

Эксперимент Нейтрино-4 по поиску стерильного нейтрино

А. П. Серебров⁺¹⁾, В. Г. Ивочкин⁺, Р. М. Самойлов⁺, А. К. Фомин⁺, А. О. Полюшкин⁺, В. Г. Зиновьев⁺, П. В. Неустроев⁺, В. Л. Головцов⁺, А. В. Черный⁺, О. М. Жеребцов⁺, В. П. Мартемьянов^{*}, В. Г. Тарасенков^{*}, В. И. Алешин^{*}, А. Л. Петелин[×], А. Л. Ижутов[×], А. А. Тузов[×], С. А. Сазонтов[×], Д. К. Рязанов[°], М. О. Громов[×], В. В. Афанасьев[×], М. Е. Зайцев^{+°}, М. Е. Чайковский⁺

⁺Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, 188300 Гатчина, Россия

^{*}Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

[×]АО “Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов”,
433510 Дмитровград, Россия

[°]Дмитровградский инженерно-технологический институт
Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, 433511 Дмитровград, Россия

Поступила в редакцию 3 февраля 2017 г.

После переработки 20 февраля 2017 г.

Для проведения исследований по поиску стерильного нейтрино на базе реактора СМ-3 (Дмитровград, Россия) была создана нейтринная лаборатория. Подвижный детектор, защищенный пассивной защитой от внешнего излучения, можно установить в диапазоне от 6 до 12 м от центра реактора. Измерения потока антинейтрино с применением подвижного детектора на таких малых расстояниях проведены впервые. Главные трудности эксперимента связаны с космическим фоном, сильно уменьшающим точность измерений. Представлен анализ результатов измерений на малых расстояниях совместно с данными при больших расстояниях на параметры модели стерильного нейтрино Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$.

DOI: 10.7868/S0370274X17060017

В настоящее время широко распространена дискуссия о существовании стерильного нейтрино, имеющего намного меньшее сечение взаимодействия с материей чем, например, реакторное электронное антинейтрино [1, 2].

Для поиска осцилляций нейтрино в стерильное состояние необходимо наблюдать отклонения в плотности потока реакторных антинейтрино от закона $1/L^2$, где L – расстояние до центра реактора. Если такой процесс существует, то его можно описать следующим уравнением:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E_{\bar{\nu}} [\text{МэВ}]} \right), \quad (1)$$

где $E_{\bar{\nu}}$ – энергия антинейтрино, Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$ – неизвестные параметры осцилляций.

Для проведения эксперимента необходимо измерить поток и спектр антинейтрино на коротких расстояниях от реактора, например, 6–12 м от почти точечного источника антинейтрино. Заметим, что такой эксперимент на малых расстояниях вблизи атомных станций значительно теряет свою чувствительность, так как размеры активной зоны имеют диа-

метр и высоту приблизительно 3 м, поэтому короткие осцилляции в значительной степени усредняются. По этой причине проведение экспериментов на исследовательских реакторах с компактной активной зоной является принципиально важным, а количество проектов по поиску стерильного нейтрино на исследовательских реакторах, которые были представлены на последней международной нейтринной конференции “Нейтрино-2016” в Лондоне составило уже больше десяти.

Благодаря некоторым особенностям конструкции реактор СМ-3 имеет наилучшие условия для проведения эксперимента [3–6]. Он обладает самой компактной активной зоной $35 \times 42 \times 42$ см при мощности реактора 90 МВт. Реактор СМ-3 находится на поверхности Земли и поэтому космический фон представляет главную трудность эксперимента, как и для других исследовательских реакторов. В этой работе мы представляем результаты измерений зависимости потока нейтрино от расстояния до центра реактора в диапазоне 6–12 м, которые выполнены впервые с помощью передвижного детектора. Представлены все данные, полученные с прототипом детектора, и имеющиеся на сегодняшний день данные, полученные на полномасштабном детекторе.

