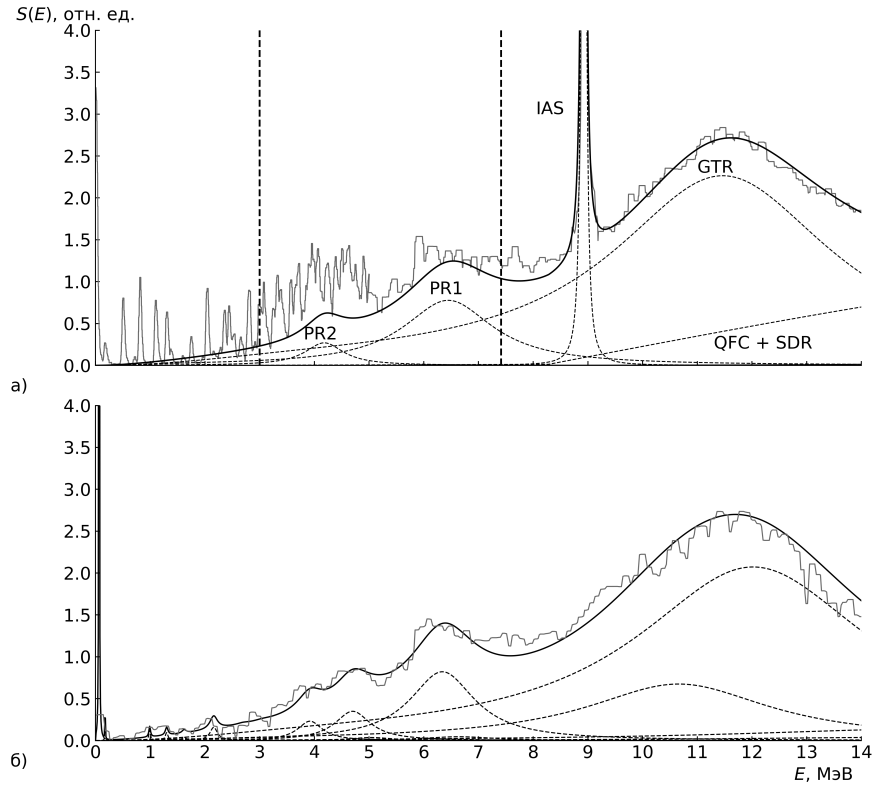


Рис. 1 — а) Экспериментальная зарядово-обменная силовая функция ядра  $^{71}\text{Ge}$ . Серым показаны результаты эксперимента [22]. Черная линия показывает результат фитирования силовой функции. Вертикальными линиями ограничен энергетический диапазон от от 3 МэВ до  $S_n$  — энергии отрыва нейтрона. б) Расчет зарядово-обменной силовой функции, выполненный в теории конечных ферми-систем (ТКФС) [1]. Рисунок из работы (A8) из списка публикаций автора.

расчетами на основе экспериментальной зарядово-обменной силовой функции с разными оценками *quenching*-параметра.

Таблица 1 — Зависимость скорости захвата солнечных нейтрино от значения *quenching*-параметра  $q$  в единицах SNU для  $^{71}\text{Ga}$ .  $R_{discr}$  — соответствует учету только дискретных уровней,  $R_{res}$  — от только резонансных состояний с энергией от 3 МэВ до энергии отрыва нейтрона  $S_n$ ,  $R_{total} = R_{discr} + R_{res}$ .

Таблица взята из работы (A8) из списка публикаций автора.

Скорость захвата [SNU]	Расчет $q_{exp} = 1$	Расчет $q_{exp} = 0.5$	[22]
$R_{discr}$	119.5	119.5	115.9
$R_{res}$	14.2	7.0	6.5
$R_{total}$	133.7	126.5	122.4

Таблица 2 — Скорости захвата солнечных нейтрино  $R$  в единицах SNU для изотопа  $^{127}\text{I}$  с экспериментальной силовой функцией. Таблица из работ (A5) и (A7) из списка публикаций автора.

	$^8\text{B}$	<i>hep</i>	$^{13}\text{N}$	$^{15}\text{O}$	$^7\text{Be}$	Total
$R (^{127}\text{Xe} + ^{126}\text{Xe})$	33.232	0.204	0.168	0.514	3.031	37.904
$R(\text{no GTR})$	9.818	0.047	0.165	0.483	3.012	14.223
$R(\text{no GTR, PR1})$	6.018	0.019	0.164	0.468	3.002	10.345
$R(^{127}\text{Xe})$	27.889	0.117	0.168	0.514	3.031	32.474
$R(^{126}\text{Xe})$	5.344	0.086	0	0	0	5.430

Аналогичные расчеты были сделаны также для  $^{127}\text{I}$  (см. Таблицу 2) с потоками нейтрино от моделей BS05(OP) [15].

Для изотопа  $^{71}\text{Ga}$  учет резонансной части силовой функции дает дополнительный вклад порядка 5% в итоговую скорость захвата. Причиной этому низкий порог реакции захвата нейтрино  $E_{th} = 0.2332$  МэВ, в результате чего в скорости захвата доминируют низкоэнергетичные pp-нейтрино.

