

## ЭКСПЕРИМЕНТ «НЕЙТРИНО-4» ПО ПОИСКУ СТЕРИЛЬНОГО НЕЙТРИНО НА РЕАКТОРЕ СМ-3

*А. П. Серебров*<sup>1,\*</sup>, *В. Г. Ивочкин*<sup>1</sup>, *Р. М. Самойлов*<sup>1</sup>,  
*А. К. Фомин*<sup>1</sup>, *А. О. Полюшкин*<sup>1</sup>, *В. Г. Зиновьев*<sup>1</sup>,  
*П. В. Неустроев*<sup>1</sup>, *В. Л. Головцов*<sup>1</sup>, *А. В. Чёрный*<sup>1</sup>,  
*О. М. Жеребцов*<sup>1</sup>, *М. Е. Чайковский*<sup>1</sup>, *В. П. Мартемьянов*<sup>2</sup>,  
*В. И. Алешин*<sup>2</sup>, *А. Л. Петелин*<sup>3</sup>, *А. Л. Ижутов*<sup>3</sup>, *А. А. Тузов*<sup>3</sup>,  
*В. Г. Тарасенков*<sup>2</sup>, *С. А. Сазонтов*<sup>3</sup>, *М. О. Громов*<sup>3</sup>,  
*В. В. Афанасьев*<sup>3</sup>, *М. Е. Зайцев*<sup>1,4</sup>, *Д. К. Рязанов*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

<sup>3</sup> Государственный научный центр — Научно-исследовательский институт  
атомных реакторов, Димитровград, Россия

<sup>4</sup> Димитровградский инженерно-технологический институт — филиал Национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ», Димитровград, Россия

Эксперимент «Нейтрино-4» впервые представляет результаты измерений спектра и потока реакторных антинейтрино в зависимости от расстояния в диапазоне 6–12 м от реактора. Значимость аппроксимации функцией  $A/L^2 \sim 10\%$ , таким образом, уровень достоверности того, что существуют отклонения от закона,  $1/L^2 \sim 90\%$  ( $1,64\sigma$ ). Уровень достоверности гипотезы отклонений экспериментально определенного спектра от рассчитанного составляет также 90%. В обоих случаях параметры, удовлетворяющие отклонению, находятся в одной и той же области  $\Delta m_{14}^2 \approx 0,7\text{--}0,8 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0,10\text{--}0,15$ , что дает уровень достоверности  $\sim 95\%$  ( $2\sigma$ ). Но этого еще недостаточно, чтобы сделать такое важное заявление, как осцилляции нейтрино в стерильное состояние. Также на данный момент невозможно полностью исключить влияние систематической погрешности на итоговый результат эксперимента.

The experiment “Neutrino-4” for the first time in the world has provided the measurement result on spectrum and dependence of the flux of reactor antineutrinos on the distance of 6–12 m from the reactor. The goodness of fit with the law  $1/L^2$  is a little more than 10%; i.e., the confidence level is about 90% in deviation from that law ( $1,64\sigma$ ). A similar situation arises in the analysis of spectrum dependence of prompt signals, which

---

\*E-mail: serebrov\_ap@npni.nrcki.ru

is also 90% of confidence level. The joint deviation, demanding identical parameters  $\Delta m_{14}^2 \approx 0.7\text{--}0.8 \text{ eV}^2$  and  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.10\text{--}0.15$ , increases the confidence level up to about 95% ( $2\sigma$ ). But it is still not enough for making statements on observation of oscillations in a sterile state. At last, it is also impossible now to exclude possibility of influence of systematic errors on the final experimental result.

PACS: 13.15.+g; 14.60.St

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко обсуждается гипотеза существования стерильного нейтрино с сечением взаимодействия много меньше, чем, например, у электронного антинейтрино. Можно предположить, что из-за перехода реакторных антинейтрино в стерильное состояние будет наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях от реактора и дефицит реакторных антинейтрино при большем удалении [1, 2]. Кроме того, стерильное нейтрино рассматривается как кандидат на роль частицы темной материи.

Гипотеза осцилляций может быть проверена прямым измерением нейтринного потока в зависимости от расстояния и нейтринного спектра на различных расстояниях в диапазоне 6–12 м. Для этого детектор должен быть передвижным и спектрально чувствительным. Наш эксперимент нацелен на подтверждение возможно существования стерильного нейтрино с определенным уровнем достоверности или же на опровержение этой гипотезы. Для наблюдения осцилляций в стерильное состояние необходимо зарегистрировать отклонение зависимости нейтринного потока от расстояния от закона  $1/L^2$ . Если процесс осцилляций действительно имеет место, он может быть описан следующей формулой:

$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( 1,27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{МэВ}]} \right), \quad (1)$$

где  $E_{\tilde{\nu}}$  — энергия антинейтрино;  $\Delta m_{14}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14}$  — неизвестные параметры осцилляций. Для эксперимента необходимо проводить измерения потока и спектра насколько возможно близко к практически точечному источнику антинейтрино.

