

# SeSOX: ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО НА КОРОТКОЙ БАЗЕ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА VOREXINO

*М. Б. Громов* \* от имени коллаборации *Vorexino/SOX*

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

## **Коллаборация Vorexino/SOX:**

*М. Громов*<sup>1</sup>, *М. Агостини*<sup>2,3</sup>, *К. Алтенмюллер*<sup>4</sup>, *С. Аннел*<sup>4</sup>, *В. Атрощенко*<sup>5</sup>,  
*З. Багдасарян*<sup>6</sup>, *Д. Базилико*<sup>7</sup>, *Дж. Беллини*<sup>7</sup>, *Ж. Бензигер*<sup>8</sup>, *Д. Бик*<sup>9</sup>,  
*Дж. Бонфини*<sup>3</sup>, *Д. Браво*<sup>7,10</sup>, *Б. Каччанига*<sup>7</sup>, *Ф. Калапрайс*<sup>11</sup>, *А. Камината*<sup>12</sup>,  
*С. Каприоли*<sup>7</sup>, *М. Карлини*<sup>3</sup>, *П. Кавалканте*<sup>3,10</sup>, *А. Чепурнов*<sup>1</sup>, *К. Цой*<sup>13</sup>,  
*О. Клоуе*<sup>14</sup>, *Л. Коллика*<sup>7</sup>, *М. Крибье*<sup>14</sup>, *Д. Д'Анджело*<sup>7</sup>, *С. Давини*<sup>12</sup>,  
*А. Дербин*<sup>15</sup>, *С. Дин*<sup>2,3</sup>, *А. Ди Лудовико*<sup>11</sup>, *Л. Ди Ното*<sup>12</sup>, *И. Драчнев*<sup>2,3,15</sup>,  
*М. Дуреро*<sup>14</sup>, *С. Фаринон*<sup>12</sup>, *В. Фишер*<sup>14</sup>, *К. Фоменко*<sup>16</sup>, *А. Формозов*<sup>7,16</sup>,  
*Д. Франко*<sup>17</sup>, *Ф. Габриэль*<sup>3</sup>, *Дж. Гаффиот*<sup>14</sup>, *К. Галбьяти*<sup>11</sup>, *М. Гшвендер*<sup>18</sup>,  
*К. Гьяно*<sup>12</sup>, *М. Джаммарки*<sup>7</sup>, *А. Горетти*<sup>11</sup>, *Д. Гуффанти*<sup>2,3</sup>, *К. Хагнер*<sup>9</sup>,  
*Т. Уди*<sup>17</sup>, *Э. Хунгерфорд*<sup>19</sup>, *Альдо Янни*<sup>3,20</sup>, *Андреа Янни*<sup>11</sup>, *Н. Жонкьер*<sup>21</sup>,  
*А. Жани*<sup>22</sup>, *Д. Йешке*<sup>4</sup>, *В. Кобычев*<sup>23</sup>, *Д. Кораблев*<sup>16</sup>, *Дж. Корга*<sup>19</sup>,  
*В. Корноухов*<sup>24</sup>, *Д. Крин*<sup>17</sup>, *Т. Лахенмайер*<sup>18</sup>, *Т. Лассер*<sup>14</sup>, *М. Лаубенштейн*<sup>3</sup>,  
*Е. Литвинович*<sup>5,24</sup>, *Ф. Ломбарди*<sup>3,25</sup>, *П. Ломбарди*<sup>7</sup>, *Л. Людхова*<sup>6,26</sup>,  
*Г. Лукьянченко*<sup>5</sup>, *Л. Лукьянченко*<sup>5</sup>, *И. Мачулин*<sup>5,24</sup>, *Дж. Мануцио*<sup>12</sup>,  
*С. Маркоччи*<sup>2,3,12</sup>, *Дж. Маричич*<sup>13</sup>, *Дж. Меншен*<sup>14</sup>, *Дж. Мартин*<sup>27</sup>,  
*Э. Мерони*<sup>7</sup>, *М. Мейер*<sup>28</sup>, *Л. Мирамонти*<sup>7</sup>, *М. Мишашек*<sup>22</sup>, *В. Муратова*<sup>15</sup>,  
*Р. Музенич*<sup>12</sup>, *Б. Ноймайр*<sup>4</sup>, *Л. Оберауер*<sup>4</sup>, *Б. Опич*<sup>9</sup>, *В. Орехов*<sup>5</sup>,  
*Ф. Ортика*<sup>29</sup>, *М. Паллавичини*<sup>12</sup>, *Л. Папп*<sup>4</sup>, *О. Пенек*<sup>6,26</sup>, *Н. Пилпенко*<sup>15</sup>,  
*А. Покар*<sup>30</sup>, *А. Порчелли*<sup>27</sup>, *Дж. Рануччи*<sup>7</sup>, *А. Разето*<sup>3</sup>, *А. Ре*<sup>7</sup>, *М. Редчук*<sup>6,26</sup>,  
*А. Романи*<sup>29</sup>, *Р. Роса*<sup>3,17</sup>, *Н. Росси*<sup>3</sup>, *С. Роттенангер*<sup>18</sup>, *С. Шонет*<sup>4</sup>,  
*Л. Скола*<sup>14</sup>, *Д. Семенов*<sup>15</sup>, *М. Скорохватов*<sup>5,24</sup>, *О. Смирнов*<sup>16</sup>,  
*А. Сотников*<sup>16</sup>, *Л. Ф. Ф. Стокс*<sup>3</sup>, *Ю. Суворов*<sup>5,31</sup>, *Р. Тарталья*<sup>3</sup>,  
*Дж. Тестера*<sup>12</sup>, *Дж. Турн*<sup>28</sup>, *М. Торопова*<sup>5</sup>, *А. Трантел*<sup>18</sup>, *Е. Унжаков*<sup>15</sup>,  
*С. Висьер*<sup>14</sup>, *А. Вишнёва*<sup>16</sup>, *М. Вивье*<sup>14</sup>, *Р.Б. Вогелар*<sup>10</sup>, *Ф. фон Фейлитч*<sup>4</sup>,