Обратная ситуация для  $^{127}\text{I}$ . Здесь неучет даже одного высоколежащего гамов-теллеровского резонанса приводит к существенному уменьшению скорости захвата солнечных нейтрино свыше 60% для  $^{127}\text{I}$  (см. Таблицу 2).

**В третьей** главе представлено сравнение разных вариантов расчета Ферми-функции и его влияния на сечения захвата нейтрино на примере ядра  $^{127}\text{I}$ . Глава основывается на результатах, опубликованных в работе (A2) из списка публикаций автора.

В большинстве современных работ по тематике взаимодействия нейтрино с веществом специально не обсуждается проблематика связанная с Ферми-функцией. Несмотря на активную проработку различных вариантов расчета Ферми-функции в предыдущие десятилетия, до сих пор нет "стандартного" общепризнанного её варианта. Это сильно усложняет сравнение сечений захвата нейтрино рассчитанных разными авторами.

Общее выражение для определения функции  $F(Z, W, A)$  впервые было дано в работе Ферми 1934 г. [23] по теории  $\beta$ -распада:

$$F_0(Z, A, W) = 4(2pR)^{2(\gamma-1)} \frac{|\Gamma(\gamma + iy)|^2}{(\Gamma(1 + 2\gamma))^2} e^{\pi y}, \gamma = \sqrt{1 - (\alpha Z)^2}, y = \pm \alpha ZW/p. \quad (9)$$

Формула 9 выведена в приближении точечного заряда ядра. Если вместо точечного ядра рассматривать ядро конечного размера то необходимо ввести поправочный коэффициент  $L_0$ . Ядро в этом случае представляется равномерно заряженной сферой конечного радиуса  $R$ . Явное выражение для  $L_0$  модельно-зависимо.

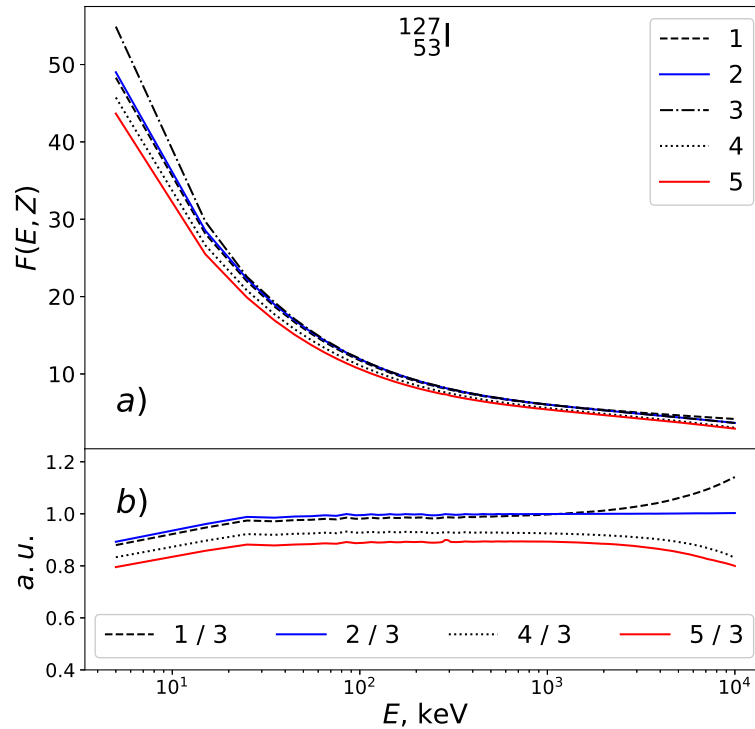


Рис. 2 — *a)* — Значения Ферми-функций в зависимости от энергии: 1 — [23], 2 — Ферми-функция с поправками  $L_0$  и фермиевским распределением заряда в ядре из [24], 3 — [25], 4 — [26], 5 — [27]. *b)* — Отношение значений Ферми-функций к [25]. Рисунок из работы (A2) из списка публикаций автора.

В работах Янеки [25], Вилкинсона [28], Джеллепова-Зыряновой [26] и Суслова [27] был рассмотрен вопрос влияния конечного размера ядра на значение Ферми-функции. Кроме этого, в работах Суслова [27] и Янеки [25] была описана еще и поправка, характеризующая влияние орбитальных электронов (экранировка). Подробный обзор поправок к Ферми-функции дан в работе [24].

На Рис.2 показаны значения разных вариантов Ферми-функций. Заметно что с ростом энергии расхождение увеличивается до  $\approx 15\%$ .