Мы рассмотрели возможности проведения новых экспериментов на исследовательских реакторах в России. Именно исследовательские реакторы должны быть использованы для проведения подобного рода экспериментов, так как они обладают компактной активной зоной, и нейтринный детектор может быть расположен на коротком расстоянии от нее. К сожалению, помещения исследовательских реакторов, как правило, подвержены значительному влиянию нейтронного и гамма-фонов, что затрудняет их использова-

ние в качестве площадок для низкофоновых экспериментов. Благодаря некоторым конструктивным особенностям реактор СМ-3 обеспечивает наиболее подходящие условия для экспериментов по поиску нейтринных осцилляций на коротких расстояниях. Но реактор СМ-3, как и другие исследовательские реакторы, расположен на поверхности Земли, и поэтому космический фон является самой главной трудностью в проведении данного эксперимента.

## 1. ПОЛНОМАСШТАБНЫЙ ДЕТЕКТОР

Полномасштабный детектор на основе жидкого сцинтиллятора имеет объем  $3 \text{ м}^3$ , разделенный на  $5 \times 10$  секций. Активная защита нейтринного детектора состоит из внешней («зонтик») части по отношению к пассивной защите и внутренней. Внутренняя активная защита расположена сверху детектора и под ним (рис. 1).

Вероятность того, что один из аннигиляционных гамма-квантов с энергией 511 кэВ вылетит в соседнюю секцию (по отношению к основной, в которой больший по амплитуде сигнал), оценивается в среднем по всем ячейкам детектора в 37%. Результаты измерения вероятности того, что стартовый сигнал будет детектироваться в двух секциях, приведены на рис. 2 для разности ON-OFF и по отдельности для включенного и выключенного реактора.

В работе [3] представлены оценки вероятности того, что позитронное событие даст сигнал в двух секциях в случае аннигиляции позитрона во внутренней, боковой или угловой секции. В полномасштабном детекторе мы не использовали первый и последний ряд для регистрации основного позитронного сигнала (большего по амплитуде), а только для аннигиляционных гамма-квантов — 511 кэВ. Это означает, что всего в детекторе используются

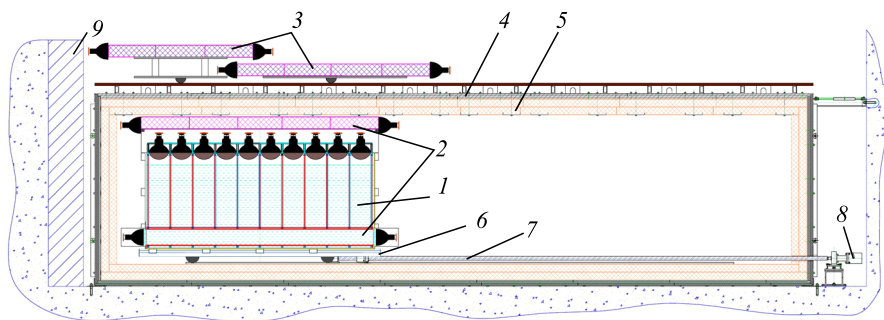


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 — детектор реакторных антинейтрино; 2 — внутренняя активная защита; 3 — внешняя активная защита («зонтик»); 4 — борированный полиэтилен пассивной защиты; 5 — стальная и свинцовая пассивная защита; 6 — передвижная платформа; 7 — винт подачи; 8 — шаговый двигатель; 9 — защита от быстрых нейтронов из железной дробы

