

ЭКСПЕРИМЕНТ ДАНСС: ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

И. Г. Алексеев^{1,2}

Эксперимент ДАНСС – это сцинтилляционный спектрометр реакторных антинейтрино, расположенный на 4-ом энергоблоке Калининской АЭС примерно в 300 км к северо-западу от Москвы. Основной фундаментальной задачей эксперимента является поиск стерильных нейтрино. Эксперимент был запущен в апреле 2016 года, а с октября 2016 года ведется регулярный набор статистики. К марту 2023 года ДАНСС зарегистрировал 7.7 млн событий обратного бета-распада и установил обширную область ограничений на существование стерильных нейтрино. В районе наибольшей чувствительности область ограничения составляет до $\sin^2 2\theta = 5 \cdot 10^{-3}$. Наблюдение мощности реактора в течение 6.5 лет демонстрирует разброс, не связанный со статистикой отдельных измерений, на уровне менее 0.5%, что свидетельствует о точности измерения мощности стандартными системами АЭС на уровне не хуже 0.5%. Тестирование сцинтилляционных детекторов, предназначенных для модернизации эксперимента, на пучке ускорителя продемонстрировало световыход более 140 ф.э./МэВ. Настоящая статья посвящена результатам эксперимента, полученным за последний год и планам по модернизации установки.

Ключевые слова: нейтринные осцилляции, стерильные нейтрино, реакторные антинейтрино, сцинтилляционный детектор, кремниевый фотоумножитель.

Введение. Со времени предложения Вольфгангом Паули гипотезы о существовании нейтрино физики никогда не теряли интерес к исследованию этой частицы. В настоящее

¹ НИЦ “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: igor.alekseev@itep.ru.

время возможность существования стерильных нейтрино является одним из немногих предположений о физике вне рамок Стандартной модели со значимостью экспериментальных свидетельств на уровне более 5σ . Выделяют несколько аномалий: ускорительная аномалия [1, 2], когда в пучке мюонных нейтрино обнаруживается избыток электронных нейтрино; галлиевая аномалия [3–5], когда обнаруживается недостаток электронных нейтрино от мощного радиоактивного источника, регистрируемых детектором на основе галлия, и реакторная аномалия [6, 7], когда обнаруживается недостаток реакторных антинейтрино. Все эти наблюдения происходят на короткой базе, что исключает интерпретацию наблюдаемых эффектов в рамках стандартных трехнейтринных осцилляций. Несмотря на достаточно большое количество экспериментальных свидетельств, вопрос еще не кажется решенным. Есть работы, в которых осцилляции на коротких расстояниях не наблюдаются, например [8, 9], подвергается серьезному сомнению наличие недостатка реакторных антинейтрино [10, 11] или выражаются серьезные сомнения в результатах ранее выполненного анализа [12, 13].

Установка ДАНСС [14] расположена непосредственно под биологической защитой реактора 4-го энергоблока Калининской АЭС. Такое расположение обеспечивает, с одной стороны, максимально высокий поток антинейтрино ($\sim 5 \cdot 10^{13} \bar{\nu}_e / \text{см}^2 / \text{с}$), а с другой – создает заметную по сравнению с другими наземными экспериментами защиту от космических лучей. В то же время для проведения эксперимента в данном помещении было необходимо выполнить требования по отсутствию легкогорючих материалов, что исключило возможность использования жидкого сцинтиллятора. Чувствительный объем ДАНСС собран из 2500 пластин (стрипов) сцинтиллятора на основе полистирола. Стрипы имеют сечение $40 \times 10 \text{ мм}^2$, длину 1 м и располагаются слоями по 25 стрипов в каждом. Стрипы в соседних слоях имеют взаимно-перпендикулярное направление. Сбор света осуществляется с помощью спектросмещающих волокон, уложенных в три канавки вдоль стрипа. Свет с центрального волокна поступает на кремниевый фотомножитель (КФУ). Два крайних волокна объединяются в группах по 50 стрипов и выводятся на вакуумный ФЭУ. Чувствительный объем детектора имеет размер 1 м^3 и окружен многослойной пассивной защитой из меди, борированного полиэтилена и свинца. Снаружи от пассивной защиты по 5 сторонам детектора, кроме нижней, расположено активное вето из сцинтилляционных счетчиков. Детектор расположен на подвижной платформе и может перемещаться в диапазоне 10.9–12.9 м от центра реактора. Это позволяет выполнить поиск стерильных нейтрино независимо от моделей спектра, других измерений или абсолютной эффективности установки.