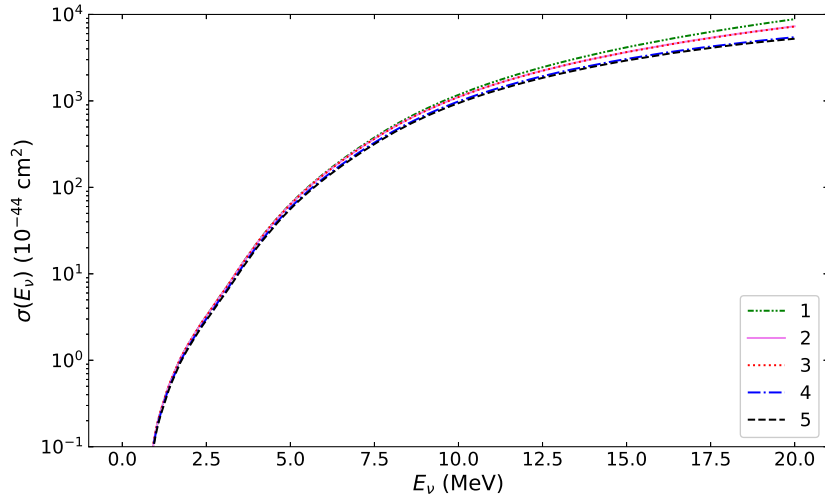


Рис. 3 — Сечение захвата нейтрино ядром  $^{127}\text{I}$  рассчитанная с разными Ферми-функциями. 1 — [23], 2 — Ферми-функция с поправками  $L_0$  и фермиевским распределением заряда в ядре из [24], 3 — [25], 4 — [26], 5 — [27]. Рисунок из работы (A2) из списка публикаций автора.

На Рис. 3 показано сравнение сечений захвата нейтрино ядром  $^{127}\text{I}$ , рассчитанная с разными Ферми-функциями. В качестве силовой функции  $S(E)$  были взяты экспериментальные данные из [29] (подробнее про функцию  $S(E)$  см. [30]). Начиная с энергии 10 МэВ разница сечений достигает 10% и далее увеличивается с ростом энергии.

Таблица 3 — Скорости захвата  $R$  солнечных нейтрино (в SNU) ядром  $^{127}\text{I}$  рассчитанная с разными Ферми-функциями. 1 — [23], 2 — Ферми-функция с поправками  $L_0$  и фермиевским распределением заряда в ядре из [24], 3 — [25], 4 — [26], 5 — [27]. Таблица из работы (A2) из списка публикаций автора.

Ферми-функция	$^8\text{B}$	hep	$^{13}\text{N}$	$^{15}\text{O}$	$^{17}\text{F}$	pep	$^7\text{Be}$	Total
1	27.286	0.120	0.161	0.543	0.013	0.818	2.850	31.795
2	25.735	0.108	0.163	0.549	0.013	0.826	2.890	30.287
3	25.706	0.108	0.164	0.551	0.013	0.828	2.923	30.29
4	22.853	0.093	0.152	0.510	0.012	0.767	2.695	27.085
5	21.881	0.089	0.145	0.490	0.012	0.738	2.562	25.920

В Таблице 3 даны значения скорости захвата солнечных нейтрино  $R$  в реакции  $^{127}\text{I}(\nu_e, e^-)^{127}\text{Xe}$  в единицах SNU (количеству событий в секунду на  $10^{36}$  ядер мишени). В расчетах использовалась солнечная модель BS05(OP) [15]. Разница скоростей захвата между расчетами, выполненными



с Ферми-функцией из таблиц Янеки [25] (№3 в таблице, наиболее популярная Ферми-функция для расчетов фона от солнечных нейтрино) и для примера, Ферми-функцией из таблиц Сулова [27] (№5 в таблице) достигает 15%.

Проведенные расчеты сечений захвата  $\sigma(E_\nu)$  для солнечных нейтрино показывают, 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. Также крайне важным вопросом точного поведения Ферми-функции становится применительно к области низких энергий налетающего нейтрино, что соответствует области с доминированием дискретных возбуждений атомного ядра и  $pp$  солнечным нейтрино.

**В четвертой** главе проведен анализ экспериментальных данных по реакции перезарядки  $^{76}\text{Ge}(^3\text{He}, t)^{76}\text{As}$ ,  $^{128}\text{Te}(^3\text{He}, t)^{128}\text{I}$  и  $^{130}\text{Te}(^3\text{He}, t)^{130}\text{I}$  и рассчитаны сечения и скорости захвата солнечных нейтрино для  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{128}\text{Te}$  и  $^{130}\text{Te}$ . Интерес к изотопам  $^{76}\text{Ge}$  и  $^{130}\text{Te}$  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. Использование изотопа  $^{130}\text{Te}$ , растворенного в жидком сцинтилляторе, предлагается в третьей фазе проекта, на прототипе с массой мишени в 100 т. Глава основывается на результатах, опубликованных в работе (A1), (A3), (A9) из списка публикаций автора.

Экспериментальные данные с разрешением 30 кэВ в зарядово-обменных реакциях на  $^{76}\text{Ge}$  были получены на циклотроне университета Осаки в реакции  $^{76}\text{Ge}(^3\text{He}, t)^{76}\text{As}$  [31] на пучке  $^3\text{He}^{++}$  с энергией 420 МэВ. Результаты вычислений по каждому из каналов образования солнечных нейтрино представлены в Таблице 4. Учет резонансных состояний приводит к увеличению скорости захвата с 15.9 SNU до 23.5 SNU, т.е. в 1.5 раза (для  $q_{exp} = 1$ ). В частности, учет только одного GTR добавляет 3.78 SNU. Основной вклад в итоговую скорость захвата дают высокоэнергичные солнечные нейтрино, образовавшиеся в результате реакции:  $^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$ . Нейтрино, рождающиеся в других каналах, такие как:  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ ,  $p + e^- + p \rightarrow ^2\text{H} + \nu_e$  и другие не дают существенного вклада в итоговую скорость захвата. Для пере-