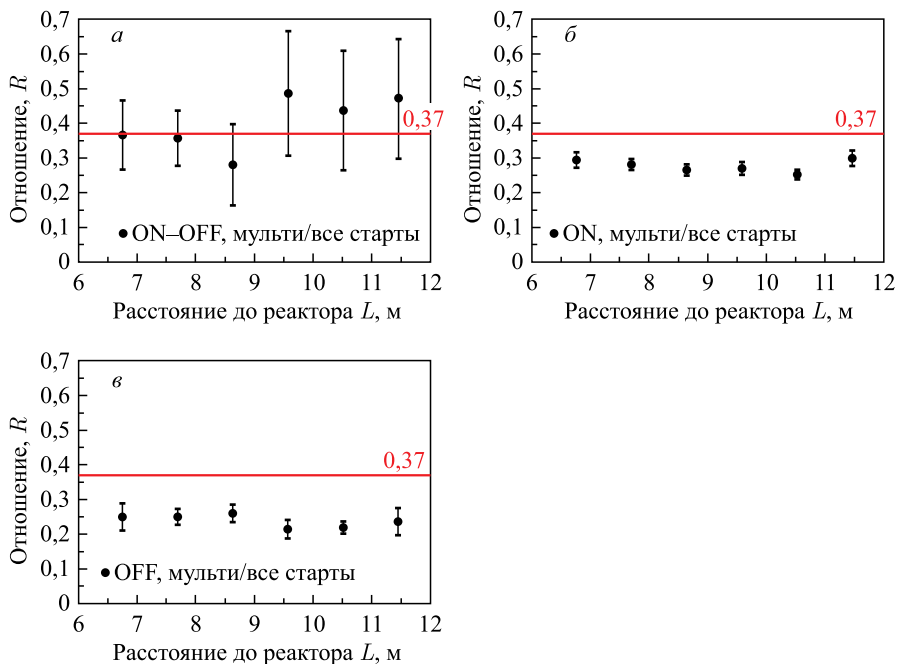


Рис. 2. Экспериментально измеренная вероятность одновременной регистрации стартового сигнала в двух соседних секциях для разности ON-OFF, а также для включенного и выключенного реактора

16 боковых секций и 24 внутренние. В таком случае средняя вероятность зарегистрировать мультисекционное событие от позитрона составит 37 %.

Доля от общей разности скорости счета нейтриноподобных событий при включенном и выключенном реакторе для двухсекционных и односекционных событий, усредненная по всем расстояниям, составляет  $(37 \pm 4)$  и  $(63 \pm 7)$  % соответственно. Это отношение позволяет рассматривать зарегистрированные события как нейтринные.

Попытки подавить фон быстрых нейтронов с помощью секционирования детектора принесли свои плоды. Отношение эффект-фон было улучшено вдвое для ближайшей к реактору точки с 0,3 до 0,6. Также секционирование детектора позволило в 2,5 раза снизить фон случайных совпадений, негативно сказывающийся на точности измерений, за счет возможности введения дополнительных критериев отбора. Кроме того, секционная структура позволяет следить за возможным проявлением ложного эффекта от быстрых нейтронов реактора. Если такой эффект проявляется, то его можно наблюдать только в ближайших к реактору секциях.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения с полномасштабным детектором начались в июне 2016 г. Измерения длились с работающим реактором 196 сут и 107 сут с остановленным. Всего реактор останавливался и запускался 25 раз.

Приведены первые результаты этой работы. Данные измерений разности скорости счета нейтриноподобных событий для полномасштабного детектора представлены на рис. 3 в виде зависимости потока антинейтрино от расстояния до центра активной зоны реактора. Эти данные включают в себя только те, что получены на полномасштабном детекторе. Необходимо отметить, что в предыдущей публикации [4] для анализа использовались данные, полученные также путем моделирования. К сожалению, там были включены данные, набранные до того, как пространство между стеной реактора и пассивной защитой детектора было заполнено железной дробью. А это могло внести некоторый эффект, связанный с быстрыми нейтронами от реактора. В новом анализе задействованы только данные полномасштабного детектора, когда дробь уже была засыпана, поэтому эффект быстрых нейтронов от реактора полностью исключен. Кроме того, первый и последний ряды детектора, используемые и как активная защита, в то же время служат и пассивной защитой от быстрых нейтронов.

Аппроксимация экспериментально определенной зависимости функцией  $A/L^2$  не дает удовлетворительного результата. Значимость этого фитирования немногим более 10% (см. рис. 3), т.е. отклонение от закона  $1/L^2$  может наблюдаться с вероятностью  $\sim 90\%$ . В то же время экспериментально полученные результаты коллаборации DANSS, любезно предоставленные М. В. Даниловым и доложенные на конференции «The 52nd Rencontres de Moriond» [5], указывают на то, что в диапазоне 10–13 м закон  $1/L^2$  соблюда-

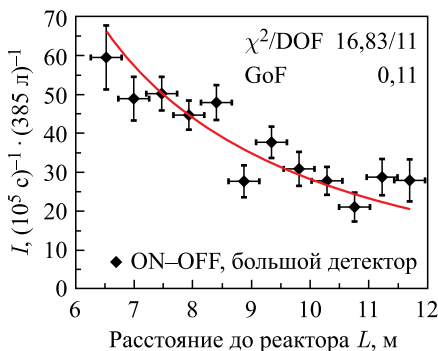


Рис. 3. Зависимость потока реакторных антинейтрино от расстояния для полномасштабного детектора. Сплошная линия соответствует лучшему фитированию с функцией  $A/L^2$

