

УДК 539.123

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ DANSS С УЧЕТОМ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СЧЕТА АНТИНЕЙТРИНО В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ

Н. А. Скробова^{1,2}

Детектор DANSS – сцинтилляционный детектор с чувствительным объемом 1 м³, установлен на Калининской АЭС под ядром реактора на движущейся платформе. Расстояние от центра детектора до центра реактора изменяется от 10.9 м до 12.9 м. Детектор регистрирует около 5000 событий обратного бета-распада в день с уровнем фона от космических мюонов порядка двух процентов. В данной работе проводится сравнение анализа по поиску стерильного нейтрино, основанного только на отношении формы спектров на разных расстояниях, и анализа, который помимо формы учитывает изменения в относительных счетах. Обсуждается влияние систематических ошибок, дающих вклад в анализ с использованием относительных счетов. Приводится описание анализа с учетом трех положений детектора.

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

1. *Введение.* В текущий момент существует целый ряд указаний (см., например, недавний обзор [1]) на существование стерильного нейтрино, которое, в отличие от трех известных типов нейтрино, не рождается в распадах Z -бозона. Поиск стерильных нейтрино в эксперименте DANSS ведется в модели с тремя активными и одним стерильным нейтрино. В случае существования стерильного нейтрино часть $\tilde{\nu}_e$ будет переходить в стерильные, что приведет к осцилляциям в числе $\tilde{\nu}_e$ в зависимости от расстояния. Для $\tilde{\nu}_e$ вероятность не проосциллировать (выжить) на коротких расстояниях описывается

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: skrobovana@lebedev.ru.

² Институт Теоретической и Экспериментальной Физики НИЦ “Курчатовский Институт”, 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25.

формулой [2]:

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

где $\Delta m_{14}^2 = m_4^2 - m_1^2$ – разность квадратов масс собственных массовых состояний нейтрино, $\sin^2 2\theta_{14}$ – параметр смешивания, $E_{\tilde{\nu}}$ – энергия $\tilde{\nu}_e$, а L – расстояние от точки рождения до точки детектирования. Поскольку Δm_{14}^2 ожидается довольно большой ($\sim 1 \text{ эВ}^2$) по сравнению с уже известными разностями квадратов масс, то на коротких расстояниях известными осцилляциями нейтрино можно пренебречь.

Таким образом, наличие стерильного состояния нейтрино вносило бы зависящее от расстояния искажение в энергетический спектр реакторных $\tilde{\nu}_e$. Причем, изменяется как форма спектра, так и интегральный счет. При измерении спектра на двух расстояниях одним и тем же детектором полученные результаты не зависят от абсолютной эффективности детектора или теоретических предсказаний относительно потоков $\tilde{\nu}_e$. Детектор DANSS [3], установленный на Калининской АЭС, измеряет спектр на расстояниях от 10.9 м (верхнее положение) до 12.9 м (нижнее положение) от центра ядра реактора, а затем отношение спектров сравнивается с предсказаниями для гипотез со стерильным нейтрино и без. Изменение положения детектора производится каждые 2–3 дня. В данной работе приводится описание и сравнение анализа данных, основанного только на отношении формы спектров, (этот метод использовался в уже опубликованных результатах DANSS [4, 5]) и анализа, который помимо формы учитывает изменения в относительных счетах (его планируется использовать в будущем). Обсуждается использование третьего (среднего, 11.9 м) положения детектора в анализе.