Таблица 4 — Зависимость скорости захвата солнечных нейтрино от значения quenching-эффекта  $q_{exp}$  по каналам реакции в единицах SNU для  $^{76}\text{Ge}$ .  $R_{discr}$  - соответствует учету только дискретных уровней,  $R_{res}$  - от только резонансных состояний с энергией от 5 МэВ до энергии отрыва нейтрона  $S_n$ ,  $R_{GTR}$  - от только гигантского Гамов-Теллеровского резонанса в интервале энергий от 5 МэВ до  $S_n$ ,  $R_{total} = R_{discr} + R_{res}$ . Таблица из работы (A2) из списка публикаций автора.

Скорость захвата [SNU]	pp	hep	$^{13}\text{N}$	$^{17}\text{F}$	$^{15}\text{O}$	$^8\text{B}$	Полная скорость захвата
$R_{discr}$	1.369	0.045	0.102	0.021	0.828	13.542	15.9
$R_{res}, q_{exp} = 1$	0.0	0.051	0.0	0.0	0.0	7.563	7.614
$R_{GTR}, q_{exp} = 1$	0.0	0.025	0.0	0.0	0.0	3.752	3.778
$R_{res}, q_{exp} = 0.55$	0.0	0.026	0.0	0.0	0.0	4.023	4.054
$R_{GTR}, q_{exp} = 0.55$	0.0	0.014	0.0	0.0	0.0	1.998	2.011
$R_{total}, q_{exp} = 1$	1.369	0.072	0.102	0.021	0.828	21.11	23.52
$R_{total}, q_{exp} = 0.55$	1.369	0.090	0.102	0.021	0.828	17.669	19.96

ходов в дискретные состояния ниже 5 МэВ скорость захвата равна 15.9 SNU, что полностью согласуется с [17] (15.6 SNU). Учет переходов в непрерывные состояния ниже энергии отрыва нейтрона увеличивает суммарное значение скорости захвата на величину порядка 50%.

Для  $^{128}\text{Te}$  и  $^{130}\text{Te}$  расчетные значения скоростей захвата солнечных нейтрино в единицах SNU даны в табл. 5 и 6. Расчеты проводились как с учетом вклада только от дискретных уровней –  $R_{discr}$ , так и с учетом вклада только от силовых функции  $S(E)$ , полученных из обработки экспериментальных данных для реакций  $^{128}\text{Te}(^3\text{He}, t)^{128}\text{I}$  и  $^{130}\text{Te}(^3\text{He}, t)^{130}\text{I}$  –  $R_{res}$ , а также дана их сумма  $R_{Total} = R_{discr} + R_{res}$ .

Таблица 5 — Скорость захвата  $R$  солнечных нейтрино для изотопа  $^{128}\text{Te}$  в единицах SNU. Таблица из работы (A3) из списка публикаций автора.

$^{128}\text{Te}$	pp	pep	hep	$^7\text{Be}$	$^8\text{B}$	$^{13}\text{N}$	$^{17}\text{F}$	$^{15}\text{O}$	Total
$R_{discr}$	0	0.815	0.036	0	12.144	0	0.386	0.010	13.390
$R_{res}$	0	0	0.127	0	24.848	0	0	0	24.976
$R_{Total}$	0	0.815	0.163	0	36.992	0	0.385	0.010	38.366

Для  $^{128}\text{Te}$  учет только низколежащих дискретных состояний дает значение  $R_{discr} = 13.390$  SNU. Однако до учет резонансных состояний увеличивает итоговое значение  $R_{Total}$  в 3 раза, до 38.366 SNU. Связано это с вкладом от большого потока высокоэнергетических нейтрино от реакции

Таблица 6 — Скорость захвата  $R$  солнечных нейтрино для изотопа  $^{130}\text{Te}$  в единицах SNU. Таблица из работы (A3) из списка публикаций автора.

$^{130}\text{Te}$	$pp$	$per$	$hep$	$^7\text{Be}$	$^8\text{B}$	$^{13}\text{N}$	$^{17}\text{F}$	$^{15}\text{O}$	Total
$R_{discr}$	0	5.633	0.039	37.701	14.166	2.298	4.433	0.112	64.382
$R_{res}$	0	0	0.138	0	33.179	0	0	0	33.317
$R_{Total}$	0	5.633	0.166	37.701	39.015	2.298	4.433	0.112	89.358
[17]	0	5.9	-	43.2	15.9	2.4	4.6	-	71.9
[18]	-	-	-	-	-	-	-	-	67.7

$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$  ( $E_{max} < 16$  МэВ), которые возбуждают ядро до области PR и GTR резонансов. Аналогичная картина и для  $^{130}\text{Te}$ . Вклад только от дискретных состояний дает значение скорости захвата  $R_{discr} = 64.382$  SNU, что достаточно хорошо согласуется с аналогичными расчетами Н. Ejiri и S. R. Elliott [17; 18], с учетом того, что в расчетах этой группы использовалась другая Ферми-функция. При включении в расчет непрерывной части силовой функции  $S(E)$  скорость захвата солнечных нейтрино возрастает до  $R_{Total} = 89.358$  SNU. Большая разница в скоростях захвата для изотопов  $^{128}\text{Te}$  и  $^{130}\text{Te}$  обусловлена разницей в порогах реакции захвата нейтрино:  $Q_{EC} = 1256$  кэВ для  $^{128}\text{Te}$  и  $Q_{EC} = 417$  кэВ для  $^{130}\text{Te}$ , из-за чего для  $^{128}\text{Te}$  в процессе обратного бета-распада не участвуют  $per$  нейтрино от реакций  $p + e^- + p \rightarrow ^2\text{H} + \nu_e$  ( $E = 1.422$  МэВ) и  $^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$  ( $E = 0.862$  МэВ).

