

## ГАЛЛИЕВАЯ АНОМАЛИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ BEST-2 С ИСТОЧНИКОМ $^{58}\text{Co}$

*В. Н. Гаврин*<sup>1</sup>, *В. В. Горбачёв*<sup>1,\*</sup>, *Т. В. Ибрагимова*<sup>1</sup>,  
*В. А. Матвеев*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Калибровочные эксперименты с искусственными источниками нейтрино  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$  в галлиевых солнечных нейтринных экспериментах SAGE и GALLEX показали скорость захвата нейтрино существенно меньшую, чем ожидалось. Этот результат, известный как галлиевая аномалия, был позже подтвержден на уровне значимости более  $4\sigma$  в эксперименте BEST на уникальной научной установке «Галлий-германиевый нейтринный телескоп» (УНУ ГГНТ) с источником  $^{51}\text{Cr}$ . Для детального исследования галлиевой аномалии предлагается эксперимент BEST-2 на галлиевой мишени с искусственным источником  $^{58}\text{Co}$ .

Calibration experiments with artificial neutrino sources  $^{51}\text{Cr}$  and  $^{37}\text{Ar}$  in the gallium solar neutrino experiments SAGE and GALLEX showed a neutrino capture rate significantly lower than expected. This result, known as the gallium anomaly, was later confirmed at a significance level of more than  $4\sigma$  in the BEST experiment on the UNU GGNT with a  $^{51}\text{Cr}$  source. For a detailed study of the gallium anomaly, the BEST-2 experiment on a gallium target with an artificial source of  $^{58}\text{Co}$  is proposed.

PACS: 14.60.Pq; 14.60.St; 13.15.+g

### 1. ГАЛЛИЕВАЯ АНОМАЛИЯ

В четырех калибровочных галлиевых экспериментах с солнечными нейтрино SAGE [1, 2] и GALLEX [3, 4] были получены низкие относительно ожидаемых скорости захвата нейтрино от искусственных источников. Калибровочные эксперименты проводились с почти монохроматическими источниками  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$ , излучающими нейтрино с энергиями около 750 и 814 кэВ соответственно. Ожидаемые скорости захвата нейтрино в галлиевых мишенях определялись по известным сечениям захвата нейтрино таких энергий с учетом геометрии измерений, плотности мишеней и активности источников. Суммарный результат четырех экспериментов составил  $R = v_{\text{измер}}/v_{\text{ожд}} = 0,87 \pm 0,05$ , на  $2,6\sigma$  (стандартных отклонения) меньше единицы [5]. Этот результат получил название «галлиевая аномалия» [6].

---

\* E-mail: vvgor\_gfb1@mail.ru

Проведенный в 2019 г. эксперимент BEST [7, 8] подтвердил галлиевую аномалию на уровне значимости  $4\sigma$ .

## 2. СХЕМА Ga-ИЗМЕРЕНИЙ

Детектирование нейтрино в галлиевых экспериментах происходит по реакции захвата электронных нейтрино на ядрах атомов  $^{71}\text{Ga}$ :  $^{71}_{31}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}_{32}\text{Ge} + e^-$ . Цикл измерений включает в себя облучение галлиевой мишени нейтрино от Солнца или от искусственного источника, извлечение образующихся атомов  $^{71}\text{Ge}$  из мишени и счет распадов этих атомов в пропорциональных счетчиках. Длительность облучения мишени солнечными нейтрино составляет 1 мес, а в измерениях с источниками — от 9 сут. Процедура извлечения атомов  $^{71}\text{Ge}$  и подготовка мишени к следующему циклу облучений занимает примерно одни сутки. Извлеченный  $^{71}\text{Ge}$  переводится в газообразную форму  $\text{GeH}_4$  (моногерман) и помещается в газовый пропорциональный счетчик. В счетчике регистрируются распады  $^{71}\text{Ge}$  в стабильный  $^{71}\text{Ga}$  (энергия распадов до 10,4 кэВ,  $T_{1/2} = 11,43$  сут). Счет распадов продолжается в течение 5 мес, чтобы определить количество распадов при постоянном фоне счетчика.

Суммарная эффективность детектирования образовавшегося в галлиевой мишени от нейтринного захвата  $^{71}\text{Ge}$ , с учетом всех процедур, составляет  $\varepsilon \approx 0,5$ .