Данные и результаты. График набора статистики за все время работы установки показан на рис. 1. На настоящий момент нами полностью обработаны данные от начала до марта 2023 года, и всего в диапазоне энергий позитрона 0.75–8 МэВ набранная статистика составляет 7.7 млн событий обратного бета-распада. Это на 1.5 млн событий больше, чем было год назад, когда была обработана статистика до марта 2022 года [15].

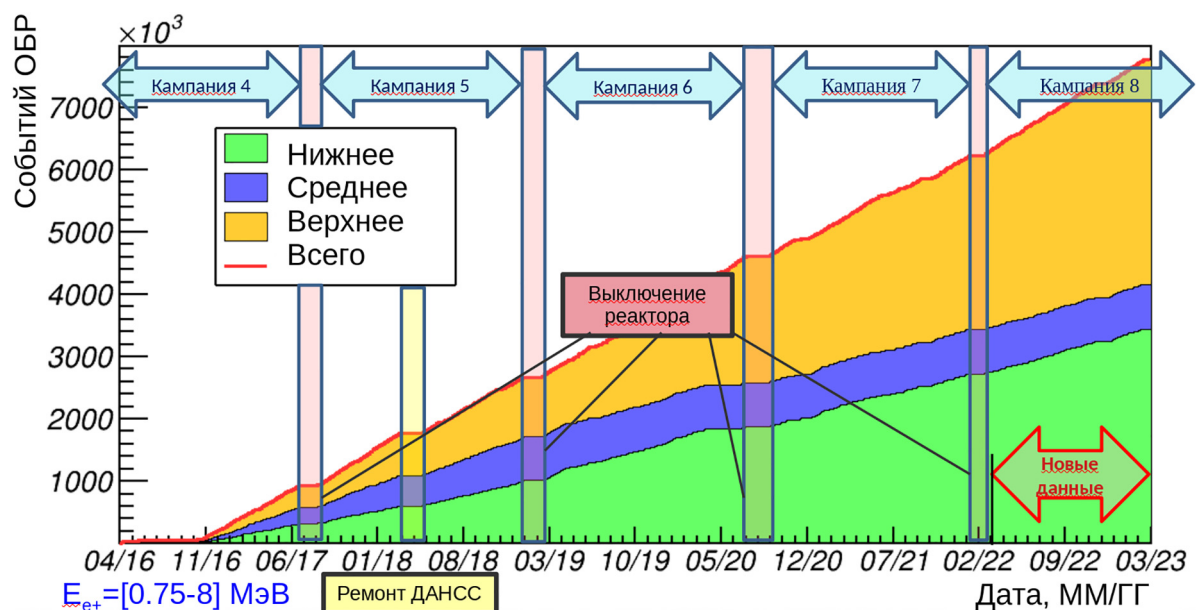


Рис. 1: График набора статистики. Показаны данные в диапазоне энергий позитрона 0.75 – 8 МэВ.

На рис. 2 показаны результаты измерения мощности реактора по потоку антинейтрино в сравнении с измерениями, выполняемыми на станции. Счет нейтрино был нормирован по периоду в ноябре 2016 года в самом начале регулярного набора статистики. Данные поправлены на положение детектора, его эффективность, вычисляемую исходя из моделирования с учетом неработающих каналов, и на изменение долей делений основных изотопов ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu , связанное с выгоранием топлива. Уже измерения ДАНСС в течение полутора лет показали отсутствие статистически значимых отклонений измерений по потоку антинейтрино от измерений тепловой мощности стандартной аппаратурой станции [16]. В настоящий момент история измерений насчитывает 6.5 лет. На рис. 3 показано распределение отклонений отдельных измерений мощности по счету событий обратного бета-распада от стандартных измерений тепловой мощности, нормированное на ошибку измерений по событиям обратного бета-распада. Среднеквадратичное отклонение этого распределения составляет $\sigma = 1.054$, что прак-