---

\*E-mail: gromov@physics.msu.ru

*Н. Ван*<sup>31</sup>, *С. Вейнз*<sup>27</sup>, *М. Войчик*<sup>22</sup>, *М. Вурм*<sup>27</sup>, *З. Йокли*<sup>10</sup>,  
*О. Займидорога*<sup>16</sup>, *С. Заватарелли*<sup>12</sup>, *К. Зубер*<sup>28</sup>, *Г. Зузел*<sup>22</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup> Научный институт Гран-Сассо Национального института ядерной физики, Л'Акуила, Италия

<sup>3</sup> Национальная лаборатория Гран-Сассо Национального института ядерной физики, Ассерджи, Италия

<sup>4</sup> Мюнхенский технический университет, Гархинг, Германия

<sup>5</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

<sup>6</sup> Институт ядерной физики Юлихского исследовательского центра, Юлих, Германия

<sup>7</sup> Миланский государственный университет и Национальный институт ядерной физики, Милан, Италия

<sup>8</sup> Факультет химической инженерии Принстонского университета, Принстон, США

<sup>9</sup> Институт экспериментальной физики Гамбургского университета, Гамбург, Германия

<sup>10</sup> Политехнический университет Виргинии и Университет штата, Блэксбург, США

<sup>11</sup> Физический факультет Принстонского университета, Принстон, США

<sup>12</sup> Университет Генуи, Генуя, Италия

<sup>13</sup> Гавайский университет, Гонолулу, США

<sup>14</sup> Институт исследований фундаментальных законов Вселенной Центра ядерных исследований в Сакле Комиссариата по атомной энергетике и альтернативным видам энергии, Жиф-сюр-Иветт, Франция

<sup>15</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

<sup>16</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>17</sup> Университет Париж VII им. Д. Дидро, НЦНИ Франции, Комиссариат по атомной энергетике и альтернативным видам энергии, Парижская обсерватория, Париж

<sup>18</sup> Центр астрофизических исследований им. И. Кеплера Тюбингенского университета, Тюбинген, Германия

<sup>19</sup> Хьюстонский университет, Хьюстон, США

<sup>20</sup> Подземная лаборатория Канфранк, Paseo de los Ayerbe S/N, Канфранк, Испания

<sup>21</sup> Центр ядерных исследований в Сакле Комиссариата по атомной энергетике и альтернативным видам энергии, Жиф-сюр-Иветт, Франция

<sup>22</sup> Институт физики им. М. Смолуховского Ягеллонского университета, Краков, Польша

<sup>23</sup> Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

<sup>24</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>25</sup> Калифорнийский университет, Сан-Диего, США

<sup>26</sup> Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена, Ахен, Германия

<sup>27</sup> Институт физики Майнцского университета им. И. Гутенберга, Майнц, Германия

<sup>28</sup> Дрезденский технический университет, Дрезден, Германия

<sup>29</sup> Университет Перуджи и Национальный институт ядерной физики, Перуджа, Италия

<sup>30</sup> Амхерстский Центр фундаментальных взаимодействий и Массачусетский университет, Амхерст, США

<sup>31</sup> Калифорнийский университет, Лос-Анджелес, США

Несколько экспериментальных аномалий в нейтринной физике указывают на возможное существование одного или более дополнительных типов нейтрино, не взаимодействующих слабым образом и поэтому называемых стерильными. Проверке этой гипотезы посвящена третья фаза эксперимента Vorexino (SOX). В рамках ее первого этапа (CeSOX) будет измеряться скорость счета антинейтринных событий в жидком

сцинтилляционном детекторе от искусственного источника  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$ , помещенного в специальную шахту под установкой. Меньший по сравнению с исходным поток антинейтрино будет свидетельствовать о наличии осцилляций в стерильные состояния. В данной статье представлен обзор эксперимента CeSOX, включающий в себя общее описание, характеристики радиоактивного источника и специфику его использования, описание методики анализа данных и ожидаемые результаты. В зависимости от значимости полученных научных данных будет принято решение о проведении второго этапа эксперимента SOX с применением источника электронных нейтрино  $^{51}\text{Cr}$ .

Several experimental anomalies in neutrino physics may be pointing to possible existence of one or more additional neutrino species that do not interact weakly, and the so-called sterile. The third phase of the Borexino experiment (SOX) is devoted to verification of this hypothesis. Within the first stage (CeSOX) one will measure the count rate of antineutrino events in the liquid scintillation detector from an artificial source of  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$  placed in the special pit beneath the setup. The smaller antineutrino flux with respect to the original one would indicate the presence of oscillations into sterile states. This article provides an overview of the CeSOX experiment, including a general description, a characterization of the radioactive source and the specifics of its use, a description of the method of data analysis and the expected results. Depending on the significance of the obtained scientific information the decision on carrying out the second stage of the SOX experiment with a  $^{51}\text{Cr}$  source of electron neutrinos might be accepted.

PACS 2010: 14.60.St.; 14.60.Lm; 12.60.-i; 29.40.Mc

## ВВЕДЕНИЕ

Ряд расширений Стандартной модели в физике элементарных частиц допускают существование одного или более синглетных состояний нейтрино. Их называют стерильными, так как они не участвуют в слабом взаимодействии, поскольку не имеют связи с  $W$ - и  $Z$ -бозонами. Тем не менее стерильные нейтрино могут смешиваться с обычными активными нейтрино. В зависимости от массы стерильные нейтрино могут играть важную роль в космологических процессах и астрофизических явлениях. Однако при массах в интервале от 1 эВ до 1 кэВ такое влияние минимально (см., например, [1]). Стерильные нейтрино с массой  $\sim 1$  эВ могли повлиять на формирование наблюдаемой анизотропии реликтового излучения, а также обеспечить вклад в массу скоплений галактик, изменяя их структуру. Дополнительное внимание к таким легким стерильным нейтрино вызвано возможностью объяснить с их помощью ряд наблюдаемых экспериментальных аномалий, а именно ускорительную, галлиевую и реакторную.