**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. Глава основывается на результатах, опубликованных в работах (A4), (A6), (A10) из списка публикаций автора.

Детектор ББНТ массой 100 т предлагается использовать для поиска процесса  $0\nu\beta\beta$  в  $^{130}\text{Te}$ , путем добавления в него природной смеси теллура. Ожидаемое число  $0\nu\beta\beta$  событий  $R_{\beta\beta}$  можно оценить исходя из периода полураспада по формуле [17]:

$$R_{\beta\beta} = \frac{1}{M} \frac{dN}{dt} = \frac{\lambda N}{M} \approx \frac{420}{W(g)} \left( \frac{10^{27} \text{л.}}{T_{1/2}^{0\nu}} \right) \frac{\text{соб.}}{\text{т} \cdot \text{год}} \quad (10)$$

где  $W(g)$  – молярная масса  $\beta\beta$  изотопа, а  $M$  – его масса в тоннах. Для 100-тонного сцинтилляционного детектора ББНТ при концентрации природной смеси изотопов теллура в сцинтилляторе 1% и  $T_{1/2}^{0\nu}(^{130}\text{Te}) = 10^{27}$  она даст  $\approx 1$  событие в год. Можно оценить ожидаемое число событий от захвата солнечных нейтрино в год этого же детектора. Учитывая, что в одной тонне теллура число атомов изотопа  $^{130}\text{Te}$  (изотопное содержание  $\approx 34\%$ ) составляет  $N(^{130}\text{Te}) \approx 1.58 \times 10^{27}$  шт. и в предыдущей главе была получена оценка скорости захвата солнечных нейтрино  $R_{Total} = 89.358$  SNU, где SNU – количество взаимодействий на  $10^{36}$  ядер мишени, то ожидаемое число событий в год от изотопа  $^{130}\text{Te}$  составит  $\approx 4.4$  событий в год. Аналогично для  $^{128}\text{Te}$   $\approx 1.8$  событий в год.

Необходимо отметить, что данная оценка получена без учета осцилляций нейтрино; в качестве грубой оценки можно принять, что их доучет снизит ожидаемое число событий примерно в 2 раза. Также нужно учесть что только часть событий от солнечных нейтрино попадет в область интереса эксперимента. Расчёты  $\beta$ -спектра показывает, что около 9.8% распадов  $^{130}\text{I}$  будут попадать в область интереса (ROI) при разрешении 2% по полной ширине на полувысоте (FWHM) [17]. Предположим что это верно и для  $^{128}\text{I}$ . Тогда оценка ожидаемого числа событий от захвата солнечных нейтрино ядрами  $^{128,130}\text{Te}$  в области интереса для 100-тонного сцинтилляционного детектора ББНТ составит  $\approx 0.3$  события в год.

Увеличение энергетического разрешения детекторов ББНТ позволит значительно снизить вклад фоновых событий в область интереса около энергии  $Q_{\beta\beta}$ . Для увеличения разрешения необходимо увеличить светосбор детекторов. Достижение максимального светосбора является одной из самых важных проблем для детекторов черенковского и сцинтилляционного излучения. Одним из путей решения является установка концентраторов света в виде конуса на фотокатод ФЭУ. Геометрия конуса выбирается исходя из формы фотокатода, диаметров входного и выходного отверстий, максимального угла с падения света  $\theta_{max}$  (по отношению к оси конуса) с которым он еще не будет переотражен назад. В работах Винстона [16] были представлены методы расчета геометрии конуса (конус Винстона) для максимизации