## 3. СКОРОСТИ ЗАХВАТА НЕЙТРИНО НА Ga

Статистика в галлиевых нейтринных экспериментах довольно мала: в 50 т галлиевой мишени происходит всего 1 захват нейтрино от Солнца в сутки; от источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$  активностью 0,5 МКв в 13 т металлического галлия происходит примерно 14 захватов нейтрино в сутки, а в эксперименте BEST, с 48-тонной мишенью из металлического галлия, происходило около 130 захватов в сутки. Такие скорости захвата в 100–1000 раз меньше скоростей счета нейтринных детекторов, которые устанавливаются вблизи ядерных реакторов или на коротких расстояниях от ускорителей. Тем не менее эксперименты с галлиевыми детекторами оказываются очень эффективными благодаря нескольким особенностям. Первой особенностью является способ регистрации нейтрино — захват электронного нейтрино на ядре, явление чистого заряженного тока. Поскольку галлиевые детекторы расположены на большой глубине в толще горы, фоновая скорость счета таких детекторов, связанная с космическими лучами, практически полностью подавлена в отличие от экспериментов с ядерными реакторами и ускорителями, в которых данные измерений оказываются крайне чувствительны к фонам. Другой особенностью галлиевых экспериментов (это относится уже к экспериментам с искусственными источниками нейтрино) является монохроматичность источников. Анализ данных галлиевых измерений не

содержит анализа ошибок измерения энергии нейтринного взаимодействия — энергия нейтрино известна всегда с высокой точностью. При этом активность нейтринного источника также может быть определена с высокой точностью (порядка 1%) по измерениям тепловыделения источника или другими способами. Измерения активности могут проводиться многократно в течение цикла измерений, и все процессы распада элементов в источнике хорошо известны.

#### 4. ОБЪЯСНЕНИЕ ГАЛЛИЕВОЙ АНОМАЛИИ

Рассматривалось несколько возможностей объяснения галлиевой аномалии [5]: 1) статистическая флуктуация, 2) систематика экспериментов, 3) завышенное сечение захвата нейтрино галлием, 4) новая физика. Все эти возможности тщательно анализировались.

1) Вероятность статистической флуктуации после эксперимента BEST ничтожна, меньше четырех стандартных отклонений. Ни в одном из галлиевых экспериментов с источниками результат измерений не превышал единицы. Соответственно, для того чтобы принять в качестве объяснения галлиевой аномалии гипотезу о статистической флуктуации, необходимо ожидать в следующем эксперименте результат захвата нейтрино на уровне  $R \sim 1,2$ , что на  $8\sigma$  отличается от нынешнего результата. Вероятность такого события практически нулевая, поэтому статистическая флуктуация исключается.

2) Систематика экспериментов была исследована посредством проверки эффективностей каждой процедуры измерений. Проверки проводились независимо в экспериментах SAGE, BEST и GALLEX. Все проверки показали полное согласие результатов с полученными данными.

3) Для оценок ожидаемых скоростей захвата нейтрино от источников в галлиевых мишенях были использованы значения сечений, рассчитанные Дж. Бакалом на основе данных  $(p, n)$  реакций на  $^{71}\text{Ga}$ , полученных на ускорителе LANL [9]. Перед проведением эксперимента BEST были измерены сечения  $(^3\text{He}, ^3\text{H})$  реакций на  $^{71}\text{Ga}$  на ускорителе RCNP (Осака, Япония) [10]. Были получены даже более высокие значения сечений захвата на возбужденные уровни  $^{71}\text{Ge}$ , чем в работах Дж. Бакала, что делает галлиевую аномалию еще более выраженной.

После эксперимента BEST появилось несколько статей разных авторов с оценками сечений захвата нейтрино от источников на галлии [11–14]. Все оценки дают очень близкие ожидаемые скорости захвата. Таким образом, объяснить галлиевую аномалию плохим знанием сечения захвата нейтрино невозможно.

4) Наиболее разумное объяснение галлиевой аномалии связано с новой физикой. Предпочтительной гипотезой на сегодня является гипотеза короткобазовых осцилляций, для которой требуется четвертое собственное массовое состояние нейтрино, соответствующее стерильному ароматному состоянию. Помимо галлиевой аномалии гипотеза стерильных

нейтрино используется для объяснения других аномальных результатов в ускорительных экспериментах LSND [15] и MiniBooNE [16] и реакторных антинейтринных экспериментах на коротких базах [17–19]. Исследования стерильных осцилляций проводились в последнее время в нескольких экспериментах с реакторами [20–22]. Полученные в них результаты противоречат друг другу, что указывает, видимо, на проблемную систематику в этих экспериментах.