¹⁾e-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

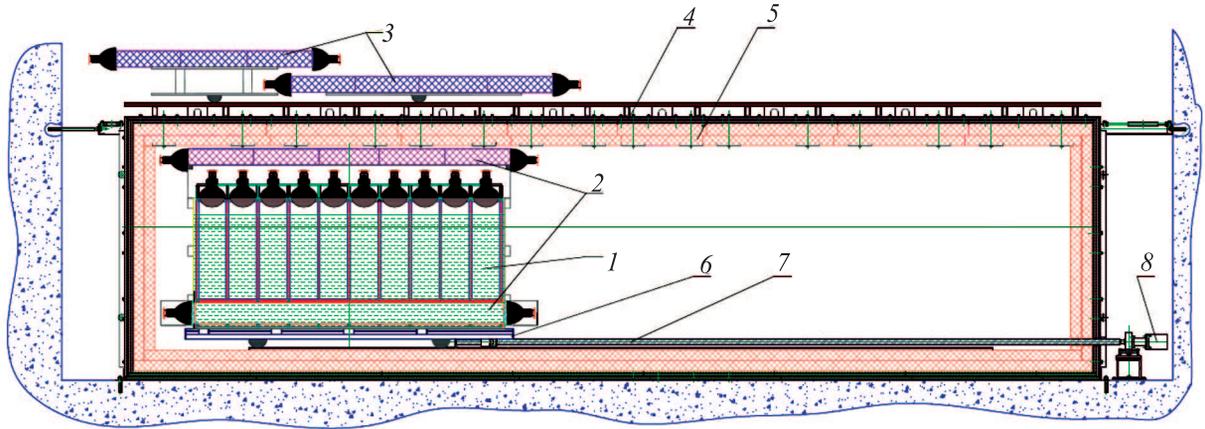


Рис. 1. (Цветной онлайн) Общая схема установки. 1 – детектор реакторных антинейтрино, 2 – внутренняя активная защита, 3 – внешняя активная защита (“зонтик”), 4 – стальная и свинцовая пассивная защита, 5 – пассивная защита из борированного полиэтилена, 6 – подвижная платформа, 7 – ходовой винт, 8 – шаговый двигатель

Внутренний объем модели детектора $0.9 \times 0.9 \times 0.5$ м ($4 \times 4 = 16$ секций) заполнен жидким сцинтиллятором с добавлением гадолиния (0.1%). Детектор основан на реакции обратного β -распада: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. На рис. 1 представлена схема полномасштабного детектора. Он имеет объем жидкого сцинтиллятора 3 м^3 ($5 \times 10 = 50$ секций). Активная защита нейтринного детектора состоит из внешней (“зонтик”) и внутренней части относительно пассивной защиты. Внутренняя активная защита расположена над и под детектором.

Для измерений модель детектора устанавливали в несколько позиций с шагом 0.5 м между ними для минимизации влияния возможной неодинаковости в эффективности различных секций. Сдвиг может быть произведен из данной позиции в любую другую. Секционная структура позволяет нам находить зависимость от расстояния с шагом 0.5 м. Процедура движения детектора от измерения к измерению состоит в движении детектора на один метр, начиная из крайнего положения. На второй стадии, измерения повторяются при сдвинутой на 0.5 м начальной позиции. Таким образом, измерения в одной и той же точке выполняют обеими половинами детектора, тем самым усредняя возможную неодинаковость эффективности половин детектора [7]. С полномасштабным детектором благодаря многосекционной структуре, мы можем проводить измерения по той же схеме, что и с моделью детектора, и усреднением эффективности по разным ячейкам.

Многосекционная модель была спроектирована специально для детектирования позитрона, образующегося в процессе обратного β -распада. Быстрые нейтроны из космического излучения являются главной трудностью для эксперимента на поверхности

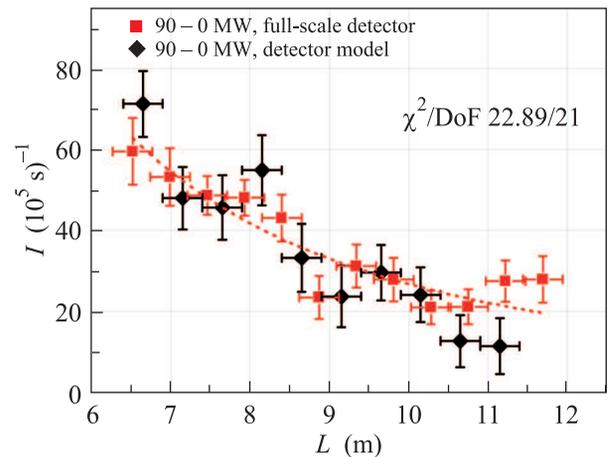


Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимость потока реакторных антинейтрино для модели и детектора, пунктирная линия – подгонка законом $1/L^2$, где L – расстояние до центра реактора