2. *Анализ данных на основе изменения формы спектров.* Регистрация $\tilde{\nu}_e$ происходит при помощи реакции обратного бета-распада (ОБР): $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, где $E_{\tilde{\nu}} \approx E_{e^+} + 1.8 \text{ МэВ}$. В случае анализа с учетом формы спектров, рассчитанное теоретическое предсказание отношения спектров позитронов на разных расстояниях для каждой точки в пространстве параметров Δm_{14}^2 , $\sin^2 2\theta_{14}$ сравнивается с экспериментальным отношением. При расчетах теоретических спектров позитронов учитывались следующие факторы: сечение реакции обратного бета-распада [6], теоретический поток $\tilde{\nu}_e$ [7, 8] (конечный результат не зависит от выбора теоретической модели, поскольку используется только отношение спектров), размеры детектора и реактора и расстояние между ними, усредненный пространственный профиль горения реактора (данные предоставлены КАЭС), энергетическое разрешение детектора, полученное моделированием в системе GEANT4, вероятность осцилляций (1). Тестовая статистика опре-

деляется следующим образом:

$$\chi^2 = \min_{\eta} \sum_{i=1}^N (R_i^{\text{obs}} - k \times R_i^{\text{pre}}(\eta))^2 / \sigma_i^2, \quad (2)$$

где i – энергетический бин, R_i^{obs} (R_i^{pre}) – наблюдаемое (предсказанное) отношение бинов спектров $\tilde{\nu}_e$ в двух положениях детектора, σ_i – статистическая ошибка R_i^{obs} в соответствующем бине, η – параметры систематических неопределенностей, k – относительная эффективность детектора в двух положениях. Свободная вариация параметра k обеспечивает сравнение только формы предсказанного и наблюдаемого отношений спектров. Анализ с учетом только формы спектров – самый модельно-независимый способ анализа.

При рассмотрении систематических неопределенностей учитывались вариации энергетической шкалы детектора ($\pm 2\%$), вариации энергетического разрешения детектора ($\pm 10\%$), уровень космического и равномерного по энергии фонов ($\pm 25\%$ и $\pm 30\%$ соответственно). Форма фона, вызванного космическими мюонами, определялась по событиям с сигналами в счетчиках системы активной защиты (космического вето), а эффективность этой системы определялась во время периодов с выключенным реактором. При этом предполагалось, что все кандидаты в события ОБР обусловлены мюонами, не давшими сигналов в системе активной защиты. Остаточный вклад ($\sim 0.6\%$ от счета в верхнем положении) от соседних реакторов был вычтен. При расчете значения χ^2 для какого-либо набора данных производилась минимизация по параметрам систематических неопределенностей η .

3. *Анализ с учетом относительных счетов.* На протяжении двух лет работы мы наблюдаем, что счет детектора с точностью лучше 1.5% коррелирует с мощностью реактора (после поправок на эволюцию топлива) [9]. Это означает, что вариации абсолютной эффективности детектора σ_{abs} не превышают $\sim 1.5\%$. При сравнении интегрального счета и мощности рассматривались различные эффекты, которые могут оказывать влияние на эффективность детектора в различных положениях по-разному. Большинство из них вносит пренебрежимо малый вклад в относительную эффективность детектора в разных положениях. Мертвое время вычисляется непосредственно из счета детектора в текущем положении. Фон космического излучения немного различается в разных положениях, поэтому для каждой позиции детектора вычитался соответствующей ей космический фон, по числу событий с сигналами в системе космического вето. Эффек-

тивность SiPM зависит от температуры, которая несколько отличается для различных положений. Влияние этого эффекта на счет ОБР составляет не более 0.06%. При анализе учитывалась неидеальность детектора, связанная с наличием неисправных каналов, количество которых иногда менялось. В эффективность детектора вносятся поправки, рассчитанные напрямую из числа неработающих каналов в соответствующем периоде. Из-за частых смен положения детектора эволюция топлива оказывает одинаковое влияние на изменение счета ОБР с течением времени для различных позиций (различие счета, вызванное разницей в среднем составе топливе для нижнего и верхнего положения менее 0.01%). Если существуют медленные изменения эффективности, связанные, например, со старением сцинтиллятора, то они также будут подавлены из-за частой смены позиций (вклад от этого уменьшается быстрее при увеличении числа передвижений детектора, чем вклад статистических флуктуаций). Верхнюю границу в неопределенности в относительной эффективности можно оценить исходя из относительных неопределенностей в абсолютных счетах следующим образом: $\sigma_{abs}/\sqrt{N} \approx 0.2\%$, где N – число передвижений детектора. При этом предполагается, что вариации абсолютной эффективности происходят случайно по времени, но с характерным временем много большим, чем время между передвижениями детектора. Это предположение подтверждается временным графиком зависимости отношения счета событий ОБР и мощности реактора для всех положений детектора. Оценка неопределенности в относительной эффективности детектора в разных положениях, основанная на сравнении счета событий ОБР и мощности реактора (0.2%), оказывается намного более консервативной, чем оценки, основанные на нашем знании детектора (0.06%), и поэтому мы будем ее использовать в дальнейшем анализе.