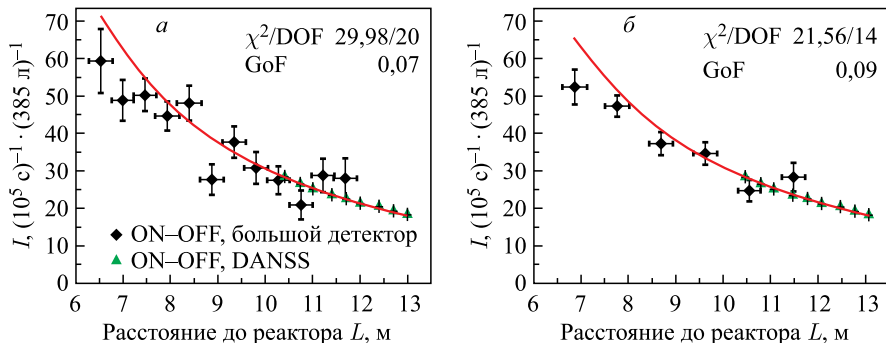


Рис. 4. а) Результаты объединения экспериментальных данных «Нейтрино-4» и DANSS для фитирования функцией  $A/L^2$ . б) Те же самые экспериментальные данные «Нейтрино-4», но усредненные в диапазоне 1 м

ется достаточно точно. Мы можем использовать эту информацию и «сшить» результаты измерений в области их перекрытия 10–12 м.

Результат объединения данных «Нейтрино-4» и DANSS показан на рис. 4.

Представляет большой интерес использовать данные экспериментов «Нейтрино-4» и DANSS вместе с данными других экспериментов для общего фитирования для поиска наиболее подходящих параметров осцилляций в стерильное состояние. В то же время важно помнить, что результат также должен удовлетворять данным, полученным на больших расстояниях. Зависимость и параметры фитирования показаны на рис. 5. Стоит отметить, что данные анализа очень близки к предположению, сделанному в работе [1].

Энергетическая калибровка для полномасштабного детектора была проведена аналогично калибровке секционированной модели с теми же источниками гамма- и нейтронного излучения. Это позволило измерить на полномасштабном детекторе спектр мгновенных сигналов. На рис. 6 представлен спектр мгновенных сигналов, усредненный по всем расстояниям с целью улучшить статистическую точность (среднее расстояние для этого спектра 8,6 м). Этот спектр содержит статистику всех измерений.

Так как оба эксперимента — DANSS и «Нейтрино-4» — используют относительные измерения, необходимо упомянуть, каким образом точки DANSS и «Нейтрино-4» сшиваются и как все вместе встраиваются в общую картину других экспериментов. Как видно из рис. 4, области измерений DANSS и «Нейтрино-4» пересекаются в интервале 10,5–11,5 м. В то же время экспериментальные данные DANSS находятся в хорошем соответствии с законом  $1/L^2$ . Поэтому процедура сшивания следующая: точки нашего эксперимента должны ложиться на кривую, соответствующую точкам DANSS.

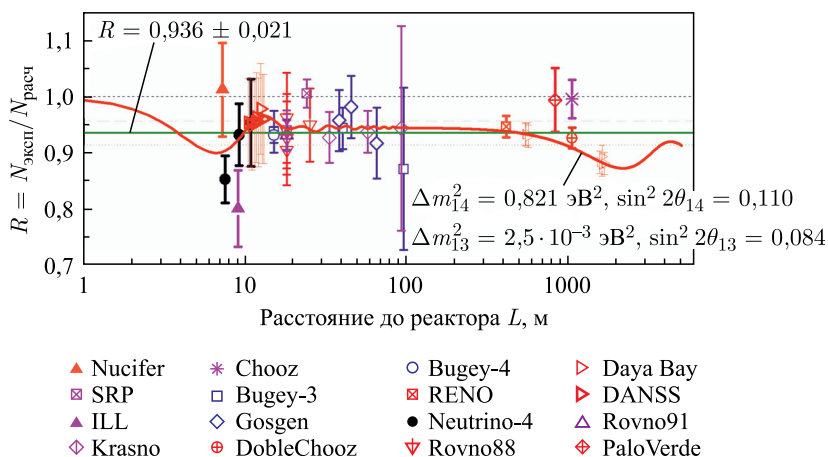


Рис. 5. Общее фитирование параметров осцилляций стерильного нейтрино экспериментальными данными «Нейтрино-4» и DANSS и данными известных экспериментов на дальних расстояниях [6, 7]. Данные «Нейтрино-4» представлены усредненными в интервале 2 м