Земли. Рассеяние быстрого нейтрона может имитировать сигнал от нейтринной реакции. Протон отдачи имитирует первичный сигнал позитрона, а вторичный сигнал от захвата нейтрона гадолинием – одинаковый в обеих реакциях. В специальном эксперименте с источником быстрых нейтронов было показано, что они не дают событий с многосекционными стартами [7]. Отличием нейтринных процессов является тот факт, что в нейтринной реакции в первичном процессе образуется два гамма кванта, как результат аннигиляции позитрона. Трек протона отдачи, как и позитрона, с большой вероятностью лежит в одной секции, тогда как гамма квант с энергией 511 кэВ может быть обнаружен в соседних ячейках. Однако, при размере ячеек $22.5 \times 22.5 \times 50$ см, око-

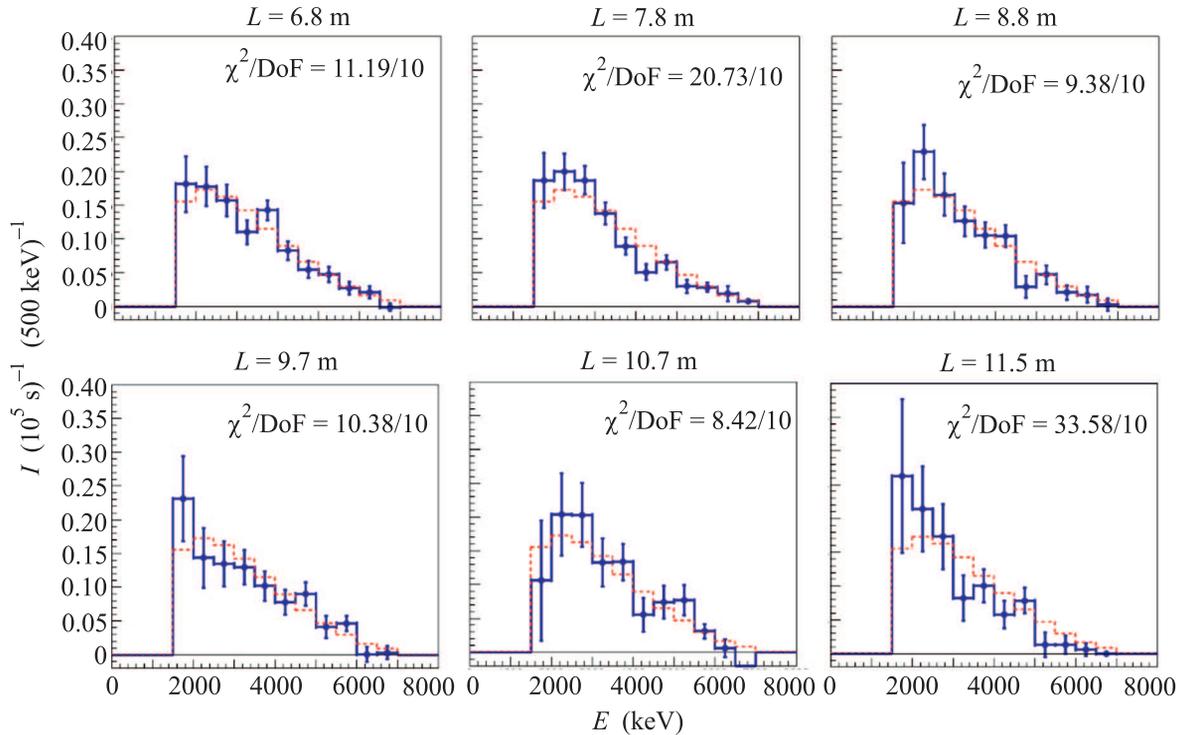


Рис. 3. (Цветной онлайн) Результаты измерений спектров мгновенных сигналов на разных расстояниях от реактора L . Пунктирная линия – рассчитанный спектр мгновенных сигналов. Спектры нормированы на единицу

ло 70 % первичных нейтринных сигналов будут наблюдаться в одной ячейке [7]. Следовательно, только 30 % нейтринных сигналов являются мультисекционными благодаря детектированию гамма квантов в ячейках соседних по отношению к ячейке, в которой произошла аннигиляция. Статистика в три раза меньше, если мы рассматриваем только многосекционные события, не является приемлемой, поэтому мы рассматриваем все события. Критерием по отбору нейтринных событий является отношение $\sim 30\%$ к $\sim 70\%$ для одно- и многосекционных мгновенных сигналов. Поэтому если разница таких сигналов между измерениями с включенным и выключенным реактором имеет указанное соотношение, то мы считаем, что это нейтринный сигнал. Итак, основной способ выделения нейтринных событий – это разностный сигнал при включении и выключении реактора, критерий его подтверждающий – это отношение двойных и одиночных мгновенных сигналов в этой разности.