В простейшем варианте гипотезы осцилляций с одним стерильным нейтрино скорости счета в детекторах изменяются с расстоянием в соответствии с вероятностью выживания:  $P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \times \sin^2((1,27\Delta m^2 L)/E)$ . Величины  $L$  и  $E$  — это расстояние [м], которое проходит нейтрино от рождения до взаимодействия, и энергия нейтрино [МэВ]. В галлиевых экспериментах для определения скоростей захвата вероятность выживания усредняется по всем расстояниям  $L$  внутри галлиевой мишени. Параметры осцилляций ( $\Delta m^2$ ,  $\sin^2 2\theta$ ) являются сегодня предметом поиска всех короткобазовых нейтринных экспериментов.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТ BEST

В 2019 г. на галлиевой мишени УНУ ГГНТ был выполнен эксперимент BEST [7, 8], целью которого было пролить свет на природу галлиевой аномалии. Эксперимент BEST имел три существенных отличия от предыдущих галлиевых экспериментов с источниками.

Во-первых, галлиевая мишень была разделена на две независимых зоны, которые находились на разных расстояниях от источника. Разделением мишени на две независимых зоны вводилась чувствительность эксперимента к расстоянию  $L$ . Источник помещался внутрь трубы, подвешенной к общему центру обеих зон мишени. Внутренняя зона имела внешнюю оболочку в форме сферы, внешняя — в форме цилиндра. Галлий в виде жидкого металла (температура плавления  $29,8^\circ\text{C}$ ) распределялся внутри обеих зон. Средние пробеги нейтрино в галлиевых мишенях обеих зон были примерно равными.

Во-вторых, в эксперименте использовался источник  $^{51}\text{Cr}$  с активностью 3,4 МКи, в 7 раз больше, чем в предыдущих экспериментах. Это позволило увеличить статистику измеряемых событий, при которой статистическая ошибка уменьшилась до уровня систематической ошибки.

В-третьих, масса галлия в двух зонах мишени составила 48 т. В предыдущих экспериментах с источниками в SAGE масса галлиевой мишени составляла 13,1 т, в 3,7 раза меньше. Увеличение массы мишени также дает увеличение статистики событий.

На рис. 1 приведены ожидаемые скорости захвата нейтрино в зависимости от параметра разности квадратов масс  $\Delta m^2$  для фиксированного значения параметра амплитуды осцилляций  $\sin^2 2\theta = 0,3$ . Значения ожидаемых скоростей нормированы на величину скорости, ожидаемой

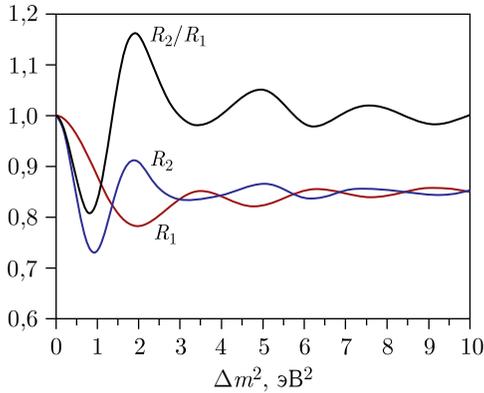


Рис. 1. Зависимости скоростей счета в двух зонах галлиевой мишени ( $R_1$  — внутренняя,  $R_2$  — внешняя) в эксперименте BEST от значения параметра осцилляций  $\Delta m^2$ . Скорости приведены относительно их значений в отсутствие осцилляций. Значение параметра  $\sin^2 2\theta$  принято равным 0,30. Приведена также зависимость отношения скоростей захвата в двух зонах мишени

в отсутствие осцилляций. В диапазонах, где параметр  $\Delta m^2$  принимает значения  $\sim 1$  и  $2$  эВ<sup>2</sup>, скорости счета в зонах заметно различаются, и, если бы была найдена заметная разница между скоростями счета в двух зонах, можно было бы в эксперименте уверенно определить значения параметра  $\Delta m^2$ . Однако полученные в измерениях скорости счета в двух зонах оказались равны в пределах ошибки, поэтому допустимые значения параметра  $\Delta m^2$  имеют ограничения только со стороны малых значений ( $\Delta m^2 > 0,5$  эВ<sup>2</sup>). При этом полученные по результатам всех галлиевых экспериментов значения параметра амплитуды осцилляций  $\sin^2 2\theta$  на уровне значимости 95% ( $2\sigma$ ) ограничены в пределах от 0,20 до 0,55.