При учете информации об относительных счетах событий ОБР на разных расстояниях возникает необходимость при расчете χ^2 вводить ограничения на относительную эффективность. Стандартным способом является введение штрафных членов:

$$\chi^2 = \min_{\eta} \sum_{i=1}^N \frac{(R_i^{\text{obs}} - k \times R_i^{\text{pre}}(\eta))^2}{\sigma_i^2} + \frac{(k - k_0)^2}{\sigma_k^2}, \quad (3)$$

где k_0 – номинальное значение относительной эффективности, равное единице, а σ_k^2 – полученная из вышеописанных соображений неопределенность в относительной эффективности. При большой σ_k^2 значения χ^2 будут приближаться к значениям, полученным в анализе с использованием только формы. Малое значение σ_k^2 по сути соответствует фиксации k . На рис. 1 представлены области чувствительности эксперимента в про-

странстве параметров Δm_{14}^2 , $\sin^2 2\theta_{14}$ на 90% уровне достоверности, рассчитанные для различных методов определения тестовой статистики для ~ 2.4 млн событий ОБР, зарегистрированных в трех позициях. Использование информации об относительных счетах позволяет значительно расширить область чувствительности для малых значений параметра Δm_{14}^2 .

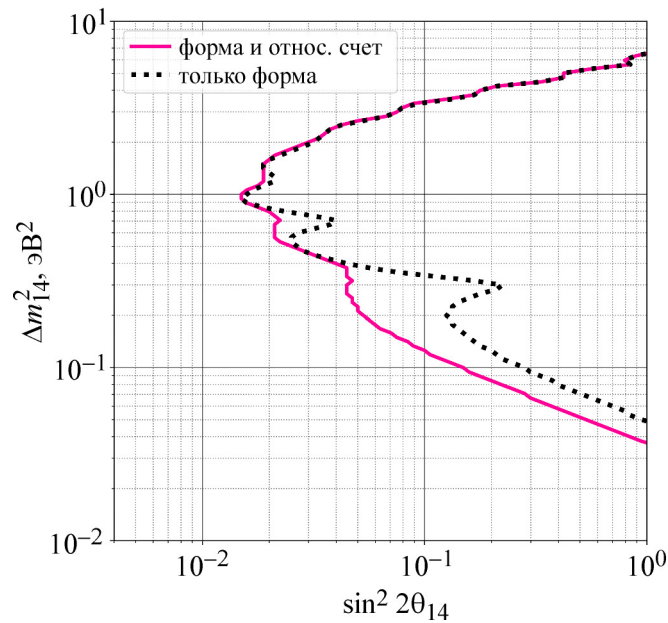


Рис. 1: Области чувствительности эксперимента в пространстве параметров Δm_{14}^2 , $\sin^2 2\theta_{14}$ на 90% уровне достоверности, рассчитанные для анализа только с учетом формы спектров, и для анализа, который также учитывает информацию об относительных счетах. В область чувствительности правее от линий на рисунке входят такие значения параметров Δm_{14}^2 , $\sin^2 2\theta_{14}$, при которых в среднем есть возможность достоверно (здесь на 90% уровне) различить гипотезы отсутствия и наличия осцилляций. Чувствительность оценивалась по результатам большого числа МК экспериментов для 3ν гипотезы [5]. В расчетах уровней достоверности использовался гауссов CL_s метод [10].

