

## ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА DANSS К НЕЙТРИННЫМ ОСЦИЛЛЯЦИЯМ

Н. А. Скрובהва<sup>1–3</sup>

*Детектор DANSS представляет собой высокосегментированный сцинтилляционный детектор с чувствительным объемом 1 м<sup>3</sup>. Детектор установлен на Калининской АЭС под ядром реактора на движущейся платформе. Расстояние от центра детектора до центра реактора изменяется от 10.7 до 12.7 м. Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного бета-распада. Детектор регистрирует около 5000 событий в день с уровнем фона порядка нескольких процентов. Поиск стерильных нейтрино ведется в предположении модели трех активных и одного стерильного нейтрино. Область исключения в пространстве параметров  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$  основывается только на отношении энергетических спектров позитронов, полученных на разных расстояниях от детектора до ядра реактора. Таким образом, результаты не зависят от абсолютной эффективности детектора или от предсказанных потоков антинейтрино. Чувствительность эксперимента получена с помощью гауссовского  $CL_s$  метода с учетом систематических ошибок. Полученная в эксперименте область исключения покрывает широкий диапазон значений и находится в разумном согласии с областью чувствительности. Произведены оценки области чувствительности для модернизированного детектора.*

**Ключевые слова:** нейтринные осцилляции, стерильные нейтрино, сцинтиллятор, ядерный реактор.

*Введение.* В настоящий момент имеется целый ряд указаний на существование стерильного нейтрино, которое, в отличие от трех известных типов нейтрино, не рождается

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nataliya.skrobova@yandex.ru.

<sup>2</sup> ИТЭФ НИЦ “Курчатовский институт”, 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25.

<sup>3</sup> МФТИ, 141701 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

в распадах  $Z$ -бозона (см., напр., недавний обзор [1]). Обнаружение стерильного нейтрино означало бы существование Новой физики за рамками Стандартной модели. Одной из целей проекта DANSS является поиск осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное нейтрино. Анализ ведется в модели с тремя активными и одним стерильным нейтрино. В случае существования стерильного нейтрино часть электронных антинейтрино будет переходить в стерильные, что приведет к осцилляциям числа электронных антинейтрино в зависимости от расстояния. Для реакторных антинейтрино вероятность не проосциллировать (выжить) на коротких расстояниях задается формулой

$$1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_\nu [\text{MeV}]} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta m_{14}^2 = m_4^2 - m_1^2$  – разность квадратов собственных массовых состояний нейтрино,  $\sin^2 2\theta_{14}$  – параметр смешивания,  $E_\nu$  – энергия антинейтрино, а  $L$  – расстояние от точки рождения до точки детектирования.  $\Delta m_{14}^2$  ожидается довольно большой,  $\sim 1 \text{ эВ}^2$ , что много больше, чем разность квадратов масс уже известных нейтрино. Поэтому на коротких расстояниях известными осцилляциями нейтрино можно пренебречь.

Таким образом, наличие стерильного состояния нейтрино вносило бы зависящее от расстояния искажение в энергетический спектр реакторных антинейтрино. При измерении спектра на двух расстояниях одним и тем же детектором полученные результаты не зависят от абсолютной эффективности детектора или теоретических предсказаний. Детектор DANSS измеряет спектр на расстояниях 10.7 м (верхнее положение) и 12.7 м (нижнее положение) от центра ядра реактора, а затем отношение спектров сравнивается с предсказаниями для случаев как наличия, так и отсутствия стерильного нейтрино. Регистрация антинейтрино происходит при помощи реакции обратного бета-распада

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, \quad \text{где } E_{\bar{\nu}} = E_{e^+} + 1.80 \text{ МэВ}. \quad (2)$$

Целью данной работы является оценка области чувствительности эксперимента DANSS к осцилляциям реакторных антинейтрино в стерильные для различных значений параметров  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$ , а также предсказание чувствительности эксперимента DANSS после модернизации.

*Детектор DANSS.* DANSS [2] представляет собой сцинтилляционный детектор объемом около  $1 \text{ м}^3$ , разбитый на 2500 ячеек и окруженный, для подавления внешнего радиационного и нейтронного фона, многослойной комбинированной пассивной защитой из меди, свинца и борированного полиэтилена. Для дискриминации фона от космического излучения используется активная защита – плоские сцинтилляционные счетчики,

расположенные поверх пассивной защиты. Детектор установлен на Калининской АЭС под ядром реактора на движущейся платформе. Окружающие материалы в здании энергоблока обеспечивают защиту от космических частиц (подавление мюонов в 6 раз).

*Моделирование спектров.* Моделирование спектров позитронов, зарегистрированных детектором, производилось для каждой точки сетки в пространстве параметров  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$  для двух положений детектора. В этих расчетах учитывались следующие факторы: теоретический спектр  $\tilde{\nu}_e$  [3, 4] (конечный результат не зависит от выбора теоретической модели, поскольку используется только отношение спектров), сечение реакции обратного бета-распада [5], размеры детектора и реактора, усредненный профиль горения реактора (данные предоставлены КАЭС), энергетическое разрешение детектора, полученное моделированием в системе GEANT4, вероятность осцилляций (1), телесный угол ( $\sim 1/L^2$ ).