Скорость захвата нейтрино от источников, найденная по результатам всех галлиевых измерений после эксперимента BEST, составляет  $R = 0,80 \pm 0,05$ .

## 6. ЭКСПЕРИМЕНТ BEST-2

Для подробного исследования галлиевой аномалии в БНО ИЯИ РАН разработан эксперимент BEST-2 [23, 24], который эффективен для проверки гипотезы стерильных осцилляций, а также для определения зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино. В эксперименте BEST-2 можно не только подтвердить гипотезу осцилляций, но и определить параметры осцилляций.

BEST-2 является естественным продолжением эксперимента BEST и будет проводиться на том же оборудовании. В новом эксперименте будет два существенных изменения.

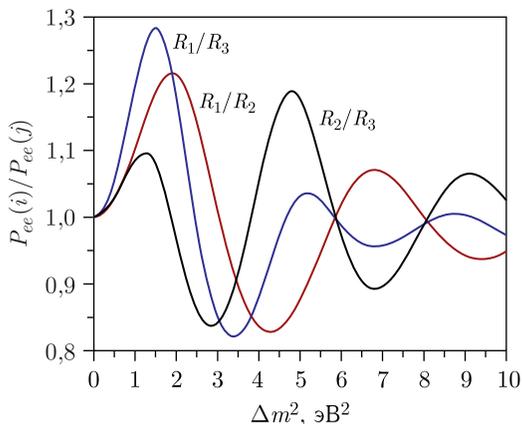


Рис. 2. Зависимости отношений скоростей счета в разных зонах трехзонной галлиевой мишени в эксперименте BEST-2 от значения параметра осцилляций  $\Delta m^2$ . Скорости считаются относительно их значений в отсутствие осцилляций. Значение параметра  $\sin^2 2\theta$  принято равным 0,30. Номера зон приведены по возрастанию от центра мишени

Во-первых, в эксперименте BEST-2 будет использоваться источник нейтрино  $^{58}\text{Co}$ , энергия нейтрино от которого в два раза выше, чем энергия от источника  $^{51}\text{Cr}$ . Увеличение энергии нейтрино пропорционально расширяет чувствительность эксперимента к определению параметра  $\Delta m^2$ .

Во-вторых, галлиевая мишень будет разделена на три независимых зоны. Для этого предполагается в двухзонной установке BEST внешнюю, цилиндрическую зону разделить на две части. Средние длины пробегов нейтрино от источника в полученных двух зонах будут равными, и в каждой из этих зон длины пробегов будут равны примерно половине величины среднего пробега в первой шаровой зоне мишени. В трех зонах мишени ожидаемые скорости захвата нейтрино ведут себя по-разному в зависимости от параметра осцилляций  $\Delta m^2$ , что дает возможность однозначно определить этот параметр в достаточно большой области параметров. На рис. 2 приведены зависимости отношений ожидаемых скоростей захвата в трех зонах мишени от параметра  $\Delta m^2$ .

## 7. ИСТОЧНИК НЕЙТРИНО $^{58}\text{Co}$

Источник  $^{58}\text{Co}$  имеет период полураспада 70,85 сут и распадается через электронный захват в стабильный изотоп  $^{58}\text{Fe}$ . В распадах образуются нейтрино с энергией 1497 кэВ (98,8%) с небольшой примесью нейтрино с энергией 633 кэВ (1,2%). Сечение захвата нейтрино таких энергий на галлии в 4,4 раза выше, чем для нейтрино от  $^{51}\text{Cr}$ .

Оценка активности источника проводилась при условии равенства статистики в экспериментах BEST и BEST-2. В зонах мишени BEST было зарегистрировано примерно по 700 событий. С учетом эффективностей регистрации и галлиевой аномалии (уменьшения количества захватов на  $\sim 20\%$  относительно ожидаемого значения) активность источника  $^{58}\text{Co}$  в эксперименте BEST-2 должна составлять около 400 кКи.

Источник  $^{58}\text{Co}$  может быть наработан в реакторе на быстрых нейтронах по реакции  $^{58}_{27}\text{Ni}(n, p)^{58}_{28}\text{Co}$ . Сечение реакции для типичных ядерных реакторов составляет около  $\sigma = 0,144$  б.