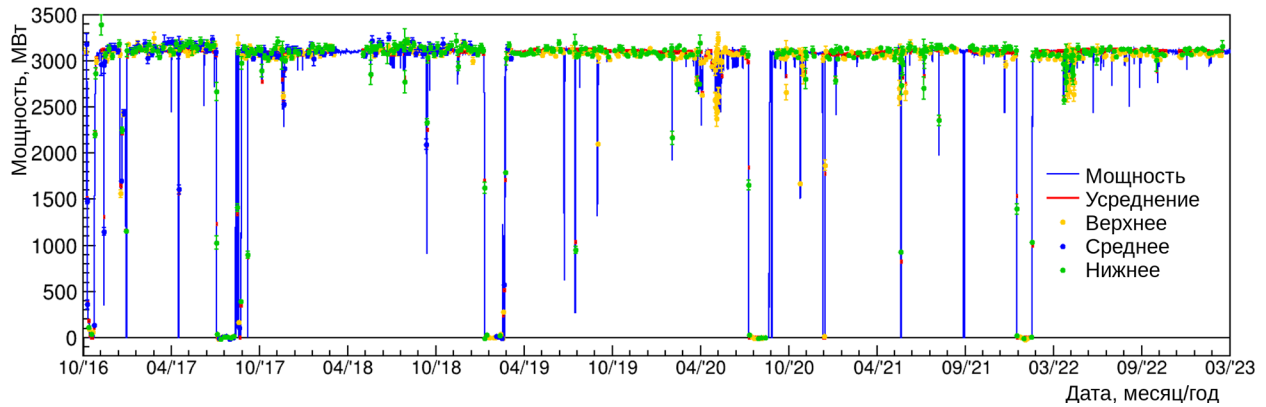


Рис. 2: Измерение мощности реактора по потоку антинейтрино. Синяя линия соответствует измерению мощности, выполняемому персоналом АЭС. Усреднение этих измерений по периоду набора каждой точки в эксперименте ДАНСС показано красными горизонтальными отрезками. Желтые, синие и зеленые точки с ошибками — измерения ДАНСС по потоку антинейтрино, выполненные в соответствующем положении детектора.

тически совместимо с чисто статистическим разбросом. Ошибка одиночных измерений, использованных в этих графиках $\sim 1.5\%$, и только эти ошибки были использованы в нормировке. Отличие $\sigma = 1.054$ от единицы говорит, что суммарный вклад остальных ошибок не превышает 0.5% по мощности, т. е., с одной стороны, у нас на протяжении 6.5 лет сохранилась изначальная калибровка детектора, а с другой, что точность измерений мощности стандартной аппаратурой АЭС не хуже 0.5% .

Для поиска стерильных нейтрино используется статистика, набранная, начиная с октября 2016 года, когда была полностью собрана система вето и стартовало регулярное движение детектора. Из статистики исключено несколько периодов, когда доступ к установке был затруднен и положение детектора не менялось более двух недель, и период летом 2021 года, когда нестабильно работала система оцифровки. В качестве экспериментальной величины, которая сравнивается с расчетом по Монте-Карло в предположении наличия осцилляций или их отсутствия, используется отношение счетов в разных положениях установки $N(E)$ как функция энергии позитрона, а именно $N_{\text{bot}}(E)/N_{\text{top}}(E)$ и $N_{\text{mid}}(E)/\sqrt{N_{\text{bot}}(E) \cdot N_{\text{top}}(E)}$, где индексы *top*, *bot* и *mid* относятся к верхнему, среднему и нижнему положениям детектора, соответственно. Из опасения возможной систематики при малых энергиях и в связи с маленькой статистикой при больших энергиях. Для вычисления χ^2 используется только диапазон энергий позитро-