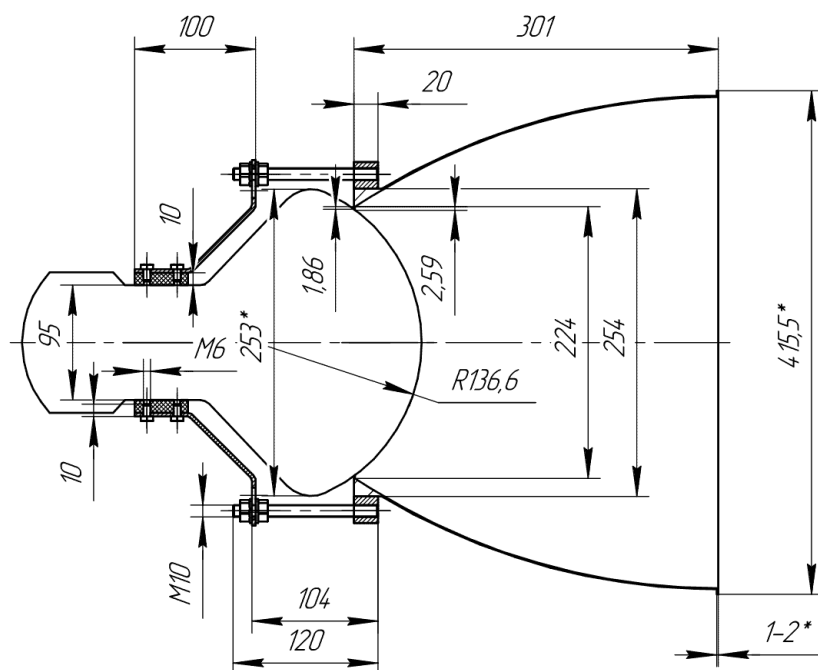


Рис. 4 — Сборочный чертеж оптического модуля 5-тонного прототипа ББНТ.



Рис. 5 — Изготовленный образец концентратора.

светосбора. Программная реализация “string method” была сделана автором на языке python3.

Концентратор изготавливается из нескольких слоев углеродного композита на который магнетронным способом наносится отражающий слой из серебра. На Рисунке 4 показан сборочный чертеж оптического модуля 5-тонного прототипа ББНТ – фотоумножитель R7801-100 WA-S70 с разработанным концентратором света. Производство концентратора света по оптимизированной форме было нами внедрено на предприятии ООО «Гидромания»,

Минск, Республика Беларусь. На Рисунке 5 показаны опытные образцы концентраторов света, изготовленные в ООО «Гидромания».

**В заключении** приводятся основные итоги работы:

1. Для изотопов  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  были обработаны опубликованные экспериментальные данные по реакциям перезарядки ( $p, n$ ) и ( $^3\text{He}, t$ ). Был сделан 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:  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  была построена экспериментальная силовая функция  $S(E)$ , характеризующая интенсивность переходов в конечном ядре в зависимости от энергии возбуждения.
2. Впервые для ядер  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  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 показано, 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  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  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 [17; 18]. Показано, что для некоторых изотопов, например  $^{71}\text{Ga}$ , доучет резонансной структуры в силовой функции не оказывает существенного влияния на итоговую скорость захвата. С другой стороны, для  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$  учет резонансной структуры значительно (до 2х раз для  $^{128}\text{Te}$ ) повышает итоговую скорость захвата  $R$ . Такое поведение

ние в первую очередь связано с порогом реакции захвата нейтрино, в зависимости от которого в  $R$  будут доминировать вклады либо от низкоэнергетичных  $\nu\nu$ -нейтрино (для  $^{71}\text{Ga}$ ), либо от высокоэнергетичных нейтрино от канала  $^8\text{B}$  ( $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$ ).

4. Исследовано влияние выбора варианта Ферми-функции на сечение и скорости захвата солнечных нейтрино ядром  $^{127}\text{I}$ . 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  $^{128}\text{Te}$  и  $^{130}\text{Te}$  сделана оценка числа событий от захвата нейтрино от Солнца этими же изотопами для 100-тонного сцинтилляционного детектора Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ) при концентрации природной смеси изотопов теллура в сцинтилляторе 1%:  $\approx 0.31$  события в год около значения  $Q_{\beta\beta} = 2527.51$  кэВ. Оценка на число событий  $0\nu\beta\beta$  распада  $^{130}\text{Te}$  при ожидаемой  $T_{1/2}^{0\nu}(^{130}\text{Te}) = 10^{27}$  дает значение  $\approx 1$  события в год. Хотя и для детектора такой массы данным фоновым процессом можно пренебречь, но 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 прототипа 5 т 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».

**В приложении А** даны численные значения рассчитанного профиля концентратора света.

Автор выражает глубочайшую благодарность и признательность научному руководителю Лубсандоржиеву Баярто Константиновичу, а также Лютостанскому Юрию Степановичу и Тихонову Виктору Николаевичу за постановку задач, внимательное отношение, интересные беседы, помощь и понимание на всех этапах работы.