Необходимые потоки быстрых нейтронов можно получить в реакторах БОР-60 в НИИАР ( $3,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и БН-600 ( $2,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Источник активностью 400 кКи можно получить, облучая 15 кг природного никеля в потоке быстрых нейтронов  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 70 сут. Содержание  $^{58}\text{Ni}$  в природном никеле составляет 68,27%. Плотность никеля  $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$ , поэтому объем активной части источника составит  $\sim 1,7$  л, примерно в 3 раза больше, чем хромового источника в эксперименте BEST.

## 8. ОБЛАСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ПОИСКУ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BEST-2

В галлиевых экспериментах с источниками амплитуда осцилляций  $\sin^2 2\theta$  определяется по скорости счета событий в мишени в целом относительно ожидаемой скорости счета в отсутствие осцилляций. Поэтому измерение данного параметра зависит только от статистики событий. В новом эксперименте статистика будет примерно соответствовать статистике BEST, поэтому ошибка измерения амплитуды улучшится не более чем в  $\sqrt{2} = 1,4$  раза, что соответствует удвоению статистики. При этом неважно, какой источник используется в облучениях и на сколько зон разделена мишень.

Второй параметр  $\Delta m^2$ , характеризующий частоту осцилляций, в осцилляционных экспериментах определить оказывается сложной задачей. И эксперимент BEST-2 направлен на определение этого параметра в области значений  $\Delta m^2$  от 0,5 до примерно 8 эВ<sup>2</sup>. На рис.3 приведена область чувствительности эксперимента BEST-2 к определению параметра  $\Delta m^2$ . Области чувствительности построены с учетом разницы в ожидаемых скоростях счета в разных зонах мишени и ошибок в их определении. Уровень  $1\sigma$  на рисунке соответствует примерно 7%-й ошибке определения скорости счета в одной зоне. Область чувствительности, в которой параметры осцилляций можно определить на уровне значимости  $3\sigma$ , где  $\sigma$  — стандартное отклонение именно параметра осцилляций, ограничена на рисунке линией, обозначенной  $2\sigma$  (здесь  $\sigma$  — это стандартное отклонение, определяющее разницу между ожидаемыми значениями скоростей счета в зонах мишени). На рисунке обозначены наиболее вероятные значения (best fit point, BFP), полученные в галлиевых измерениях:

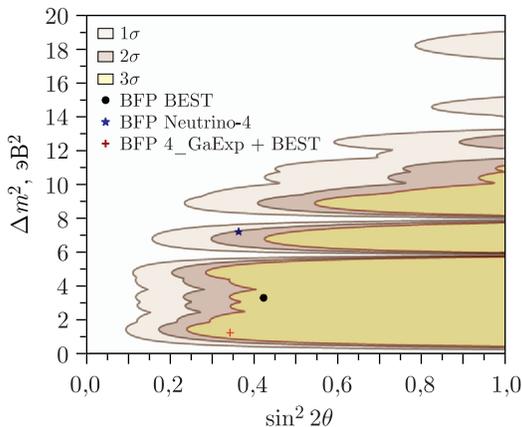


Рис. 3. Области чувствительности эксперимента BEST-2 к определению параметра  $\Delta m^2$ . Показаны значения BFP, полученные в экспериментах: BEST, суммарно по всем галлиевым экспериментам, включая BEST, а также в эксперименте «Нейтрино-4»

1) BEST, 2) BEST + SAGE + GALLEX. Оба значения находятся в области уверенного определения параметров. Звездочкой на рисунке обозначено значение BFP, полученное в эксперименте «Нейтрино-4». Это значение находится на границе области чувствительности нового эксперимента. Поэтому такое значение может быть подтверждено при известной степени везения.

## 9. ВОЗМОЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ BEST-2 С ИСТОЧНИКОМ $^{58}\text{Co}$

Результаты, которые можно ожидать в эксперименте BEST-2, рассмотрим, исходя из значений двух параметров. Первый параметр — это суммарная (средневзвешенная) скорость счета, полученная по всем зонам мишени  $R_0$ . Второй параметр — максимальная разница между скоростями счета в разных зонах мишени  $\Delta R$ . Суммарную скорость  $R_0$  сравниваем со скоростью счета всех предыдущих галлиевых экспериментов с источниками  $R = 0,80 \pm 0,05$ .

В зависимости от значений этих двух параметров можно ожидать три возможных варианта результата эксперимента.