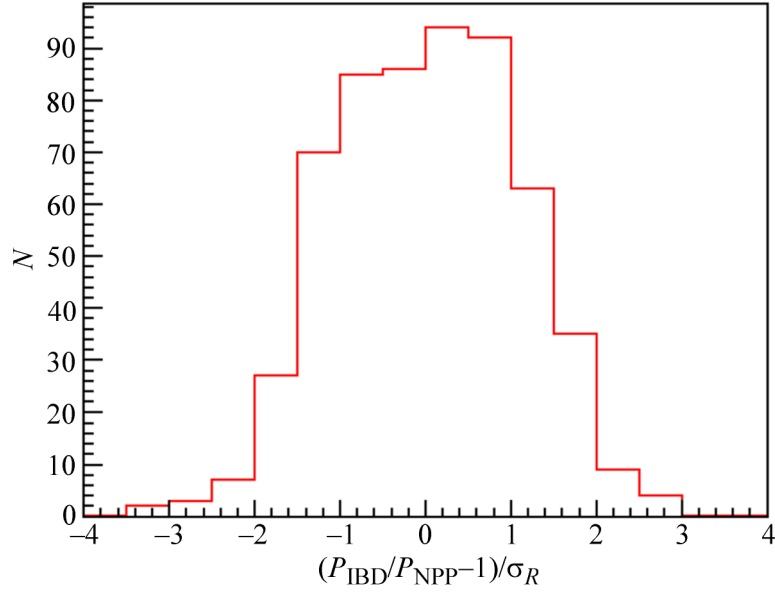


Рис. 3: Распределение отклонений от единицы отношения мощности реактора по потоку антинейтрино к тепловой мощности, измеренной персоналом АЭС, $R = P_{\text{IBD}}/P_{\text{NPP}} - 1$, нормированное на ошибку отношения σ_R .

на 1.5–6 МэВ. Ограничение снизу связано с возможно недостаточно хорошо изученными систематическими ошибками в этой области, а сверху – с недостатком статистики. С учетом этих ограничений суммарная статистика, использованная непосредственно в поиске стерильных нейтрино составила 5.5 млн событий. На рис. 4 слева представлена разница между χ^2 [17] с возможной осцилляцией нейтрино в стерильное состояние и без такой возможности. Диапазон по оси z представлен цветом и охватывает 3σ . При этом красный цвет соответствует улучшению χ^2 для гипотезы с 4-мя нейтрино, и, соответственно, переходу разности $\chi_{4\nu}^2 - \chi_{3\nu}^2$ в отрицательную область. Выделяются две области, где такое улучшение заметно, но рассчитанная методом Feldman-Cousins значимость лучшей точки составляет 2.1σ , что явно не позволяет говорить о наличии указаний на существование стерильных нейтрино. Для получения области исключения был использован метод Gaussian CLs, описанный в работе [18]. В области наибольшего ограничения достигнуто значение квадрата синуса угла смешивания $\sin^2 2\theta = 5 \cdot 10^{-3}$.

Длительная стабильная работа установки и хорошее понимание ее эффективности позволили кроме модельно-независимого анализа, основанного только на относительных счетах в разных положениях детектора, выполнить анализ с учетом абсолютных счетов. Для проведения этого анализа была использована модифицированная функция