Ускорительная аномалия была обнаружена в эксперименте LSND, проводившемся с 1993 по 1998 г. В пучке  $\bar{\nu}_\mu$  с энергиями 20,0–52,8 МэВ на расстоянии 30 м от источника регистрировался избыток  $\bar{\nu}_e$ . Явление было зафиксировано с достоверностью  $\approx 3,8\sigma$  [2–5]. С помощью традиционного описания осцилляций и смешивания с разностями квадратов масс  $\Delta m_{\text{солн}}^2 \simeq 7,5 \cdot 10^{-5}$  эВ<sup>2</sup> и  $\Delta m_{\text{атм}}^2 \simeq 2,5 \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> [6], полученными из

солнечных и атмосферных осцилляционных экспериментов соответственно, объяснить данный избыток не получается. Разность квадратов масс должна быть значительно больше — в диапазоне 0,2–10 эВ<sup>2</sup> [5].

Два схожих с LSND эксперимента дали противоположные друг другу результаты. В эксперименте KARMEN [7] был выполнен поиск тех же осцилляций  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  при подобных энергиях мюонных антинейтрино 16,8–50,8 МэВ, но на пролетной базе 17,7 м, которая примерно вдвое меньше, чем в LSND. Подтверждения аномалии или хотя бы указания на нее найдено не было. В другом же эксперименте — MiniBooNE — были найдены избыточные сигналы с уровнями достоверности  $2,8\sigma$  и  $3,4\sigma$ , соответствующими осцилляциям  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  и  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  [8,9]. В этом эксперименте использовались иные энергии нейтрино  $E_\nu$ , лежащие в диапазоне от 200 до 1250 МэВ, и другая пролетная база  $L$ , равная 541 м. Тем не менее важное для наблюдения осцилляций отношение  $L/E_\nu$  было таким же, как в LSND и KARMEN:  $L/E_\nu \sim 1$  м/МэВ.

Галлиевая аномалия обнаружена при анализе данных калибровочных кампаний с нейтринными источниками  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$  в солнечных радиохимических экспериментах SAGE и GALLEX [10–15]. Регистрировался дефицит в скорости счета  $\nu_e$ . В обзорном докладе [16] сообщается, что полученное из совместного анализа данных отношение измеренной скорости счета нейтрино к ожидаемой равно  $\bar{R} = 0,84 \pm 0,05$ , а уровень достоверности приведенного результата составляет  $\approx 2,9\sigma$ .

Реакторная аномалия заключается в наблюдении недостатка электронных антинейтрино от АЭС при измерениях на короткой базе, т. е. на расстоянии от источника  $L \approx 10$ –100 м. Этот вопрос рассмотрен в статье [17]. С учетом новых расчетов реакторных спектров [18, 19] в докладе [16] приведено усредненное по всем экспериментам отношение измеренной скорости счета антинейтрино к рассчитанной:  $\bar{R} = 0,934 \pm 0,024$ . Уровень достоверности составляет  $\approx 2,8\sigma$ . Однако результаты эксперимента Daya Bay, опубликованные весной 2017 г. [20], ставят на повестку дня вопрос о пересмотре данных по реакторной аномалии.

При масштабе масс стерильных нейтрино порядка единицы и гипотезе о существовании только одного их типа (модель  $3 + 1$ ) механизм смешивания формализуется стандартным образом. Добавляются дополнительное массовое состояние  $\nu_4$  и соответствующее флейворное  $\nu_s$ . В итоге наблюдаются новые виды осцилляций на короткой базе, для которых вероятности сохранения текущего состояния или перехода в иное задаются следующими выражениями [21]:

$$P(\nu_\alpha \longrightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta_{\alpha\alpha} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right), \quad (1)$$

$$P(\nu_\alpha \longrightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right), \quad \alpha \neq \beta, \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta = e, \mu, \tau, s$  и

$$\sin^2 2\theta_{\alpha\alpha} = 4|U_{\alpha 4}|^2(1 - |U_{\alpha 4}|^2), \quad (3)$$

$$\sin^2 2\theta_{\alpha\beta} = 4|U_{\alpha 4}|^2|U_{\beta 4}|^2. \quad (4)$$

## ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА CeSOX

Конфигурация экспериментов с короткой базой для проверки гипотезы существования стерильных нейтрино может быть разной. Например, возможны следующие варианты:

- 1) подвижный источник и неподвижный детектор;
- 2) подвижный детектор и неподвижный источник;
- 3) несколько детекторов (или детектор с несколькими сегментами) и неподвижный источник;
- 4) координатно-чувствительный детектор большого объема с источником вне или внутри.

В случае эксперимента Borexino [22], в рамках его третьей фазы, названной SOX (от англ. **S**hort-distance **O**scillations with **B**ore**X**ino), используется четвертая конфигурация [23, 24]. При этом дополнительную информацию о существовании стерильных нейтрино можно извлечь из наблюдений за изменением формы спектра в зависимости от расстояния до источника. Точность восстановления координаты в детекторе Borexino составляет  $\sim 10 \text{ см}/\sqrt{E(\text{МэВ})}$ , а разрешение по энергии  $5\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$  при световых ходе  $\sim 500 \text{ ф. э.}/\text{МэВ}$ .

Искусственный источник антинейтрино церий–празеодим  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$  с активностью  $(3,7-5,5) \cdot 10^{15} \text{ Бк}$  (100–150 кКи) будет размещен под детектором в специальной шахте с рельсами, как показано на рис. 1. Третья фаза эксперимента Borexino рассчитана на 1,5 года измерений, что позволит набрать статистику в  $\sim 10^4$  событий в доверительном объеме мишени массой  $\sim 240 \text{ т}$ .

Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного  $\beta$ -распада (ОБР)

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+. \quad (5)$$

Она характеризуется четкой сигнатурой из двух разделенных во времени и пространстве событий. Благодаря этому факту можно применять метод запаздывающих совпадений для отделения сигнала от фона. Первое событие традиционно называется мгновенным и представляет собой аннигиляцию позитрона с электроном среды:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma. \quad (6)$$

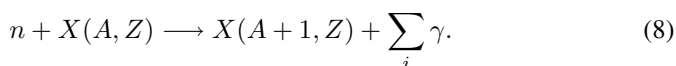
Видимая энергия  $E_{\text{МГН}}$  при условии пренебрежения отдачей нейтрона равна

$$E_{\text{МГН}} = E_{\bar{\nu}_e} - 0,789 \text{ МэВ}. \quad (7)$$



Рис. 1. Устройство детектора Vorexino и расположение источника  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$

Второе событие называется запаздывающим. Оно представляет собой захват термализованного нейтрона с последующим испусканием  $\gamma$ -квантов:



В связи с составом сцинтиллятора детектора Vorexino доминирует реакция на водороде  $^1\text{H}$ , имеющая место в более чем 99 % случаев. При этом испускается только один  $\gamma$ -квант с энергией 2,22 МэВ. Задержка между мгновенным и запаздывающим событиями определяется средним временем захвата нейтрона водородом  $^1\text{H}$  и составляет  $(258,7 \pm 0,8(\text{стат.}) \pm 2,0(\text{сист.}))$  мкс [25].