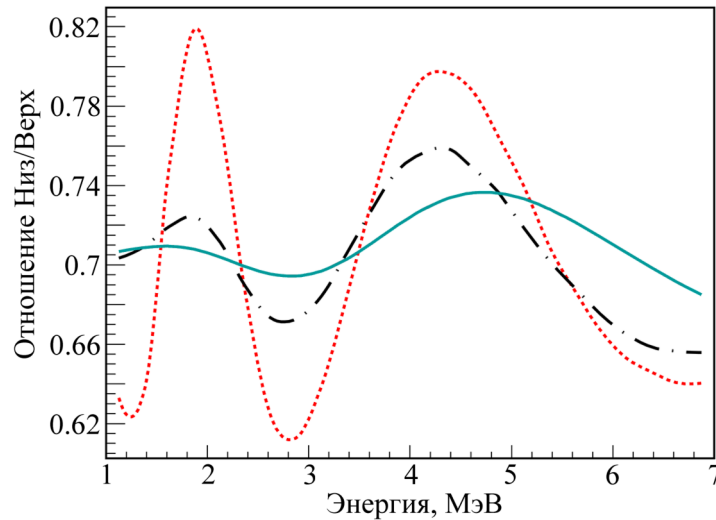


Рис. 1: Смоделированное отношение спектров в нижнем и верхнем положениях детектора с параметрами осцилляций  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.14$ ,  $\Delta m_{14}^2 = 2.3 \text{ eV}^2$ . Пунктирная линия – идеальное энергетическое разрешение и точечный реактор, штрихпунктирная линия – идеальное энергетическое разрешение и реальные размеры реактора, сплошная линия – реальные условия.

На рис. 1 представлены смоделированные отношения спектров позитронов, зарегистрированных в нижнем и верхнем положениях при наличии осцилляций. Для каждой точки в пространстве параметров  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$  экспериментальное отношение спектров сравнивается с теоретическими предсказаниями для гипотез отсутствия осцилляций и наличия осцилляций путем расчета разности  $\chi^2$  между соответствующими

гипотезами. Для определения уровня достоверности использовался гауссов  $CL_s$  метод [6]. При отсутствии осцилляций отношение спектров представляет собой константу.

*Чувствительность.* Для определения чувствительности эксперимента DANSS к осцилляциям реакторных антинейтрино в стерильные производилось множество численных экспериментов. Моделировалось отношение энергетических спектров позитронов на двух расстояниях с учетом экспериментальных ошибок, соответствующих набранной в эксперименте DANSS статистике [2], в предположении отсутствия осцилляций. Далее для каждого численного эксперимента для сетки значений  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$  вычислялся  $\chi^2$  для различия между сгенерированным отношением спектров и теоретическим предсказанием для гипотезы отсутствия стерильного нейтрино, а также  $\chi^2$  для различия между сгенерированным отношением спектров и теоретическим предсказанием для гипотезы наличия осцилляций с текущими  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$ . Далее посредством  $CL_s$  метода определялась граница области исключения для данного численного эксперимента, т.е. области, где с 90%-ным уровнем достоверности осцилляции отсутствуют. В силу статистических флуктуаций у каждого численного эксперимента получается своя область исключения. Для определения чувствительности по  $\sin^2 2\theta_{14}$  для каждого значения  $\Delta m_{14}^2$  строилось распределение количества численных экспериментов, для которых данное значение параметра  $\sin^2 2\theta_{14}$  является границей области исключения по  $\sin^2 2\theta_{14}$ . В полученном распределении определялось медианное значение, которое и считалось границей области чувствительности по  $\sin^2 2\theta_{14}$  для текущего значения  $\Delta m_{14}^2$ .

Было проверено, что результаты такого подхода совпадают с областями чувствительности, полученными без численных экспериментов. В этом случае формируется так называемый “Asimov dataset” – набор точек с ошибками, соответствующими эксперименту [2], и значениями, совпадающими с предсказаниями (здесь для нулевой гипотезы, то есть гипотезы отсутствия стерильного нейтрино). Полученный набор точек сравнивался с осцилляционной гипотезой (для каждого значения  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$ ), и из рассчитанного  $\chi^2$ , как и для результатов эксперимента, посредством  $CL_s$  метода получались ограничения на область чувствительности, т.е. область, где с 90%-ным уровнем достоверности можно различить наличие и отсутствие осцилляций.

На рис. 2 представлена полученная в эксперименте область исключения в пространстве параметров  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$  вместе с рассчитанной областью чувствительности.