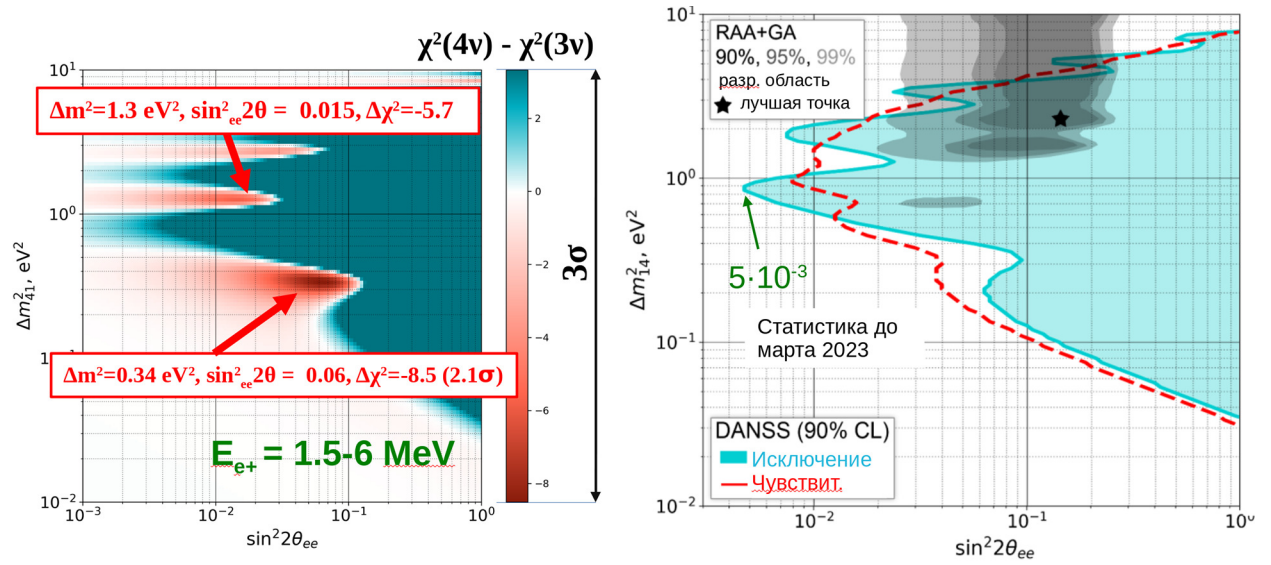


Рис. 4: Поиск стерильных нейтрино в эксперименте ДАНСС на статистике с октября 2016 по март 2023 года. На левом рисунке представлена разность χ^2 для гипотезы со стерильным нейтрино и без него. Синяя область соответствует увеличению χ^2 при включении четвертого нейтрино, а красная – уменьшению χ^2 . На правом рисунке показаны область исключения и чувствительность на нынешнем уровне статистики, полученные методом *Gaussian CLs*. Для сравнения показаны разрешенная область (градиациями серого) и лучшая точка (звездочка) совместного анализа реакторной и галлиевой аномалий из работы [6].

χ^2 , в которую был добавлен член, учитывающий абсолютный счет установки [19]:

$$\chi^2 = \chi_{\text{rel}}^2 + ((N_{\text{top}} + N_{\text{mid}} + N_{\text{bot}})^{\text{obs}} - (N_{\text{top}} + k_2 \sqrt{k_1} N_{\text{mid}} + k_1 N_{\text{bot}})^{\text{pre}})^2 / \sigma_{\text{abs}}^2, \quad (1)$$

где χ_{rel}^2 – величина χ^2 , использованная в модельно-независимом анализе и учитывающая только относительные счета [20], $N_{\text{top,mid,bot}}$ – полный счет в каждом из положений детектора, верхние индексы *obs* и *pre* соответствуют зарегистрированному и ожидаемому количеству событий, $k_{1,2}$ – относительные эффективности, учитывающие систематическую ошибку в эффективности детектора в различных положениях, σ_{abs} – систематическая ошибка абсолютного счета¹. Источники этой ошибки приведены в табл. 1. Как видно одним из основных источников систематической ошибки является неопределенность в предсказаниях потока нейтрино. В анализе использовали наиболее консервативную оценку полной систематической ошибки $\sigma_{\text{abs}} = 7\%$. Область исключения была вычис-

¹Статистическая ошибка менее 0.1% и ею можно пренебречь.

лена с помощью метода Gaussian CLs в двух вариантах: на основе модели Huber-Muelер (НМ) [21, 22] и модели на основе измерений из работы [11]. Полученная область исключения перекрывает большую часть области, разрешенной в эксперименте BEST [5]. Параметры осцилляций, указания на которые получены в эксперименте Нейтрино-4 [7], также расположены внутри области исключения и имеют $\Delta\chi^2 = 7.28$ (в случае двух степеней свободы это соответствовало бы исключению на уровне 2.2σ). Если для потока нейтрино вместо модели НМ использовать модель на основе измерений из работы [11], то ограничения только усиливаются.