Недостатком реакции обратного  $\beta$ -распада является наличие пороговой энергии

$$E_{\text{пор}} = 1,806 \text{ МэВ}. \quad (9)$$

Как видно из рис. 2, невозможно регистрировать таким способом антинейтрино от церия  $^{144}\text{Ce}$ . В итоговый спектр дадут вклады только два канала  $\beta$ -распада празеодима  $^{144}\text{Pr}$ : неуникальный запрещенный переход первого порядка  $0^- \rightarrow 0^+$  (97,9 %) с максимальной энергией  $\beta$ -спектра 2996 кэВ и уникальный запрещенный переход первого порядка  $0^- \rightarrow 2^+$  (1,0 %) с максимальной энергией 2301 кэВ.

Относительно высокая пороговая энергия реакции ОБР повлияла на выбор источника. Для измерений было необходимо, чтобы период полураспада был больше 1 мес. Но при энергии  $\beta$ -распада  $Q \sim 1-3$  МэВ период полураспада  $T_{1/2}$  имеет характерный интервал значений от часов до долей секунды. В связи с этим был выбран двухкомпонентный источник, состоящий

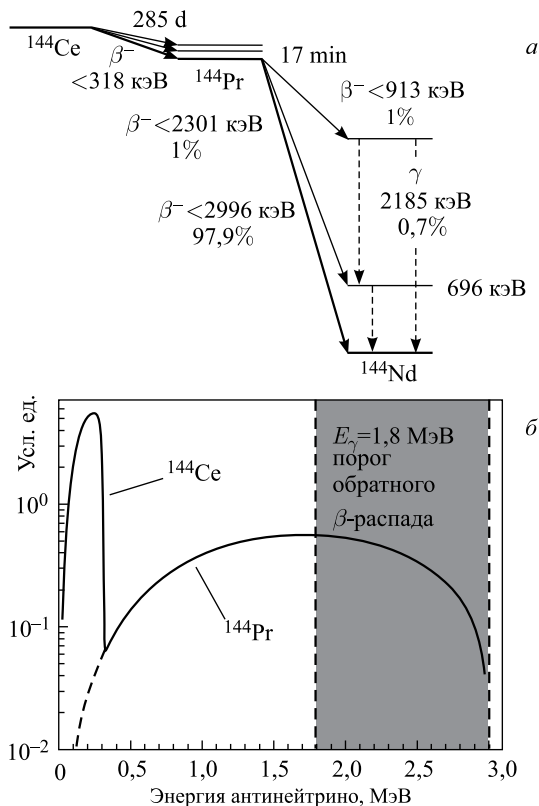


Рис. 2. а) Схема распада  $^{144}\text{Ce}$  и  $^{144}\text{Pr}$ . б) Спектр электронных антинейтрино от источника  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$

из долгоживущего нуклида с малой энергией  $\beta$ -распада ( $^{144}\text{Ce}$ ,  $Q = 318$  кэВ,  $T_{1/2} = 285$  сут) и дочернего короткоживущего нуклида с высокой энергией  $\beta$ -распада ( $^{144}\text{Pr}$ ,  $Q_1 = 2996$  кэВ,  $Q_2 = 2301$  кэВ,  $T_{1/2} = 17,3$  мин).

Стоит отметить, что детектор Bogerino является низкофоновым и располагается далеко от ядерных реакторов (в Италии нет АЭС, среднее расстояние до АЭС составляет 1170 км). Опираясь на данные геонейтринного анализа [26], можно утверждать, что при измерениях с источником  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$  фон будет составлять  $\sim 15$  событий/год.

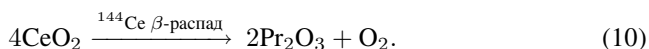
### ПОЛУЧЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА ИСТОЧНИКА $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$

Изотоп церия  $^{144}\text{Ce}$  получают выделением из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), специально отобранного для этой цели. Содержание изотопа в нем зависит от типа реактора, вида топлива, глубины его выгорания, дли-

тельности выдержки ОЯТ в пристанционном бассейне, продолжительности транспортировки и времени, затраченного на переработку. Отчасти данный вопрос рассматривается в статье [27]. В результате сложной процедуры выделения получается не чистый церий, а его оксид  $\text{CeO}_2$ . Он производится в виде порошка, который может быть спрессован нужным образом.

Чтобы обеспечить активность  $\sim 100\text{--}150$  кКи, необходимо от 1,2 до 4,0 кг  $\text{CeO}_2$ . Подобное количество возможно наработать только на одном предприятии в мире — производственном объединении «Маяк», которое располагается в г. Озерске Челябинской обл. России. Контракт на производство источника с этим предприятием был подписан в декабре 2016 г. Согласно этому договору источник антинейтрин  $^{144}\text{Ce}\text{--}^{144}\text{Pr}$  должен быть готов в марте 2018 г.

$^{144}\text{Ce}\text{--}^{144}\text{Pr}$  поставляется в цилиндрической капсуле из нержавеющей стали высотой 17 см. Внутри капсулы имеется медная секционная вставка, в которой помещается оксид церия, спрессованный в диски. В медной вставке предусмотрено свободное пространство, так как при распаде церия его оксид претерпевает превращение в оксид празеодима с выделением кислорода:



В результате компьютерного моделирования процесса увеличения количества кислорода в капсуле со временем было установлено, что давление не превысит 5 бар. Капсула, которая была спроектирована под источник, рассчитана на давление 6 бар. Также в ее конструкции было учтено значительное тепловыделение радиоактивного препарата, приводящее к температуре внутри капсулы примерно  $500^\circ\text{C}$ . Помещение оксида церия в капсулу происходит в атмосфере аргона, чтобы избежать нежелательного гидролиза.