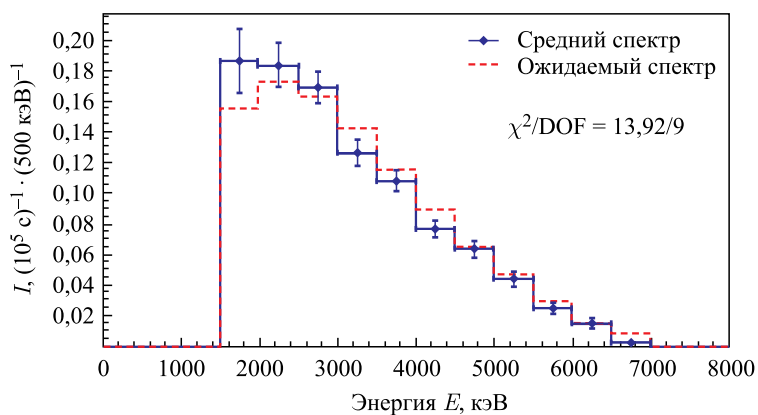


Рис. 6. Спектр мгновенных сигналов для всего цикла измерений, объединенный для всех расстояний (среднее расстояние 8,6 м), штриховой линией показан спектр, полученный в результате моделирования по методу Монте-Карло спектра  $^{235}\text{U}$ , так как СМ-3 работает на высокообогащенном топливе

Разумно предположить, что после сшивания ошибки точек DANSS должны определяться ошибкой точки «Нейтрино-4» в месте сшивания. Для картины общего фитирования точки DANSS и «Нейтрино-4» фиксируются так, что

кривая зависимости от расстояния ложится на среднее значение (для больших расстояний), которое определяет реакторную аномалию.

Аппроксимация отношения константой (случай без осцилляций) дает низкий уровень значимости (13%), тогда как уровень значимости для фитирования с предполагаемыми параметрами осцилляции  $\Delta m_{14}^2 \approx 0,75 \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0,14$  составляет 78%. Следует отметить, что параметры осцилляции и для зависимости от расстояния, и для спектральной зависимости оказались близкими. Тогда, конечно, совместный анализ должен повысить уровень значимости для этой области параметров, если данный эффект не связан с систематической погрешностью эксперимента. Также следует от-

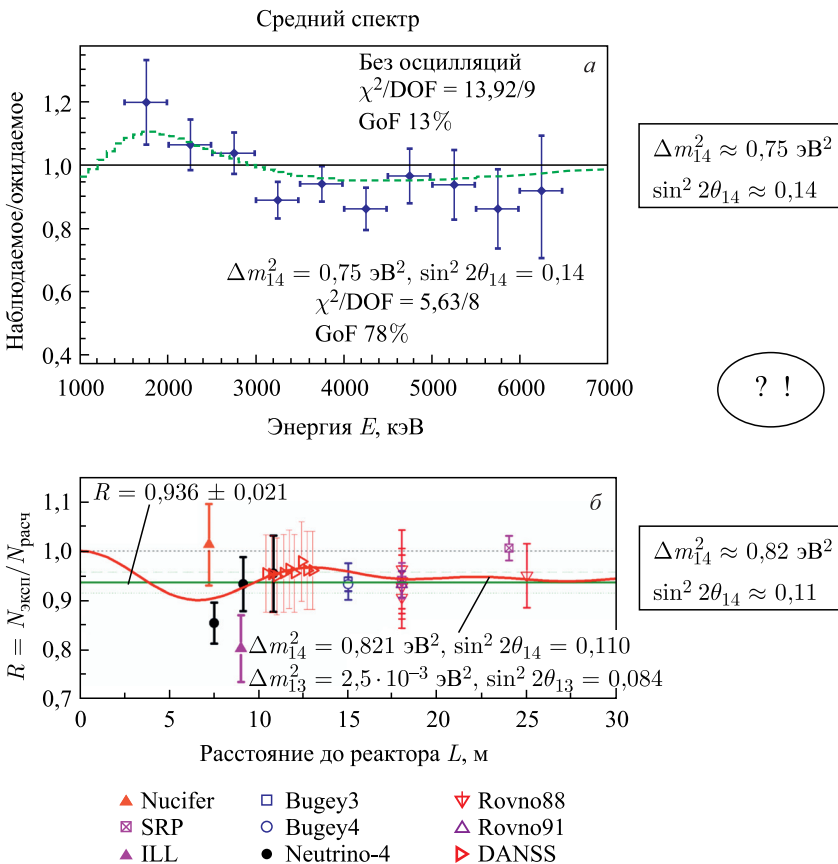


Рис. 7. Анализ экспериментальных данных для энергетической (а) и пространственной (б) зависимостей на предмет возможных значений параметров осцилляции