Т а б л и ц а 1

Оценка систематической ошибки в измерении абсолютного счета детектора

Источник систематической ошибки	Ошибка
Количество протонов	2%
Критерии отбора событий	2%
Геометрия (расстояние до центра активной зоны и распределение делений по объему реактора)	1%
Доли делений (от Калининской АЭС)	2%
Средняя энергия деления [26]	0.3%
Мощность ректора (от Калининской АЭС)	1.5%
Фоны	0.5%
Все без учета предсказаний потока нейтрино	4%
Предсказания потока нейтрино	2–5%
Суммарная ошибка	5–7%

Модернизация установки. Основным недостатком действующей установки является не очень хорошее энергетическое разрешение ($\sigma = 32\%$ при энергии позитрона 1 МэВ). Такое разрешение уменьшает чувствительность эксперимента, в первую очередь, при больших Δm^2 . Это обусловлено в основном неоднородным светосбором и не очень хорошим световыходом имеющихся стрипов [23]. В рамках модернизации планируется заменить стрипы, образующие чувствительный объем детектора, сохранив пассивную защиту, подъемный механизм и систему оцифровки. Главным усовершенствованием установки будет новая конструкция стрипов. Поперечный разрез нового стрипа показан на рис. 5. Новый стрип имеет в два раза большую толщину и 8 канавок со спектросмещающими волокнами, которые расположены на верхней и нижней гранях. Такая конструкция позволит существенно повысить однородность светосбора. Кроме того, счи-

тывание будет выполняться с обоих концов стрипа, что даст возможность получения продольной координаты по разности времен прихода сигнала и по соотношению амплитуд. Новая концепция детектора предполагает отказ от использования вакуумных ФЭУ в пользу считывания только с помощью КФУ. При этом освободившееся внутри пассивной защиты место будет использовано для увеличения длины стрипов на 20 см, что вместе с увеличением на 20 см высоты сборки стрипов дает увеличение на 70% чувствительного объема. Первоначальная конструкция новых стрипов подразумевала, что каждое волокно считывается только с одной стороны, а вторая покрыта зеркальной краской. Такие стрипы были испытаны на пионном пучке синхроциклотрона СЦ-1000 (Гатчина) [24]. Дальнейшее улучшение характеристик можно получить, используя считывание с обоих концов каждого волокна. При этом основную сложность представляет создание надежного оптического разъема. В новой конструкции стрипов были использованы недавно появившиеся спектросмещающие волокна KURARAY YS-2, которые по сравнению с использовавшимися ранее Y11 обладают почти в два раза меньшим временем высвечивания [25]. Испытания новых стрипов с 16 КФУ в каждом были выполнены в ноябре 2022 года на мюонном пучке синхротрона У-70 (Протвино). На рис. 6 показаны продольный и поперечный профили световыхода. Получен достаточно высокий (более 140 ф.э./МэВ) световыход² вместе с очень хорошей однородностью. Оценка энергетического разрешения, сделанная на основе полученных характеристик новых стрипов, демонстрирует возможность достижения основной цели модернизации установки, а именно: выхода на энергетическое разрешение 12% при 1 МэВ.

Заключение. Эксперимент ДАНСС начал свою работу в апреле 2016 года. Уже записано 7.7 млн событий обратного бета-распада, набор статистики продолжается. В эксперименте выполнено мониторингирование мощности реактора в течение 6.5 лет. При этом точность определения мощности по потоку антинейтрино составила примерно 1.5% за 2 дня набора статистики, а отклонение, не связанное со статистикой зарегистрированных событий, не превышает 0.5%. На данных, записанных до марта 2023 года, выполнен поиск стерильных нейтрино. Обнаружено две сравнимых по $\Delta\chi^2$ точки на плоскости параметров осцилляций, где можно предполагать наличие сигнала от стерильного нейтрино, но рассчитанная по методу Feldman-Cousins значимость лучшей из них составляет 2.1σ , что нельзя воспринимать даже как указание на существование стерильного нейтрино. Полученная методом Gaussian CLs область исключения охватывает большую часть области, разрешенной в рамках совместного анализа реакторной

²Средний световыход современных стрипов составляет 35 ф.э./МэВ.