Разница счета в режиме включенного и выключенного реактора для двойных и одиночных мгновенных сигналов, проинтегрированная по всему диапазону расстояний, составила $(37 \pm 4)\%$ и $(63 \pm 7)\%$, что позволяет нам считать зарегистрированные события нейтринными.

Результаты измерений разности счета нейтрино-подобных событий для модели и полномасштабного детектора представлены на рис. 2 в виде зависимости от расстояния до центра реактора.

Спектры разности мгновенных сигналов при включенном и выключенном реакторе для шести различных расстояний приведены на рис. 3. Пунктиром показан результат Монте-Карло моделирования спектра мгновенных событий. Для сопоставления с расчетными спектрами требуются более точные статистические данные.

Измерения с полномасштабным детектором с объемом жидкого сцинтиллятора 3 м^3 (5×10 ячеек) начались только в июне 2016. Измерения с включенным реактором составили 111 суток и с выключенным реактором – 74 суток. Всего было 15 включений и соответственно столько же выключений. Представлены первые результаты, которые сравнивали с результатами, полученными с моделью детектора. Измерения с новым детектором будут продолжаться по той же схеме (движение, измерение спектра) для достижения лучшей статистической точности.

Измерения потока антинейтрино от реактора при помощи перемещаемого детектора на малых расстояниях 6–12 м были выполнены впервые. Главные трудности эксперимента связаны с космическим фоном,

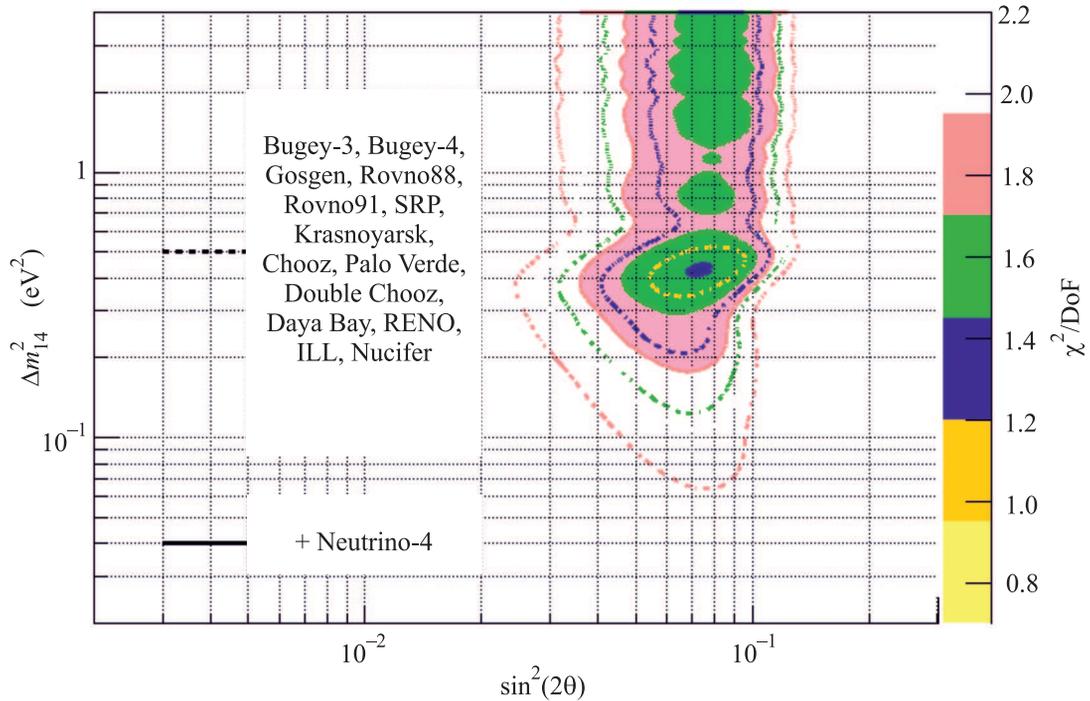


Рис. 4. (Цветной онлайн) Анализ на параметры модели с одним стерильным нейтрино, используя набор наших данных Нейтрино-4, данных ILL и Nucifer на малых расстояниях, а также всех известных данных при больших расстояниях (см. рис. 5) представлен сплошными линиями. Для сравнения приведен такой же анализ без учета данных Нейтрино-4 штрих-пунктирными линиями. Из-за добавления новых данных и увеличения числа степеней свободы использован приведенный Хи-квадрат с учетом неравноточности измерений

что сильно уменьшает точность измерений. В условиях доступной статистической точности мы пока не видим явных отклонений плотности потока нейтрино от закона $1/L^2$. Результаты измерений в диапазоне 10–12 м требуется повторить с большей точностью.