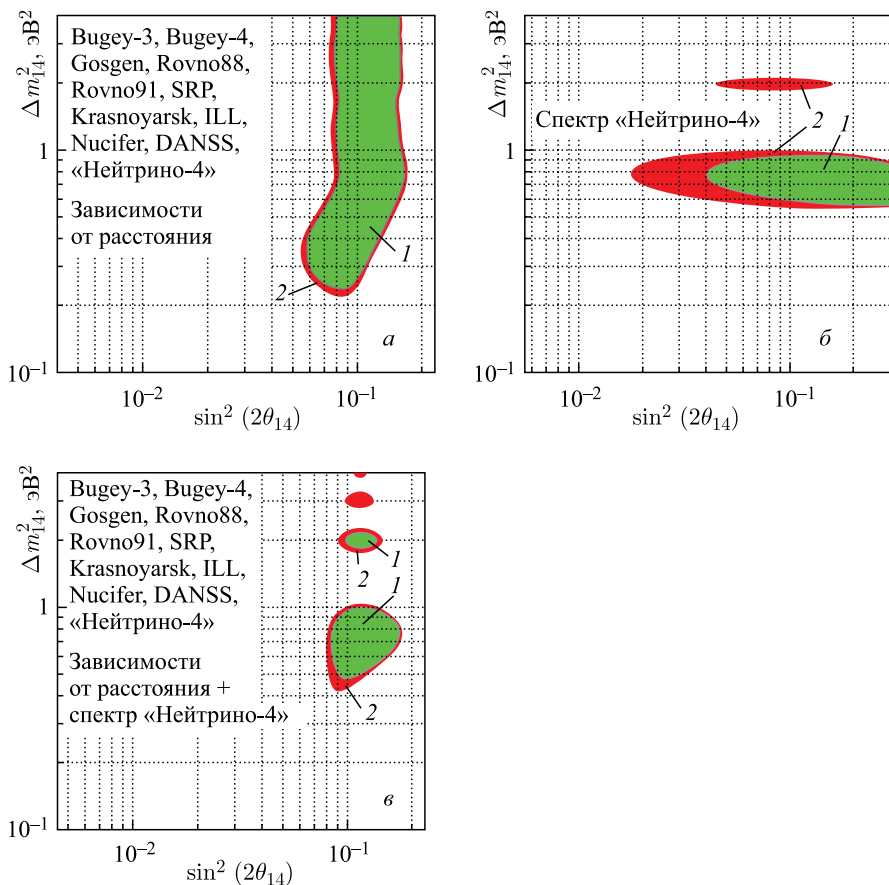


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Уровень достоверности: *а*) пространственной зависимости для «Нейтрино-4», DANSS и других реакторных экспериментов из [1]; *б*) энергетической зависимости мгновенных сигналов эксперимента «Нейтрино-4»; *в*) при совместном анализе пространственной и энергетической зависимостей. Зеленым (1) отмечены области, соответствующие уровню достоверности 95–98 %, красным (2) — 98–99 %

метить, что измерения для зависимости от расстояния и от энергии можно считать практически не влияющими друг на друга. Для наглядности оба результата представлены на рис. 7.

Более подробный анализ уровня достоверности для различных значений параметров осцилляций также представлен на рис. 8: для пространственной зависимости (рис. 8, *а*), энергетической зависимости (рис. 8, *б*) и совместного анализа (рис. 8, *в*).

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ТЕКУЩИМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Необходимо сделать некоторые выводы из проведенного анализа экспериментальных данных. В первую очередь следует отметить, что уровень достоверности того, что экспериментальные данные не укладываются в закон  $1/L^2$ , составляет 90 %, т. е. 1,64 стандартного отклонения. Но этого, очевидно, недостаточно для того, чтобы можно было сделать какие-либо окончательные выводы. Похожая ситуация проявляется и при анализе спектральной зависимости мгновенных сигналов, с тем же 90%-м уровнем достоверности. Совместный анализ показывает, что есть область параметров  $\Delta m_{14}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14}$ , в которой оба подхода дают аналогичный результат, и уровень достоверности возможного существования стерильного нейтрино увеличивается до 95 % (два стандартных отклонения). Тем не менее этого все еще недостаточно для того, чтобы заявлять о наблюдении такого важного явления, как осцилляции нейтрино в стерильное состояние. Более того, также невозможно полностью исключить влияние систематической погрешности на окончательный результат эксперимента. Полученный результат противоречит ограничениям на параметры  $\Delta m_{14}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14}$ , установленным в экспериментах Bugey-3 [8], NEOS [9] и DANSS [5]. Поэтому мы хотели бы сосредоточить наши усилия на дальнейшем увеличении статистической точности эксперимента и на контроле над возможными систематическими погрешностями. Конечно, продолжение набора данных даст некоторые улучшения статистической точности, но это не решит проблемы в целом.

В эксперименте «Нейтрино-4», начатом в 2014 г. сначала с помощью моделирования, а затем продолженном с полномасштабным детектором, впервые в мире проведены измерения потока антинейтрино в зависимости от расстояния в диапазоне 6–12 м от реактора. Попытка уменьшить фон быстрых нейтронов с помощью секционирования дала ожидаемый результат. Соотношение эффект–фон было улучшено с 0,3 до 0,6. Секционирование дало критерии для выявления нейтринных событий, что позволило значительно снизить фон случайных совпадений, негативно сказывающийся на точности измерений. Вдобавок к этому секционирование дает возможность следить за возможным проявлением ложного эффекта быстрых нейтронов от реактора.