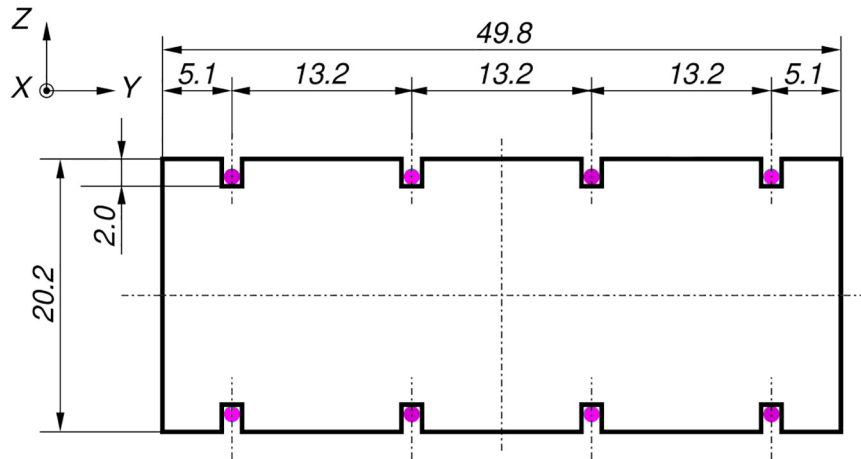


Рис. 5: Поперечное сечение нового стрипа. Малиновым цветом показаны лежащие во фрезерованных канавках спектросмещающие волокна.

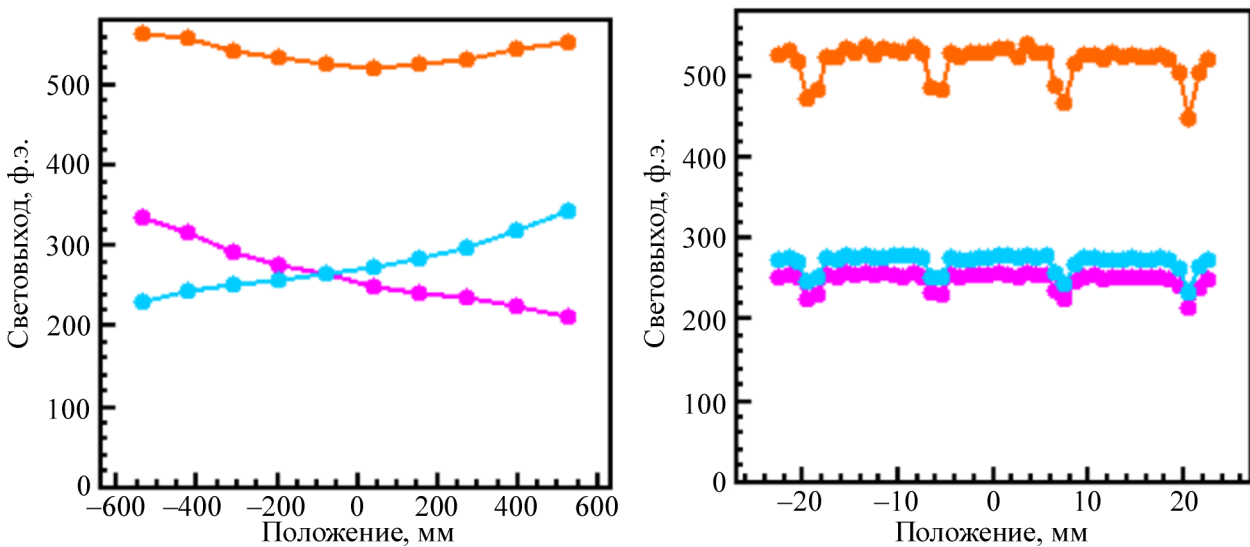


Рис. 6: Измеренные на мюонном пучке синхротрона У-70 (Протвино) продольный (слева) и поперечный в середине стрипа (справа) профили световыхода. Малиновым и голубым обозначены результаты для двух разных концов стрипа, а оранжевым их сумма.

и галлиевой аномалий [6]. В рамках работ по модернизации эксперимента разработана новая концепция основных сцинтилляционных детекторов. Новые детекторы с 16 КФУ и быстрым спектросмещающим волокном KURARAY YS-2 испытаны на пучке синхротрона У-70 и продемонстрировали световыход более 140 ф.э./МэВ при высокой однородности светосбора.