4. Анализ с учетом трех положений. Большинство данных в ходе эксперимента набиралось на трех различных расстояниях от детектора до реактора (10.9 м, 11.9 м, 12.9 м). Поэтому в статистический анализ можно ввести и третье положение. Поскольку расстояние между средним положением и нижним (или средним и верхним) в 2 раза меньше, чем расстояние между нижним и верхним, то учет третьего положения увеличивает чувствительность к стерильным нейтрино крайне незначительно. До насто-

ящего момента среднее положение использовалось только для перекрестной проверки результатов. Любая комбинация из счетов детектора в различных положениях, дающая в результате относительное изменение спектра, будет коррелирована с отношением Down/Up. Отсюда возникает необходимость вводить ковариационную матрицу, что делает анализ менее прозрачным. Однако при использовании третьего положения результаты потенциально более стабильны относительно возможных систематических эффектов, которые не были учтены. Обозначим абсолютные (наблюдаемые) счета детектора в каждом из положений как U, D, M (Up, Down, Middle) для каждого бина в энергетическом спектре. Рассмотрим вектор $\mathbf{r}: \mathbf{r} = (Z_1 \ Z_2)^T$, где $Z_i = Z_i^{obs} - Z_i^{pre}$ – разность отношений наблюдаемых и предсказанных счетов, а $Z_1 = D/U, Z_2 = M/\sqrt{D \cdot U}$. Тогда для данного бина $\chi^2 = \mathbf{r}^T \cdot W^{-1} \cdot \mathbf{r}$, где W – ковариационная матрица, а Σ – матрица с ошибками:

$$W = A \cdot \Sigma \cdot A^T,$$

где

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial U} & \frac{\partial Z_1}{\partial M} & \frac{\partial Z_1}{\partial D} \\ \frac{\partial Z_2}{\partial U} & \frac{\partial Z_2}{\partial M} & \frac{\partial Z_2}{\partial D} \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_U^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_M^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_D^2 \end{pmatrix},$$

тогда

$$W = \begin{pmatrix} \frac{D^2}{U^2}((\frac{\sigma_U}{U})^2 + (\frac{\sigma_D}{D})^2) & \frac{M \cdot D}{2U\sqrt{U \cdot D}}((\frac{\sigma_U}{U})^2 - (\frac{\sigma_D}{D})^2) \\ \frac{M \cdot D}{2U\sqrt{U \cdot D}}((\frac{\sigma_U}{U})^2 - (\frac{\sigma_D}{D})^2) & \frac{M^2}{U \cdot D}((\frac{\sigma_U}{2U})^2 + (\frac{\sigma_M}{M})^2 + (\frac{\sigma_D}{2D})^2) \end{pmatrix}.$$

При таком выборе Z_2 недиагональные члены в ковариационной матрице малы по сравнению с диагональными. В анализе с учетом трех положений детектора учитываются те же самые систематические эффекты, что и в анализе с учетом отношения Down/Up. Относительные эффективности фитируются независимо для двух отношений $Z_1 = D/U$ и $Z_2 = M/\sqrt{D \cdot U}$. Область чувствительности в пространстве параметров $\Delta m_{14}^2, \sin^2 2\theta_{14}$ для анализа с тремя позициями показана на рис. 2. Такой анализ позволяет расширить область чувствительности, хотя и весьма незначительно. Это связано с очень небольшой чувствительностью в отношении $M/\sqrt{D \cdot U}$ по сравнению с D/U .