Одной из принципиальных проблем, с которой столкнулся эксперимент «Нейтрино-4» при проведении измерений на реакторе SM-3, — это коррелированный фон быстрых нейтронов от космического излучения. Это связано с тем, что здание, в котором располагается экспериментальная установка, находится на поверхности Земли, а бетонная защита над установкой не имеет достаточной толщины.

Влияние фона случайных совпадений на оценку точности может быть сокращено увеличением концентрации гадолиния в жидком сцинтилляторе.

Это позволит уменьшить временное окно для поиска задержанных сигналов от гадолиниевых гамма-квантов и тем самым снизить вероятность случайного совпадения. Для подавления коррелированного фона необходимо привлечь метод дискриминации сигналов по форме импульса, что позволит разделять сигналы легких и тяжелых частиц. Для эксперимента NEOS (Южная Корея) был разработан и произведен высококачественный сцинтилятор, позволяющий распознавать частицы по форме их сигнала, благодаря чему удалось значительно снизить уровень коррелированного фона. Кроме того, концентрация гадолиния в этом сцинтиляторе в 5 раз выше, чем в том, что используется нами, а это позволяет снизить влияние фона случайных совпадений.

Поэтому в первую очередь в будущем проекте необходимо заменить используемый сцинтилятор на более эффективный в плане разделения сигналов по форме импульса и с более высокой концентрацией гадолиния, вплоть до 0,5%. Ожидается, что это даст подавление случайных совпадений в 3 раза, так же как и коррелированных, а это позволит увеличить точность измерений вдвое.

Вторая часть проекта — создание новой нейтринной лаборатории, ориентированной также на решение других проблем, оставшихся за рамками текущего эксперимента, таких как:

- 1) мониторинг космического фона с помощью двух детекторов;
- 2) обеспечение необходимого энергетического разрешения детектора с использованием конструкции с удвоенным числом фотоумножителей с двух противоположных сторон сцинтилятора;
- 3) калибровка детектора источниками, которые могут быть помещены внутрь сцинтилятора;
- 4) увеличение диапазона измерений до 15 м (в дальнейшем это позволит нормироваться на данные, полученные с наибольшей точностью в позиции на 15 м в эксперименте Bugey-3).

В помещении № 170 здания реактора СМ-3 есть место для нейтринной лаборатории, в которой можно измерять поток антинейтрино от реактора в диапазоне 6–14 м. Схема установки показана на рис. 9.

В соответствии с новым проектом предполагается использовать два детектора. Один будет установлен на максимальном удалении 15 м и будет находиться там постоянно, так как поток реакторных антинейтрино на таком расстоянии уже сильно ослаблен, а второй будет двигаться от первого детектора к реактору. Пассивная и активная защиты будут перемещаться вместе с детектором. Первый детектор предполагается использовать как монитор, контролирующий изменение космического фона. Рассматривается возможность установки секционированного детектора, как показано на рис. 9. Кроме того, не исключена возможность использования однородного детектора с применением метода компьютерной томографии для восстановления координаты события.

Согласно предварительным оценкам за два года набора статистики при измерении потока антинейтрино от реактора будет достигнут уровень статистической точности 1–2%. Таким образом, будет внесена окончательная ясность в вопрос о возможном существовании стерильного нейтрино с параметрами в области  $\Delta m_{14}^2 \approx 1 \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0,1$ .

В завершение необходимо отметить, что поиски стерильного нейтрино на малых расстояниях 6–12 м должны продолжаться на исследовательских реакторах. К сожалению, измерения проводятся в условиях значительного космического фона и существенно меньших нейтринных потоков. Тем не менее проведение этих измерений на коротких расстояниях на исследовательских реакторах видится крайне важным по нескольким причинам. Исследовательские реакторы работают на высокообогащенном урановом топливе, поэтому неопределенности, связанные с разнообразием источников нейтрино, отсутствуют. Активная зона исследовательского реактора в сравнении с реактором атомной станции не требует учета эффектов, связанных с неравномерностью выгорания топлива. Наконец, эффект осцилляций предсказывался на расстоянии 6–12 м, поэтому прямая проверка осцилляционного эффекта более предпочтительна и модельно-независима. Более того, в расширенной модели с тремя стерильными нейтрино также требуется тщательных измерений на коротких расстояниях. В настоящий момент существуют сразу несколько проектов по поиску осцилляций на исследовательских реакторах (STEREO, SoLiD, PROSPECT), поэтому есть надежда, что борьба с космическим фоном увенчается успехом и область коротких расстояний вблизи реактора будет исследована с должным вниманием.