Коллаборация ДАНСС благодарна администрации Калининской АЭС и персоналу Отдела радиационной безопасности за постоянные помощь и поддержку. Настоящая работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-12-00085, <https://rscf.ru/project/23-12-00085>.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] LSND Collab. (A. Aguilar et al.), Phys. Rev. D **64**, 112007 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevD.64.112007.
- [2] MiniBooNE Collab. (A. Aguilar-Arevalo et al.), Phys. Rev. Lett. **121**, 221801 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.221801.
- [3] GALLEX Collab. (F. Kaether et al.), Phys. Lett. B **685**, 47 (2010). DOI: 10.1016/j.physletb.2010.01.030.
- [4] SAGE Colab. (J. N. Abdurashitov et al.), Phys. Rev. C **80**, 015807 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevC.80.015807.
- [5] BEST Collab. (V. V. Barinov et al.), Phys. Rev. Lett. **128**, 232501 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.232501.
- [6] G. Mention, M. Fechner, Th. Lasserre, et al., Phys. Rev. D **83**, 073006 (2011). DOI: doi.org/10.1103/PhysRevD.83.073006.
- [7] А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов и др., Письма в ЖЭТФ **109**, 209 (2019). DOI: 10.1134/S0370274X19040015.
- [8] MicroBooNE Collab. (C. A. Argüelles et al.), Phys. Rev. Lett. **128**, 241802 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.241802.
- [9] DANSS Collab. (I. Alekseev et al.), Phys. Lett. B **787**, 56 (2018). DOI: 10.1016/j.physletb.2018.10.038.
- [10] M. Estienne, M. Fallot, A. Algora, et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 022502 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.022502.
- [11] V. Kopeikin, M. Skorokhvatov, O. Titov, Phys. Rev. D **104**, L071301 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.104.L071301.
- [12] В. М. Данилов, Н. А. Скробова, Письма в ЖЭТФ **112**, 211 (2020). DOI: 10.31857/S123456782019009X.
- [13] C. Giunti, Y. F. Li, C. A. Ternes, Y. Y. Zhang, Phys. Lett. B **816**, 136214 (2021). DOI: 10.1016/j.physletb.2021.136214.
- [14] DANSS Collab. (I. Alekseev et al.), JINST **11**, P11011 (2016). DOI: 10.1088/1748-0221/11/11/P11011.

- [15] Igor Alekseev on behalf of the DANSS collaboration, PoS **421**, 017 (2023). DOI: 10.22323/1.421.0017.
- [16] DANSS Collab. (И. Г. Алексеев и др.), Ядерная физика **82**(5), 1 (2019). DOI: 10.1134/S0044002719050040.
- [17] Н. А. Скрובה, Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(9), 26 (2020). DOI: 10.3103/S1068335620090067.
- [18] X. Qian, A. Tan, J. J. Ling, et al., Nucl. Inst. Meth. A **827**, 63 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.089.
- [19] Н. А. Скрובה, Краткие сообщения по физике ФИАН, в печати (2023).
- [20] N. Skrobova for the DANSS Collaboartion, J. Phys. Conf. Ser. **1690**, 012173 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012173.
- [21] P. Huber, Phys. Rev. C **84**, 024617 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevC.84.024617.
- [22] Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, et al., Phys. Rev. C **83**, 054615 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevC.83.054615.
- [23] И. Г. Алексеев, Д. В. Калинин, И. В. Мачихильян и др., Приборы и техника эксперимента **2018**(3), 10 (2018). DOI: 10.7868/S0032816218030035.
- [24] DANSS Collab. (I. Alekseev et al.), JINST **17**, P04009 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/04/P04009.
- [25] I. Alekseev, M. Danilov, V. Rusinov, et al., JINST **17**, P01031 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/01/P01031.
- [26] X. B. Ma, W. L. Zhong, L. Z. Wang, et al., Phys. Rev. C **88**, 014605 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevC.88.014605.

Поступила в редакцию 1 ноября 2023 г.

После доработки 22 декабря 2023 г.

Принята к публикации 25 декабря 2023 г.

Публикуется по материалам, представленным автором от коллаборации ДАНСС на Конференции Европейского физического общества по физике высоких энергий (EPS-HEP2023), 21–25 августа 2023 года, Гамбург, Германия.