5. *Выводы.* Наряду с самым модельно-независимым методом анализа, основанным на сравнении форм отношений спектров, измеренных на разных расстояниях от детектора до реактора, с предсказанными отношениями спектров позитронов, предлага-

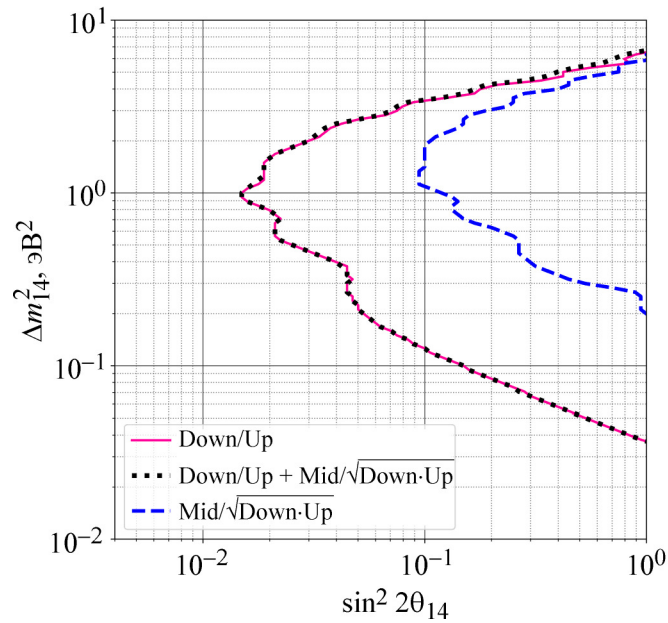


Рис. 2: Области чувствительности эксперимента в пространстве параметров Δm^2_{14} , $\sin^2 2\theta_{14}$ на 90% уровне достоверности, рассчитанные для анализа на основе отношения D/U , с учетом трех позиций, и отдельно с учетом отношения $M/\sqrt{D \cdot U}$. Все перечисленные области получены с использованием информации об относительных счетах для статистики ~ 2.4 млн событий ОБР.

ется использовать анализ, который также учитывает информацию об относительных счетах детектора. При таком подходе возникает необходимость учитывать систематические эффекты, связанные с относительной эффективностью детектора, которые никак не влияли на результаты в предыдущей версии анализа. Была произведена оценка систематической неопределенности в относительной эффективности и продемонстрировано, что при анализе с учетом не только формы, но и относительных счетов, есть возможность существенно расширить область чувствительности в пространстве параметров Δm^2_{14} , $\sin^2 2\theta_{14}$. Приведено описание анализа с учетом данных, набранных во всех трех положениях детектора. Использование третьего положения незначительно расширяет область чувствительности, тем не менее при таком подходе результаты потенциально более стабильны относительно возможных дополнительных систематических эффектов.

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

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] G. Mention et al., Phys. Rev. D **83**, 073006 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.83.073006.
- [3] I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin, et al., JINST **11**(11), P11011 (2016). DOI: 10.1088/17480221/11/11/P11011.
- [4] I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin, et al., Phys. Lett. B **787**(10), 56 (2018). DOI: 10.1016/j.physletb.2018.10.038.
- [5] Н. А. Скробова, Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(4), 3 (2020). DOI: 10.3103/S1068335620040077
- [6] Alessandro Strumia, Francesco Vissani, Phys. Lett. B **564**, 42 (2003). DOI: 10.1016/S0370-2693(03)00616-6.
- [7] P. Huber, Phys. Rev. C **84**, 024617 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevC.84.024617.
- [8] Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, et al., Phys. Rev. C **83**, 054615 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevC.83.054615.
- [9] И. Г. Алексеев, В. В. Белов, В. Б. Бруданин и др., Ядерная Физика **82**(5), 371 (2019). DOI: 10.1134/S0044002719050040.
- [10] X. Qian, A. Tan, J. J. Ling, et al., Nucl. Inst. Meth. A **827**, 63 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.089.

Поступила в редакцию 2 июля 2020 г.

После доработки 21 июля 2020 г.

Принята к публикации 24 июля 2020 г.

Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики–2020 (ФИАН, Москва).