## Публикации по теме диссертации

- (A1) Interaction of Solar Neutrinos with  $^{128}\text{Te}$  and  $^{128,130}\text{Te}$  / Yu. S. Lutostansky, A. N. Fazliakhmetov, B. K. Lubsandorzhiev, N. A. Belogortseva, G. A. Koroteev, A. Yu. Lutostansky, V. N. Tikhonov // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2024. – Т. 88, No 8. – С. 1223–1229. <https://doi.org/10.1134/S1062873824707347>
- (A2) Влияние функции Ферми на сечение захвата нейтрино / А. Н. Фазлиахметов, Ю. С. Лютостанский, Г. А. Коротеев, А. П. Осипенко, В. Н. Тихонов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2023. – Т. 54, No 3. – С. 668–675. <https://doi.org/10.1134/S1063779623030139> (англ. вер.)
- (A3) Structure of the Charge-Exchange Strength Function of Tellurium Isotopes 128 and 130 / A. N. Fazliakhmetov, Yu. S. Lutostansky, B. K. Lubsandorzhiev, G. A. Koroteev, A. Yu. Lutostansky, V. N. Tikhonov // Phys. Atom. Nucl. – 2023. – Т. 86, No 5. – С. 736–741. <https://doi.org/10.1134/S1063778823050162>
- (A4) Current status of the Baksan Large Neutrino Telescope / A.D. Lukanov, D.M. Voronin, A.N. Fazliakhmetov, E. P. Veretenkin, A. M. Gangapshev, V. N. Gavrin, T. V. Ibragimova, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, B. K. Lubsandorzhiev, Y. M. Malyshkin, D. A. Nanzanov, G. Y. Novikova, V. B. Petkov, A. Y. Sidorenkov, O. Y. Smirnov, N. A. Ushakov, A. A. Shikhin, E. A Yanovich // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 87 (2023) 7 929-934. <https://doi.org/10.3103/S1062873823702805>
- (A5) New prospects for iodine detector and Solar neutrinos registration / Yu. S. Lutostansky, A. N. Fazliakhmetov, G. A. Koroteev, N. V. Klochkova, A. Y. Lutostansky, A. P. Osipenko, V. N. Tikhonov // Physics Letters B. – 2022. – Т. 826. – С. 136905. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.136905>.
- (A6) Light concentrators for large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory / A. N. Fazliakhmetov, V. N. Gavrin, T. V. Ibragimova, B. K. Lubsandorzhiev, A. D. Lukanov, Yu. M. Malyshkin, A. Y. Sidorenkov, A. A. Shikhin, O. Y. Smirnov, N. A. Ushakov, E. P.

- Veretenkin, D. M. Voronin // PoS. – 2021. – Т. ICRC2021. – С. 1097. <https://doi.org/10.22323/1.395.1097>
- (A7) Влияние высоколежащих резонансов на сечения захвата солнечных нейтрино ядром  $^{127}\text{I}$  / Ю. С. Лютостанский, Г. А. Коротеев, Н. В. Ключкова, А. П. Осипенко, В. Н. Тихонов, А. Н. Фазлиахметов // Ядерная физика. – 2020. – Т. 83, № 3. – С. 208–216. <https://doi.org/10.31857/S004400272002018X>
- (A8) Взаимодействие нейтрино с системой Ga–Ge и ядерные резонансы / Г. А. Коротеев, Н. В. Ключкова, Ю. С. Лютостанский, А. П. Осипенко, В. Н. Тихонов, А. Н. Фазлиахметов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 8. – С. 1090–1093. <https://doi.org/10.31857/S0367676520080190>
- (A9) Сечение захвата солнечных нейтрино ядром  $^{76}\text{Ge}$  / А. К. Выбров, Л. В. Инжечик, Ю. С. Лютостанский, Г. А. Коротеев, В. Н. Тихонов, А. Н. Фазлиахметов, // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т. 83, № 4. – С. 534–538. <https://doi.org/10.1134/S0044002719050131>
- (A10) Solar neutrino capture by  $^{128}$ ,  $^{130}\text{Te}$  isotopes and Baksan Large Neutrino Telescope Project / A. N. Fazliakhmetov, Yu. S. Lutostansky, B. K. Lubsandorzhiev, G. A. Koroteev, V. N. Tikhonov // <https://arxiv.org/abs/2407.10357>

## Список литературы

1. *Мигдал А. Б.* Теория конечных ферми систем и свойства атомных ядер. — М.: Наука, 1983.
2. *Davis R.* Solar Neutrinos. II. Experimental // *Phys. Rev. Lett.* — 1964. — Март. — Т. 12, вып. 11. — С. 303–305. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.12.303>.
3. Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III. Results for the 2002–2007 data-taking period / J. N. Abdurashitov [и др.] // *Phys. Rev. C.* — 2009. — Июль. — Т. 80, вып. 1. — С. 015807. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.80.015807>.
4. Reanalysis of the Gallex solar neutrino flux and source experiments / F. Kaether [и др.] // *Physics Letters B.* — 2010. — Т. 685, № 1. — С. 47–54. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269310000729>.
5. Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment / S. Andringa [и др.] // *Advances in High Energy Physics.* — 2016. — Янв. — Т. 2016. — С. 6194250. — URL: <https://doi.org/10.1155/2016/6194250>.
6. *Cattadori C. M., Salamida F.* GERDA and LEGEND: Probing the Neutrino Nature and Mass at 100 meV and beyond // *Universe.* — 2021. — Т. 7, № 9. — URL: <https://www.mdpi.com/2218-1997/7/9/314>.
7. CUPID: The Next-Generation Neutrinoless Double Beta Decay Experiment / K. Alfonso [и др.] // *Journal of Low Temperature Physics.* — 2022. — Ноябрь. — Т. 211.
8. Search for New Physics in Electronic Recoil Data from XENONnT / E. Aprile [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2022. — Окт. — Т. 129, вып. 16. — С. 161805. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.129.161805>.
9. Measurement of Electron-Neutrino Charged-Current Cross Sections on  $^{127}\text{I}$  with the COHERENT NaI $\nu$ E Detector / P. An [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2023. — Ноябрь. — Т. 131, вып. 22. — С. 221801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.131.221801>.