Транспортировка источника с активностью  $\sim 100\text{--}150$  кКи с Южного Урала в центральную часть Италии является сложной организационной задачей, к тому же потенциально опасной для людей, которые осуществляют данную транспортировку. Кроме  $\beta$ -излучения источник  $^{144}\text{Ce}\text{--}^{144}\text{Pr}$  испускает  $\gamma$ -кванты из-за присутствующих примесей нейтронов. Хотя фон от  $\gamma$ -квантов с энергией больше 1 МэВ значительно меньше, чем, например, у подобного источника стронция–иттрия  $^{90}\text{Sr}\text{--}^{90}\text{Y}$ , требуется специальный защитный контейнер для перевозки  $^{144}\text{Ce}\text{--}^{144}\text{Pr}$ . Такой контейнер был разработан. Он состоит из двух частей — цилиндрический внутренний из вольфрамового сплава и внешней стандартной типа TN MTR, используемой для перевозки ядерного топлива. Их массы равны 2,24 и 24 т соответственно. Внутренний контейнер имеет толщину стенок 19 см, что обеспечивает подавление в  $10^{12}$  раз  $\gamma$ -излучения с энергией 2185 кэВ, которое возникает при  $\beta$ -распаде  $^{144}\text{Pr}$ . Температура внешней поверхности вольфрамового контейнера с источником внутри составляет  $85^\circ\text{C}$  при температуре окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ . Такая



температура позволяет безопасно перевозить источник в контейнере TN MTR без дополнительного охлаждения в течение 1 мес. Внутренний контейнер уже изготовлен китайской компанией Xiamen Ltd. и передан коллаборации Borexino.

Маршрут доставки  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$  до места проведения эксперимента был адаптирован под минимальное пересечение государственных границ. С Южного Урала источник доставляется поездом до Санкт-Петербурга, отсюда на корабле во Францию, а затем на грузовой машине в Италию — в Национальную лабораторию Гран-Сассо, где будет проводиться эксперимент. Транспортировка займет около трех недель, что приведет к потере  $\sim 5\%$  от начальной активности.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОЖИДАЕМАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика измерений построена на анализе трехмерного осциллометрического профиля, который в случае наличия стерильных нейтрино будет иметь характерную форму, приведенную на рис. 3. Обработка результатов измере-

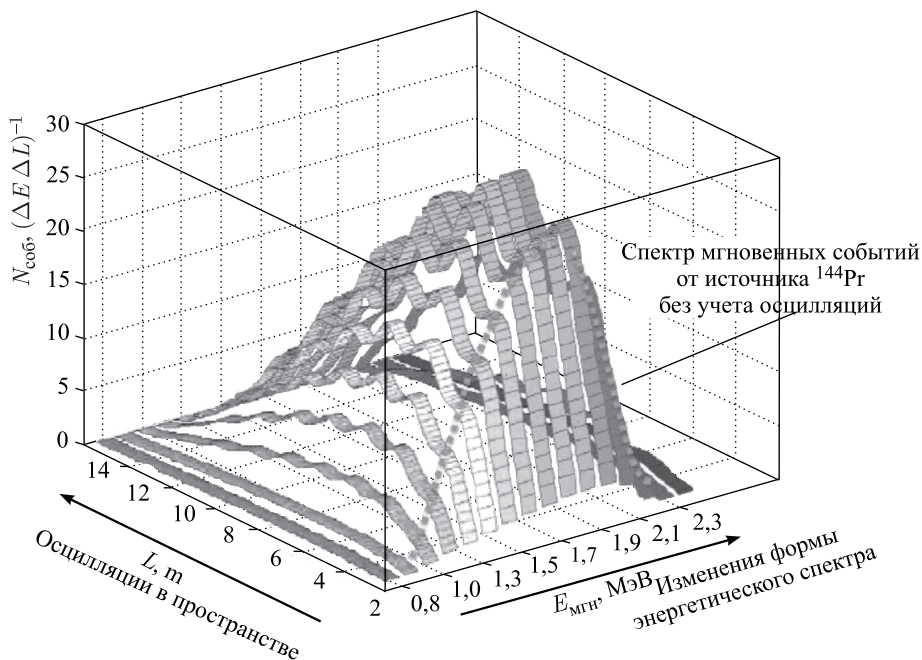


Рис. 3. Характерный осциллометрический 3D-профиль, полученный в результате моделирования методом Монте-Карло

ний включает два аспекта. С одной стороны, учитывается изменение скорости счета в зависимости от расстояния  $L$  между источником и местом регистрации антинейтрино в детекторе. С другой стороны, принимается во внимание искажение формы энергетического спектра. Второй аспект вносит существенный вклад, когда  $0,5 < \Delta m_{41}^2 < 5,0 \text{ эВ}^2$ .

Результаты измерений могут быть представлены и в виде двухмерного осциллометрического профиля в случае рассмотрения скорости счета как функции отношения  $L/E_\nu$ . На рис. 4 приведены несколько таких профилей, полученных в результате моделирования методом Монте-Карло для трех характерных наборов параметров смешивания. Экспериментальные данные аппроксимируются методом максимального правдоподобия. Ожидаемая чув-