Однако объединение наших данных с данными других экспериментов на больших расстояниях требует анализа с предположением о возможности существования стерильного нейтрино, так как ряд экспериментов на больших расстояниях демонстрирует дефицит потока реакторных антинейтрино по отношению к расчетному. Поэтому в завершение статьи мы представляем результаты наших измерений в диапазоне 6–12 м от центра активной зоны реактора совместно с результатами широко известных измерений вплоть до 1000 м. Подборка данных на больших расстояниях заимствована из работ [2, 8, 9]. Поскольку эффективность нашего многосекционного детектора к регистрации антинейтрино не может быть рассчитана с достаточной точностью, наши данные относительных измерений могут быть нормированы на данные абсолютных измерений – Nucifer и ILL. Однако лучше нормировать по среднему значению на общепринятое отношение 0.936, т.е. на отношение из-

меренного потока реакторных антинейтрино к расчетному потоку [8, 9]. Следует заметить, что оба варианта дают приблизительно одинаковый результат, но второй вариант более точный. Наконец, было бы важно провести измерения при 15 м и таким образом осуществить привязку к наиболее точным абсолютным измерениям Bugey-3 на этом расстоянии. Напомним, что в нашем эксперименте благодаря методу передвижного детектора ставится задача относительных измерений и поиска отклонения от закона $1/L^2$, а также поиска вариации формы спектра из-за процесса осцилляций в стерильное состояние. К сожалению, статистическая точность наших измерений пока недостаточна для наблюдения предполагаемых процессов с высокой точностью. Для дальнейшего продвижения по точности эксперимента требуется продолжение набора статистики и привлечения дополнительных методов подавления фона. Однако, уже сейчас можно провести анализ на параметры модели с одним стерильным нейтрино, используя набор данных, представленных на рис. 2. Результаты такого анализа приведены на рис. 4. Область ограничений на параметры Δm^2_{14} и $\sin^2 \theta_{14}$ на рис. 4 в значительной степени повторяет область ограничений из