10. Measurement of  $^{nat}\text{Pb}(\nu_e, Xn)$  production with a stopped-pion neutrino source / P. An [и др.] // Phys. Rev. D. — 2023. — Окт. — Т. 108, вып. 7. — С. 072001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.108.072001>.
11. *Billard J., Figueroa-Feliciano E., Strigari L.* Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments // Phys. Rev. D. — 2014. — Янв. — Т. 89, вып. 2. — С. 023524. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.89.023524>.
12. *Elliott S. R., Engel J.* Double-beta decay // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 2004. — Т. 30, № 9. — R183—R215. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/30/9/R01>.
13. New large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory: Detector prototype / N. Ushakov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Февр. — Т. 1787. — С. 012037.
14. Fragmentation and splitting of Gamow-Teller resonances in  $\text{Sn}(^3\text{He}, t)\text{Sb}$  charge-exchange reactions,  $A=112-124$  / K. Pham [и др.] // Phys. Rev. C. — 1995. — Февр. — Т. 51, вып. 2. — С. 526—540. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.51.526>.
15. *Bahcall J. N., Serenelli A. M., Basu S.* New Solar Opacities, Abundances, Helioseismology, and Neutrino Fluxes // The Astrophysical Journal. — 2005. — Т. 621, № 1. — С. L85—L88. — URL: <https://doi.org/10.1086/428929>.
16. *Winston R., Miñano J. C., Benítez P.* Nonimaging Optics. — Burlington : Academic Press, 2005. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012759751550004X>.
17. *Ejiri H., Elliott S. R.* Charged current neutrino cross section for solar neutrinos, and background to  $\beta\beta(0\nu)$  experiments // Phys. Rev. C. — 2014. — Май. — Т. 89, вып. 5. — С. 055501. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.89.055501>.

18. *Ejiri H., Elliott S. R.* Solar neutrino interactions with the double- $\beta$  decay nuclei  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ , and  $^{150}\text{Nd}$  // Phys. Rev. C. — 2017. — Май. — Т. 95, вып. 5. — С. 055501. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.95.055501>.
19. *Ejiri H.* Nuclear spin isospin responses for low-energy neutrinos // Physics Reports. — 2000. — Т. 338, № 3. — С. 265—351. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157300000442>.
20. Determination of the Weak Axial Vector Coupling  $\lambda=g_A/g_V$  from a Measurement of the  $\beta$ -Asymmetry Parameter  $A$  in Neutron Beta Decay / D. Mund [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Апр. — Т. 110, вып. 17. — С. 172502. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.172502>.
21. *Lutostansky Y. S., Shul'gina N. B.* Strength function of  $^{127}\text{Xe}$  and iodine-xenon neutrino detector // Phys. Rev. Lett. — 1991. — Т. 67, вып. 4. — С. 430—432. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.67.430>.
22. Precision evaluation of the  $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)$  solar neutrino capture rate from the  $(^3\text{He}, t)$  charge-exchange reaction / D. Frekers [и др.] // Phys. Rev. C. — 2015. — Март. — Т. 91, вып. 3. — С. 034608. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.91.034608>.
23. *Fermi E.* An attempt of a theory of beta radiation. 1. // Z. Phys. — 1934. — Т. 88. — С. 161—177.
24. High precision analytical description of the allowed  $\beta$  spectrum shape / L. Hayen [и др.] // Rev. Mod. Phys. — 2018. — Т. 90, вып. 1. — С. 015008. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.90.015008>.
25. *Behrens H., Jänecke J.* Numerical Tables for Beta-Decay and Electron Capture / Numerische Tabellen für Beta-Zerfall und Elektronen-Einfang. Т. 4 / под ред. H. Schopper. — Springer, 1969. — (Landolt-Boernstein - Group I Elementary Particles, Nuclei and Atoms). — URL: <https://doi.org/10.1007/b19939>.

26. *Dzhelepov B. S., Zyrianova L. N.* Influence of atomic electric fields on beta decay. — Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1956.
27. *Suslov Y. P.* // Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. — 1968. — Т. 32, вып. 2. — С. 213.
28. *Wilkinson D.* Evaluation of beta-decay: II. Finite mass and size effects // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1990. — Т. 290, № 2. — С. 509—515. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029090570V>.
29. Measurement of Gamow-Teller strength for  $^{127}\text{I}$  as a solar neutrino detector / M. Palarczyk, J. Rapaport, C. Hautala [и др.] // Phys. Rev. C. — 1999. — Т. 59, вып. 1. — С. 500—509. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.59.500>.
30. New Capabilities of an Iodine Detector for Solar Neutrinos / Y. S. Lutostansky [и др.] // JETP Lett. — 2020. — Т. 111, № 11. — С. 603—607.
31. The  $(^3\text{He}, t)$  reaction on  $^{76}\text{Ge}$ , and the double- $\beta$ -decay matrix element / J. H. Thies [и др.] // Phys. Rev. C. — 2012. — Июль. — Т. 86, вып. 1. — С. 014304. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.86.014304>.

Научное издание

Фазлиахметов Алмаз Наилович

Исследование взаимодействия нейтрино  
с ядрами  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{128,130}\text{Te}$

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 26.12.2024

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 009/25 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

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