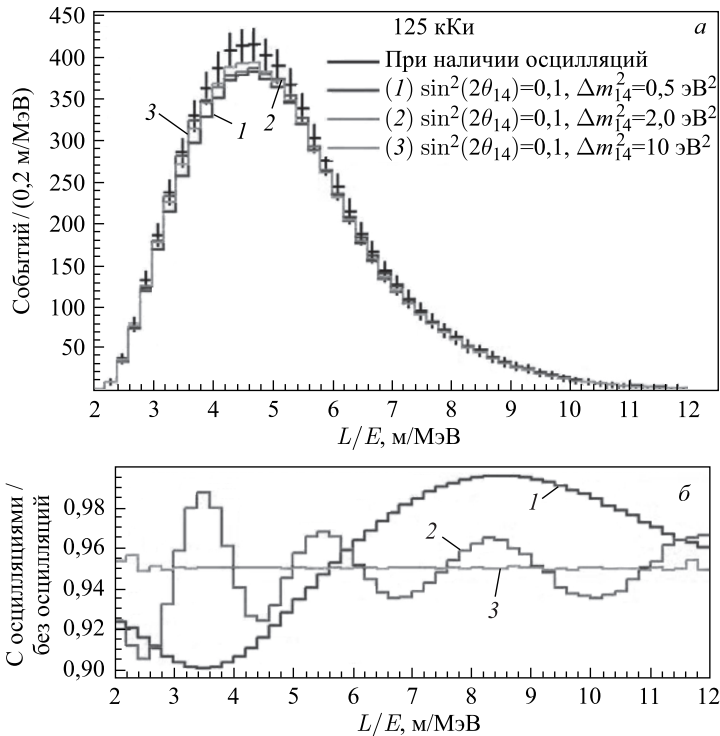


Рис. 4. а) Ожидаемая скорость счета антинейтринных событий в детекторе в зависимости от отношения  $L/E$  для трех характерных наборов параметров смешивания, а также для случая отсутствия осцилляций в стерильное состояние. б) Отношение скоростей счета событий, фиксируемых при наличии и при отсутствии осцилляций, как функция отношения  $L/E$ . Кривые приведены для тех же трех характерных наборов параметров смешивания. Видно появление четкого 2D осциллометрического профиля при определенных значениях параметров

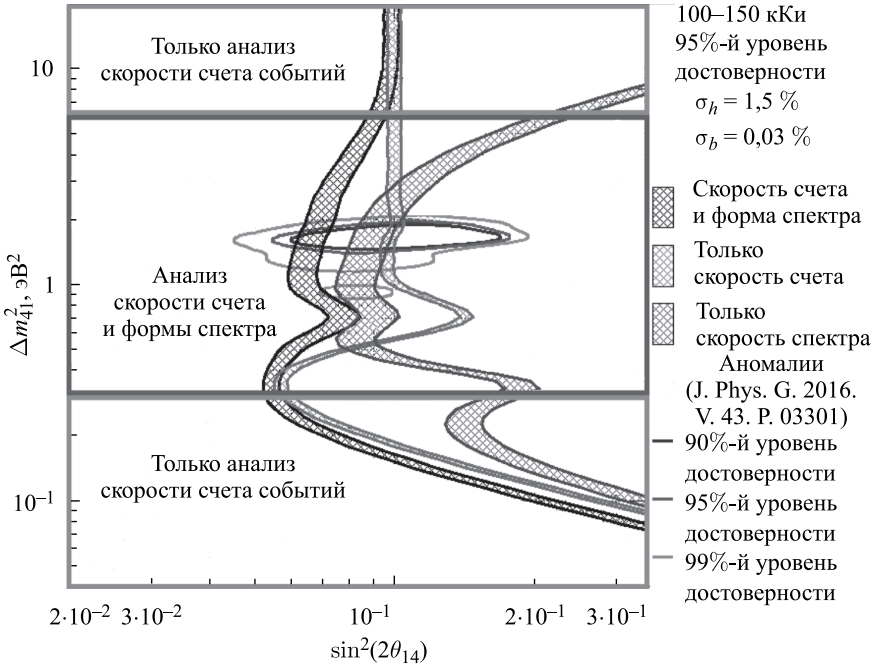


Рис. 5. Ожидаемая чувствительность эксперимента SOX к параметрам осцилляций для стерильных нейтрино в модели  $3 + 1$ . Результаты приведены для случая полной погрешности нормированной скорости счета 1,5% (включает систематические погрешности при определении тепловой мощности калориметром и при восстановлении формы внутренней нейлоновой сферы) и абсолютной погрешности фактора  $b$  формы спектра антинейтрино 0,03. Аномалии заимствованы из статьи [28]

ствительность представлена на рис. 5. Заштрихованная область показывает изменение чувствительности в зависимости от активности источника, варьируемой в интервале 100–150 кКи.

Выполняемые в рамках CeSOX измерения можно назвать прецизионными. Результат аппроксимации в значительной степени зависит от точного знания характеристик используемого источника антинейтрино. Эта зависимость проявляет себя при вычислении ожидаемой скорости счета событий в детекторе  $N(E_\nu, L, t)$ :

$$N(E_\nu, L, t) \sim A(t) S_\nu(E_\nu, b) \sim \frac{P(t)}{\langle E(b) \rangle} S_\nu(E_\nu, b), \quad (11)$$

где  $A(t)$  — активность источника  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$ ;  $S_\nu(E_\nu, b)$  — форма спектра;  $P(t)$  — тепловая мощность;  $\langle E(b) \rangle$  — средняя энергия на один распад. Фактор  $b$  входит в поправку  $C(Z, W)$  к форме спектра антинейтрино, возникаю-

шую в результате  $\beta$ -распада. Поправка  $C(Z, W)$  появляется из-за конечного размера ядра и, как следствие, неточного распределения слабого гиперзаряда.  $C(Z, W) \equiv 1 + a \cdot W + b/W + c \cdot W^2$ , где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — параметры;  $Z$  — заряд ядра;  $W = E_e/m_e + 1$  — полная энергия  $\beta$ -частицы в единицах массы электрона. Зависимость чувствительности эксперимента CeSOX от точности определения характеристик источника антинейтрино  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$  показана на рис. 6.

Точный теоретический расчет формы  $\beta$ -спектра с учетом коррекций для обоих каналов распада не представляется возможным без знания параметров поправок. Их извлекают из эксперимента. Однако существующие данные расходятся в пределах 10 %, что недопустимо для исследований в рамках CeSOX. Над уточнением формы спектра  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$  в коллаборации Vorexino/SOX работают пять групп из разных институтов. Задача состоит в достижении абсолютной погрешности измерения параметра  $b$ , меньшей 0,03.