Первый вариант — если  $R_0 \approx R$ , т.е. полученная скорость счета в BEST-2 в пределах ошибки совпадает со скоростью предыдущих галлиевых экспериментов с источниками, а  $\Delta R < 2\sigma$ , наблюдается значительная (не менее  $2\sigma$ ) разница в скоростях счета в разных зонах мишени. Это будет означать, что галлиевая аномалия связана со стерильными осцилляциями и параметры этих осцилляций будут определены в эксперименте BEST-2.

Второй вариант — если  $R_0 \approx R$ , но  $\Delta R < 2\sigma$ , т. е. разница в измеренных скоростях счета в разных зонах мишени несущественна. Это будет означать, что стерильные осцилляции остаются возможным решением проблемы галлиевой аномалии, а галлиевая аномалия будет подтверждена на более высоком статистическом уровне значимости.

Третий вариант —  $R_0 \neq R$ , т. е. измеренная скорость счета в BEST-2 будет заметно отличаться от скоростей счета в предыдущих галлиевых экспериментах. При этом разница в скоростях счета в разных зонах мишени может быть любой. В этом случае будет определена зависимость галлиевой аномалии от энергии нейтрино, что означает, что причиной галлиевой аномалии являются не стерильные осцилляции и для ее объяснения необходимо искать другие причины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Галлиевая аномалия может быть указанием на проявление новой физики. Наиболее вероятным объяснением галлиевой аномалии сегодня считаются осцилляционные переходы нейтрино в стерильные состояния. Новый эксперимент BEST-2 с галлиевой мишенью, разделенной на три независимых зоны, с монокроматическим источником нейтрино  $^{58}\text{Co}$  активностью 400 кКи позволит решить проблему галлиевой аномалии. При этом, если галлиевая аномалия связана с осцилляциями в стерильные состояния, то эксперимент имеет шанс определить значения параметров осцилляций — как амплитуду  $\sin^2 2\theta$ , так и частоту  $\Delta m^2$ .

В эксперименте будет также исследован вопрос о зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино. Если такая зависимость будет наблюдаена и превысит ошибки измерений, то это будет означать, что стерильные осцилляции не являются основной причиной галлиевой аномалии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 1999. V. 59. P. 2246.*
2. *Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. P. 045805.*
3. *Hampel W. et al. (GALLEX Collab.) // Phys. Lett. B. 1998. V. 420. P. 114.*
4. *Kaether F. et al. (GALLEX Collab.) // Phys. Lett. B. 2010. V. 685. P. 47.*
5. *Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 015807.*
6. *Giunti C., Laveder M. // Mod. Phys. Lett. A. 2007. V. 22. P. 2499.*
7. *Barinov V. V. et al. (BEST Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. P. 232501.*
8. *Barinov V. V. et al. (BEST Collab.) // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 065502.*
9. *Bahcall J. N. // Phys. Rev. C. 1997. V. 56. P. 3391.*
10. *Frekers D. et al. // Phys. Lett. B. 2011. V. 706. P. 134.*
11. *Elliott S. R., Gavrín V. N., Haxton W. C., Ibragimova T. V., Rule E. J. // Phys. Rev. C. 2023. V. 108, No. 3. P. 035502.*
12. *Semenov S. V. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83, No. 11. P. 1549–1552.*

13. *Kostensalo J., Suhonen J., Giunti C., Srivastava P.* // Phys. Lett. B. 2019. V. 795. P. 542–547.
14. *Barinov V., Cleveland B., Gavrin V., Gorbunov D., Ibragimova T.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 073001.
15. *Aguilar A. et al. (LSND Collab.)* // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. P. 112007.
16. *Aguilar-Arevalo A.A. et al. (MiniBooNE Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. P. 181801.
17. *Mueller T.A. et al.* // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. P. 054615.
18. *Mention G. et al.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 073006.
19. *Adamson P. et al. (Daya Bay and MINOS Collabs.)* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 151801.
20. *Almazán H. et al. (STEREO Collab.)* // Nature. 2023. V. 613. P. 257.
21. *Serebrov A.P., Samoïlov R.M., Ivochkin V.G. et al.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 104. P. 032003.
22. *Danilov M., Skrobova N.* arXiv:2112.13413. 2022.
23. *Gorbachev V.V., Gavrin V.N., Ibragimova T.V.* // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86, No. 6. P. 1385–1388.
24. *Gorbachev V.V. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1390. P. 012053.