В рамках данной работы исследовалась также чувствительность эксперимента после предполагаемой модернизации. Планируется использовать новые сцинтилляционные ячейки с большим световыходом (а значит, лучшим энергетическим разрешением

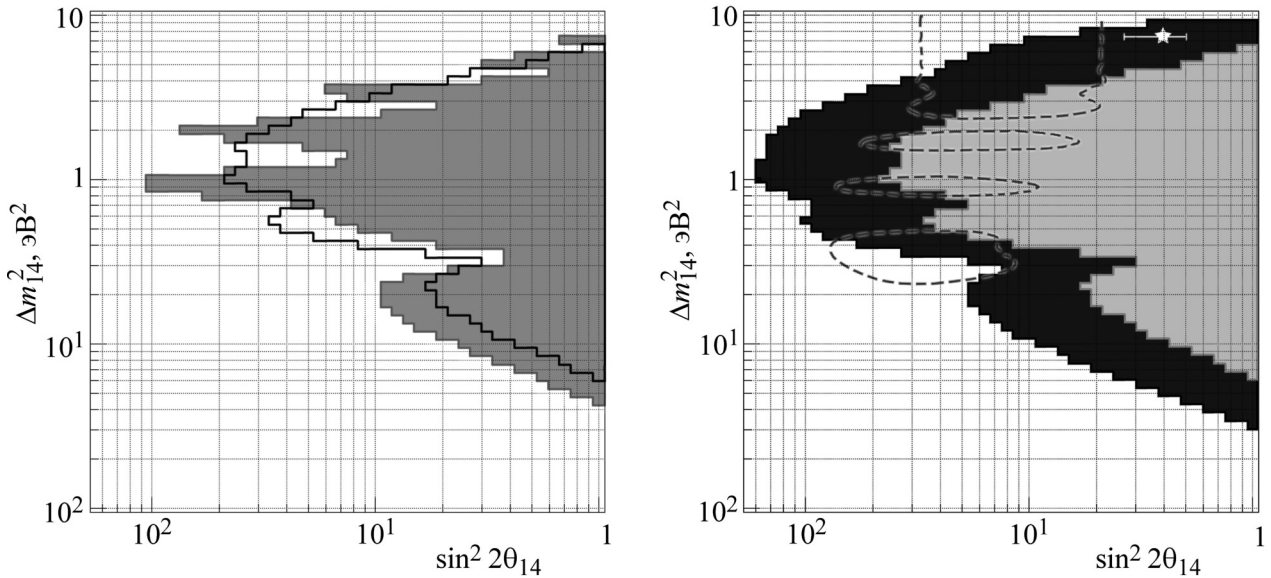


Рис. 2: Полученная в эксперименте [2] область исключения (серая область) и область чувствительности (черный контур) на 90% уровне достоверности.

Рис. 3: Ожидаемая область чувствительности с учетом модернизации на 90% уровне достоверности (темная область), область чувствительности проанализированных данных (светло-серая область), ожидаемые параметры стерильного нейтрино на 95% уровне достоверности (пунктирные контуры см. ссылки внутри [1]), параметры, полученные в эксперименте Нейтрино-4 [7] (белая точка).

$\sim 14\%/\sqrt{E}$ ), и уменьшить расстояние от верхнего положения детектора до реактора. На рис. 3 показана ожидаемая область чувствительности эксперимента ( $\sim 2.5$  года работы) в сравнении с существующей ( $\sim 1.5$  года работы).

*Заключение.* В эксперименте DANSS были получены модельно-независимые пределы на параметры стерильного нейтрино на основании анализа 966 тысяч числа событий, эти пределы находятся в разумном согласии с чувствительностью, обсуждаемой в данной работе, что подтверждает надежность полученных ограничений. Планируемая модернизация детектора позволит существенно увеличить область чувствительности, в том числе при больших значениях  $\Delta m_{14}^2$ , где имеются указания на наличие стерильных нейтрино в эксперименте Нейтрино-4 [7] (белая точка на рис. 3).

Создание детектора поддерживалось Госкорпорацией “РосАтом” в рамках государственных контрактов № Н.4х.44.90.13.1119 и № Н.4х.44.9Б.16.1006, а набор и анализ данных грантом РФФ № 17-12-01145.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Danilov, J. Phys. Conf. Ser. **1390**(1), 012049 (2019); doi: 10.1088/1742-6596/1390/1/012049.
- [2] I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin, et al., Phys. Lett. B **787**(10), 56 (2018); doi: 10.1016/j.physletb.2018.10.038.
- [3] P. Huber, Phys. Rev. C **84**, 024617 (2011); doi: 10.1103/PhysRevC.84.024617.
- [4] Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, et al., Phys. Rev. C **83**, 054615 (2011); doi: 10.1103/PhysRevC.83.054615.
- [5] Alessandro Strumia, Francesco Vissani, Phys. Lett. B **564**, 42 (2003); doi: 10.1016/S0370-2693(03)00616-6.
- [6] X. Qian, A. Tan, J. J. Ling, et al., Nucl. Inst. Meth. A **827**, 63 (2016); doi: 10.1016/j.nima.2016.04.089.
- [7] А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов и др., Письма в ЖЭТФ **109**(3-4), 209 (2019); doi: 10.1134/S0021364019040040.

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г.

После доработки 20 февраля 2020 г.

Принята к публикации 21 февраля 2020 г.

*Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики–2019 (ФИАН, Москва).*