Измерение тепловой мощности будет выполнено с помощью двух специально созданных калориметров сразу после доставки источника в Национальную лабораторию Гран-Сассо. Оба калориметра имеют в качестве теплоносителя воду, но отличаются устройствами. В одном, разработанном во Франции, источник в защитном контейнере из вольфрамового сплава помещается непосредственно в воду, которая полностью его окружает. В другом, сделанном в Германии, вода циркулирует в медном теплообменнике, заключающем внутри себя источник в защитном контейнере. От внешней среды теплообменник изолируется в обоих случаях вакуумной рубашкой и особой теплоизоляционной фольгой. Мощность измеряется исходя из следующей формулы:

$$P = \int_{T_{\text{вх}}}^{T_{\text{вых}}} c(T, \rho) \dot{m} dT + P_{\text{потерь}}, \quad (12)$$

где  $\dot{m}$  — расход теплоносителя (воды) в единицу времени;  $c(T, \rho)$  — удельная теплоемкость теплоносителя (воды), зависящая от температуры и плотности;  $T_{\text{вх}}$  и  $T_{\text{вых}}$  — входная и выходная температуры теплоносителя;  $P_{\text{потерь}}$  — мощность тепловых потерь, обусловленная теплопроводностью креплений и контактов между теплообменником и внешними стенками вакуумной рубашки, конвекцией остаточного газа, тепловым излучением. В полную погрешность измерений, кроме тепловых потерь, входят другие систематические погрешности, а именно неточное знание формы  $\beta$ -спектра и погрешности приборов. Калориметры уже готовы к использованию и доставлены к месту проведения эксперимента. Предварительные их испытания показали, что возможно достигнуть заданной точности определения тепловой мощности 1 % и даже меньшего значения.

Есть еще несколько факторов, влияющих на конечный результат: точность восстановления координат события, погрешность определения энергии,

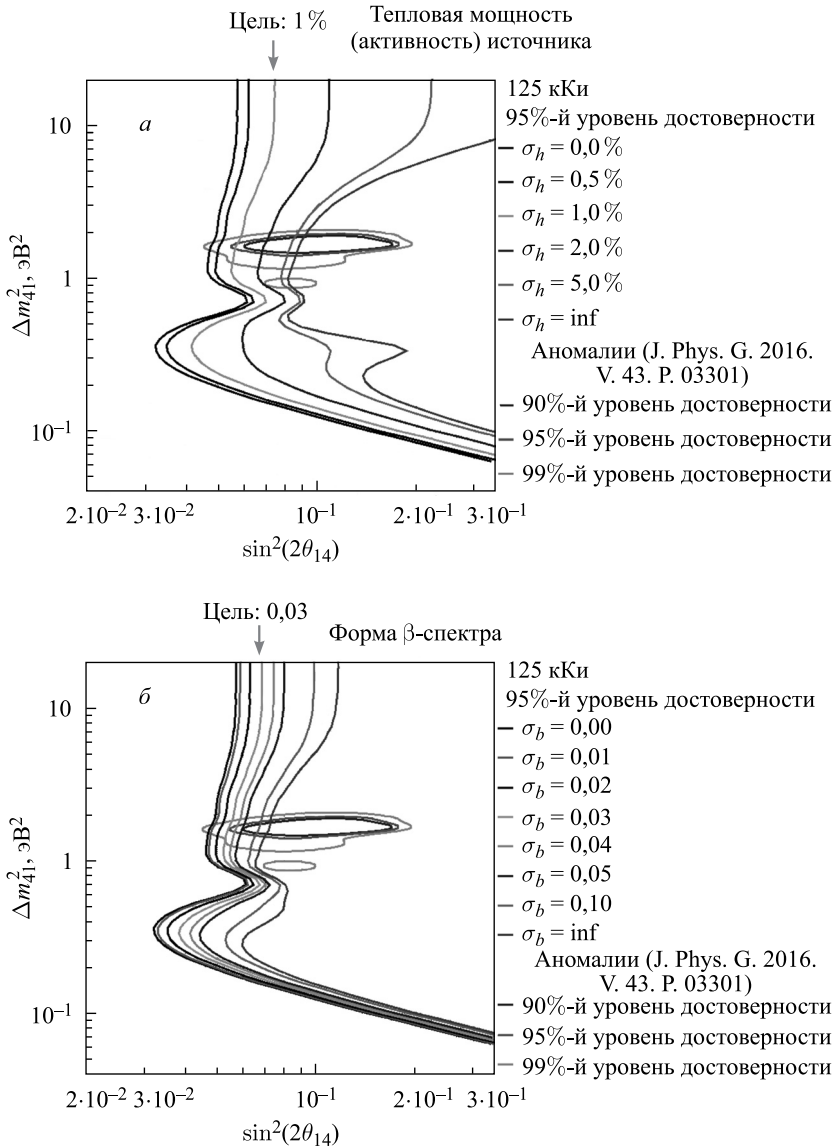


Рис. 6. а) Влияние погрешности calorиметрических измерений на чувствительность эксперимента. б) Влияние на чувствительность эксперимента погрешности в форме антинейтринного спектра при  $\beta^-$ -распаде  $^{144}\text{Pг}$  по основному каналу. Приведенные кривые соответствуют 95%-му уровню достоверности

знание текущей формы внутренней нейлоновой сферы, качество моделирования методом Монте-Карло и эффективность критериев регистрации антинейтрино. Для минимизации погрешностей, вносимых этими факторами, планируется в начале 2018 г. провести двухмесячную калибровочную кампанию с использованием разных радиоактивных источников: нейтронного  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be} + \text{Ni}$ , позитронного  $^{68}\text{Ga}-^{68}\text{Ge}$ ,  $\gamma$ -источников  $^{40}\text{K}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ , а также источника  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений  $^{222}\text{Rn} + ^{14}\text{C}$ . Стоит отметить, что специально для эксперимента CeSOX была модифицирована карта размещения источников внутри мишени, так что ряд их позиций расположен эквидистантно от  $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент CeSOX на детекторе Vorexino должен начаться в апреле 2018 г. и может через полтора года набора данных исключить большую часть области параметров смешивания, разрешенной наблюдаемыми аномалиями на уровне достоверности  $3\sigma$  (см. рис. 5). При обнаружении осцилляций в стерильные состояния возможно проведение дополнительных измерений с нейтринным источником  $^{51}\text{Cr}$  [24].