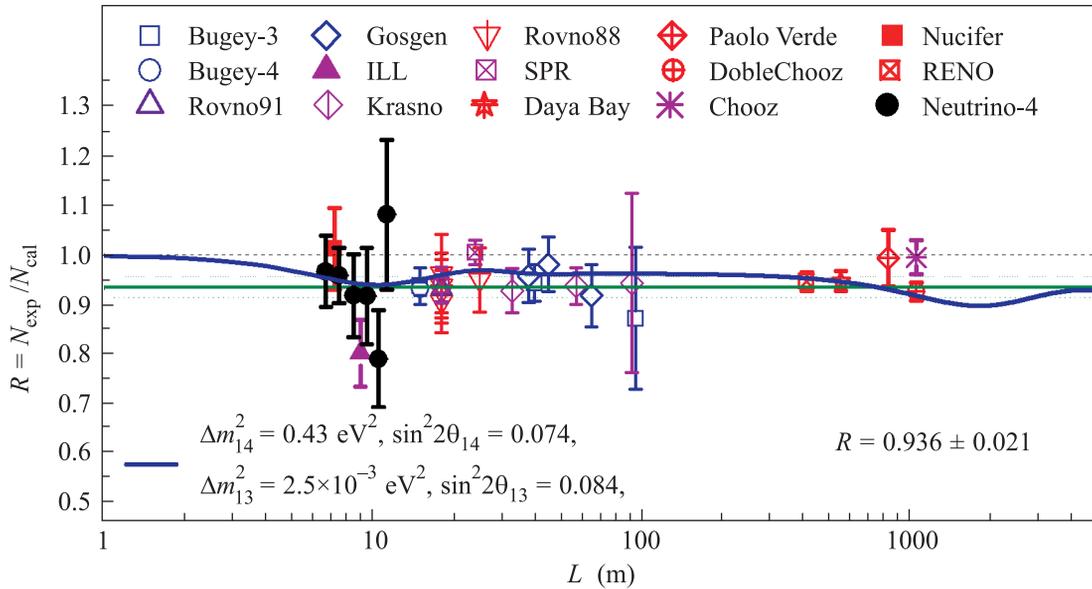


Рис. 5. (Цветной онлайн) Результаты наших измерений в диапазоне 6–12 м от центра активной зоны реактора совместно с результатами широко известных измерений вплоть до 1000 м [2, 8, 9] и кривая осцилляций с параметрами $\Delta m_{14}^2 = 0.43 \text{ эВ}^2$, $\sin^2 2\theta_{14} = 0.074$ и $\Delta m_{13}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{13} = 0.084$

работы [2]. Особенностью представленного анализа является то, что наиболее вероятное значение сместилось в область с $\Delta m_{14}^2 \approx 0.4 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.1$.

Лучшая подгонка получается в модели со стерильным нейтрино. Минимальное значение Хи-квадрат (17.69/20) получается при $\Delta m_{14}^2 = 0.43 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} = 0.074$.

На рис. 5 представлен использованный набор данных и кривая осцилляций с параметрами $\Delta m_{14}^2 = 0.43 \text{ эВ}^2$, $\sin^2 2\theta_{14} = 0.074$ и $\Delta m_{13}^2 = 0.0025 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{13} = 0.084 \text{ эВ}^2$.

В заключение следует сказать, что в настоящее время представлять результаты данного анализа как обнаружение стерильного нейтрино с параметрами $\Delta m_{14}^2 = 0.43 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} = 0.074$ было бы преждевременно. Основной причиной такого результата в этом анализе является привлечение эффекта реакторной антинейтринной аномалии, т.е. нормировка всех данных на рассчитанный поток антинейтрино от реактора. Нужно напомнить, что проблема реакторной антинейтринной аномалии в значительной степени связана с расчетами потока антинейтрино от реактора. Надежность и точность этих расчетов пока не гарантирована. Чтобы избавиться от проблемы расчетов нейтринного потока, нужна более высокая статистическая точность относительных измерений с передвижным детектором и проведение измерений вплоть до расстояния 15 м от центра активной зоны реактора. Измерения при 15 м позволят сопоставить

наши результаты относительных измерений с результатами других аналогичных измерений, в которых был использован метод абсолютных измерений нейтринного потока.

Точные измерения вариации нейтринного потока и спектра мгновенных сигналов на малых расстояниях (от 6 м и дальше) позволили бы независимым образом ответить на вопрос о возможности существования стерильного нейтрино в диапазоне Δm_{14}^2 (0.4–1 эВ²), поэтому данные измерения нужно активно продолжать, расширяя базу измерений до 15 м и далее.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ # 14-22-03055-офи_м. Значительный вклад в данное исследование внесла поставка жидкого сцинтиллятора из лаборатории возглавляемой профессором Юн Хао (Институт физики высоких энергий, Пекин, Китай).

1. T. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, A. Letourneau, S. Cormon, M. Fechner, L. Giot, T. Lasserre, J. Martino, G. Mention, A. Porta, and F. Yermia, Phys. Rev. C **83**, 054615 (2011).
2. G. Mention, M. Fechner, Th. Lasserre, Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Cribier, and A. Letourneau, Phys. Rev. D **83**, 073006 (2011).
3. А. П. Серебров, А. К. Фомин, В. Г. Зиновьев и др. (Collaboration), Письма в ЖТФ **39**(14), 25 (2013).
4. А. П. Серебров, А. К. Фомин, В. Г. Зиновьев и др. (Collaboration), Письма в ЖТФ **40**(11), 8 (2014).

5. А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов и др. (Collaboration), *ЖТФ* **85**(12), 128 (2015).
6. А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов и др. (Collaboration), *ЖЭТФ* **148**(10), 665 (2015).
7. А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов и др. (Collaboration), *ЖТФ* **87**(2), 294 (2017).
8. C. Giunti, Neutrino 2016. XXVII Intern. Conf. on Neutrino Phys. and Astrophys. 4–9 July 2016, London, UK, <https://goo.gl/v1WrUi>.
9. Yu-Feng Li, Applied Anti-neutrino Physics 2016, 1–2 December, University of Liverpool, Merseyside, UK, <https://goo.gl/m2OJlj>.