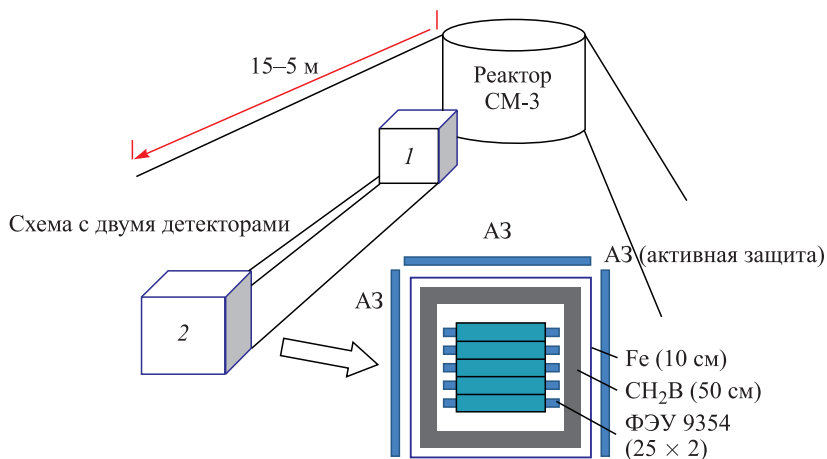


Рис. 9. Схема нового эксперимента по поиску стерильного нейтрино в помещении №170 на реакторе CM-3: 1 — ближний передвижной детектор; 2 — дальний передвижной детектор

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (договор № 14-22-03055-офи.м). Значительный вклад в данное исследование внесен поставкой жидкого сцинтиллятора из лаборатории, возглавляемой профессором Юн Као (Институт физики высоких энергий, Пекин, Китай).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.* // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. P. 054615.
2. *Mention G., Fechner M., Lasserre Th., Mueller Th. A., Lhuillier D., Cribier M., Letourneau A.* // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 83. P. 073006.
3. *Serebrov A. P., Ivochkin V. G., Samoilov R. M., Fomin A. K., Polyushkin A. O., Zinoviev V. G., Neustroev P. V., Golovtsov V. L., Chernyj A. V., Zherebtsov O. M., Martemyanov V. P., Tarasenkov V. G., Aleshin V. I., Petelin A. L., Ishutov A. L., Tuzov A. A., Sazontov S. A., Ryazanov D. K., Gromov M. O., Afanasiev V. V., Zaytsev M. E., Chai-kovskii M. E.* // *Tech. Phys.* 2017. V. 62. P. 322; arXiv:1605.05909.
4. *Serebrov A. P., Ivochkin V. G., Samoilov R. M., Fomin A. K., Polyushkin A. O., Zinoviev V. G., Neustroev P. V., Golovtsov V. L., Chernyj A. V., Zherebtsov O. M., Martemyanov V. P., Tarasenkov V. G., Aleshin V. I., Petelin A. L., Ishutov A. L., Tuzov A. A., Sazontov S. A., Ryazanov D. K., Gromov M. O., Afanasiev V. V., Zaytsev M. E., Chai-kovskii M. E.* // *JETP Lett.* 2017. V. 105, No. 6. P. 329; arXiv:1702.00941.
5. *Danilov M. V.* // *The 52nd Rencontres de Moriond Electroweak Interactions and Unified Theories, Thuile, March 24, 2017*; <https://goo.gl/c8WUsV>.
6. *Giunti C.* // *XXVII Intern. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics "Neutrino 2016"*, London, July 4–9, 2016; <https://goo.gl/v1WrUi>.
7. *Li Y.-F.* // *Applied Anti-Neutrino Physics 2016, University of Liverpool, Merseyside, UK, Dec. 1–2, 2016*; <https://goo.gl/m2OJlj>.
8. *Achkar B., Aleksan R., Avenier M., Bagieu G., Bouchez J., Brissot R., Cavaignac J.-E., Collot J., Cousinou M.-C., Cussonneau J. P., Declais Y., Dufour Y., Favier J., Garciaz F., Kajfasz E., de Kerret H., Koang D. H., Lefivre B., Lesquoy E., Mallet J., Metref A., Nagy E., Pessard H., Pierre F., Obolensky M., Stutz A., Wuthrick J. R.* // *Nucl. Phys. B.* 1995. V. 434. P. 503–532.
9. *Ko Y. J., Kim B. R., Kim J. Y., Han B. Y., Jang C. H., Jeon E. J., Joo K. K., Kim H. J., Kim H. S., Kim Y. D., Lee J., Lee J. Y., Lee M. H., Oh Y. M., Park H. K., Park H. S., Park K. S., Seo K. M., Kim S., Sun G. M.* // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P. 121802.