**Благодарности.** Автор выражает благодарность организаторам конференции за хорошо спланированное мероприятие и возможность выступить на нем, а также признательность своему научному руководителю Александру Сергеевичу Чепурнову (НИИЯФ МГУ) и коллегам по коллаборации Vorexino/SOX. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-13014.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gorbunov D. S.* Sterile Neutrinos and Their Role in Particle Physics and Cosmology // *Phys. Usp.* 2014. V. 57, No. 5. P. 503.
2. *Athanassopoulos C. et al. (LSND Collab.)*. Candidate Events in a Search for  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  Oscillations // *Phys. Rev. Lett.* 1995. V. 75, No. 14. P. 2650–2653.
3. *Athanassopoulos C. et al. (LSND Collab.)*. Evidence for Neutrino Oscillations from Muon Decay at Rest // *Phys. Rev. C.* 1996. V. 54, No. 5. P. 2685–2708.
4. *Athanassopoulos C. et al. (LSND Collab.)*. Evidence for  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  Oscillations from the LSND Experiment at the Los Alamos Meson Physics Facility // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 77, No. 15. P. 3082–3085.
5. *Aguilar A. et al. (LSND Collab.)*. Evidence for Neutrino Oscillations from the Observation of  $\bar{\nu}_e$  Appearance in a  $\bar{\nu}_\mu$  Beam // *Phys. Rev. D.* 2001. V. 64, No. 11. P. 112007; arXiv:hep-ex/0104049v3.

6. *Patrignani C. et al. (Particle Data Group)*. Review of Particle Physics // *Chin. Phys. C*. 2016. V. 40. P. 100001.
7. *Armbruster B. et al. (KARMEN Collab.)*. Upper Limits for Neutrino Oscillations  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  from Muon Decay at Rest // *Phys. Rev. D*. 2002. V. 65, No. 11. P. 112001; arXiv:hep-ex/0203021v1.
8. *Aguilar-Arevalo A.A. et al. (MiniBooNE Collab.)*. Unexplained Excess of Electron-like Events from a 1-GeV Neutrino Beam // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102, No. 10. P. 101802; arXiv:0812.2243v2.
9. *Aguilar-Arevalo A.A. et al. (MiniBooNE Collab.)*. Improved Search for  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  Oscillations in the MiniBooNE Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110, No. 16. P. 161801; arXiv:1303.2588v2.
10. *Abdurashitov J.N. et al. (SAGE Collab.)*. Measurement of the Response of a Ga Solar Neutrino Experiment to Neutrinos from a  $^{37}\text{Ar}$  Source // *Phys. Rev. C*. 2006. V. 73, No. 4. P. 045805; arXiv:nucl-ex/0512041v1.
11. *Abdurashitov J.N. et al. (SAGE Collab.)*. Measurement of the Solar Neutrino Capture Rate with Gallium Metal: III. Results for the 2002–2007 Data-Taking Period // *Phys. Rev. C*. 2009. V. 80, No. 1. P. 015807; arXiv:0901.2200v3.
12. *Laveder M.* Unbound Neutrino Roadmaps // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 2007. V. 168. P. 344–346.
13. *Giunti C., Laveder M.* Short-Baseline Active-Sterile Neutrino Oscillations? // *Mod. Phys. Lett. A*. 2007. V. 22, No. 33. P. 2499–2510.
14. *Acero M.A., Giunti C., Laveder M.* Limits on  $\nu_e$  and  $\bar{\nu}_e$  Disappearance from Gallium and Reactor Experiments // *Phys. Rev. D*. 2008. V. 78, No. 7. P. 073009; arXiv:0711.4222v3.
15. *Giunti C., Laveder M.* Statistical Significance of the Gallium Anomaly // *Phys. Rev. C*. 2011. V. 83, No. 6. P. 065504; arXiv:1006.3244v3.
16. *Giunti C.* Status of the Sterile Neutrino(s): Conference Presentation // Recent Developments in Neutrino Physics and Astrophysics (10th Anniversary of Borexino), LNGS and GSSI, Assergi and L'Aquila, Italy, Sept. 4–7, 2017.
17. *Mention G., Fechner M., Lasserre Th., Mueller Th. A., Lhuillier D., Cribier M., Letourneau A.* Reactor Antineutrino Anomaly // *Phys. Rev. D*. 2011. V. 83, No. 7. P. 073006; arXiv:1101.2755v4.
18. *Mueller Th.A., Lhuillier D., Fallot M., Letourneau A., Cormon S., Fechner M., Giot L., Lasserre T., Martino J., Mention G., Porta A., Yermia F.* Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra // *Phys. Rev. C*. 2011. V. 83, No. 5. P. 054615; arXiv:1101.2663v3.
19. *Huber P.* Determination of Antineutrino Spectra from Nuclear Reactors // *Phys. Rev. C*. 2011. V. 84, No. 2. P. 024617; Erratum // *Phys. Rev. C*. 2012. V. 85, No. 2. P. 029901.
20. *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.)*. Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118, No. 25. P. 251801; arXiv:1704.01082v2.

21. *Abazajian K. N. (International Neutrino Community)*. Light Sterile Neutrinos: A White Paper. arXiv:1204.5379v1. 2012.
22. *Alimonti G. et al. (Borexino Collab.)*. The Borexino Detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 600, No. 3. P. 568–593; arXiv:0806.2400v1.
23. *Cribier M., Fechner M., Lasserre T., Letourneau A., Lhuillier D., Mention G., Franco D., Kornoukhov V., Schönert S.* Proposed Search for a Fourth Neutrino with a PBq Antineutrino Source // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107, No. 20. P. 201801; arXiv:1107.2335v2.
24. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. SOX: Short Distance Neutrino Oscillations with BoreXino // J. High Energy Phys. 2013. V. 2013, No. 8. P. 38; arXiv:1304.7721v2.
25. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. Cosmogenic Backgrounds in Borexino at 3800 m Water-Equivalent Depth // JCAP. 2013. V. 2013, No. 8. P. 49; arXiv:1304.7381v2.
26. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. Spectroscopy of Geo-Neutrinos from 2056 Days of Borexino Data // Phys. Rev. D. 2015. V. 92, No. 3. P. 031101; arXiv:1506.04610v2.
27. *Gerasimov A. S., Kornoukhov V. N., Sal'dikov I. S., Tikhomirov G. V.* Production of High Specific Activity  $^{144}\text{Ce}$  for Artificial Sources of Antineutrinos // At. Energy. 2014. V. 116, No. 1. P. 54–59.
28. *Gariazzo S., Giunti C., Laveder M., Li Y. F., Zavanin E. M.* Light Sterile Neutrinos // J. Phys. G. 2016. V. 43, No. 3. P. 033001; arXiv:1507.08204v2.