

Комментарий к статье “Анализ результатов эксперимента Нейтрино-4 по поиску стерильного нейтрино и сравнение с результатами других экспериментов” (Письма в ЖЭТФ 112(4), 211 (2020))

М. В. Данилов⁺¹⁾, Н. А. Скробова^{+*}

⁺Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 ГСП-1 Москва, Россия

^{*}Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 117218 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 августа 2020 г.

После переработки 31 августа 2020 г.

Принята к публикации 2 сентября 2020 г.

DOI: 10.31857/S123456782019009X

В работе [1] делается утверждение о наблюдении в эксперименте “Нейтрино-4” осцилляций реакторных антинейтрино в стерильные нейтрино с очень большой разностью квадратов масс ($\Delta m_{41}^2 = 7.25 \text{ эВ}^2$) и угла смешивания ($\sin^2 2\theta_{ee} = 0.26$). Обнаружение стерильного нейтрино означало бы выход за рамки Стандартной Модели. Поэтому важно обсудить обоснованность всех шагов при анализе данных и моделировании детектора.

1. Энергетическое разрешение детектора составляет около 19% при 1 МэВ [2]. Эта оценка получена из приведенных в работе разрешений для сигналов от ^{22}Na ($E = 1.274 \text{ МэВ}$) и от захватов нейтронов на протонах ($E = 2.233 \text{ МэВ}$). Авторы не учитывают в анализе энергетическое разрешение, ссылаясь на значительную ширину шага по энергии (500 кэВ) в анализируемом энергетическом спектре. Однако для больших энергий позитрона, которые наиболее важны для изучения осцилляций с большим значением разности квадратов масс нейтрино, эта ширина совершенно недостаточна. Например, для энергии позитрона, равной 5 МэВ, ширина на полувысоте энергетического разрешения равна 1 МэВ, что в два раза превышает размер шага в спектре. Вне интервала в 500 кэВ попадает более половины сигнала (56% для положения в середине интервала). Эта оценка сделана в предположении, что относительное энергетическое разрешение детектора пропорционально $1/\sqrt{E}$. Наличие постоянного члена в относительном энергетическом разрешении только увеличивает эту оценку. Надо отметить, что проведенное в [2] упрощенное моделирование отклика детектора

на позитроны с заданной энергией, которое не учитывает толщину стенок между секциями, дает много лучшее разрешение (ширина на полувысоте, оцененная из рис. 25 [2], составляет около 700 кэВ для энергии позитрона, равной 5 МэВ), которое слабо зависит от энергии позитрона. Это плохо согласуется с измеренной в [2] шириной сигнала от захвата нейтрона протоном. Но даже в этом случае ширина сигнала больше шага по энергии. Кроме того, энергетический отклик детектора не симметричен. При малых энергиях имеется хвост из-за потери энергии в пассивных слоях детектора. Его также необходимо учитывать при анализе. Естественно ожидать, что такое большое различие между разрешением детектора и шириной используемых интервалов в анализируемых спектрах должно привести к существенному размытию осцилляционной картины, и, как следствие, к существенному изменению результатов. Например, ширина (FWHM) первого минимума в Монте-Карло (МК) предсказаниях для зависимости от L/E на рис. 41 [2] составляет около 0.11. При типичной $L = 7 \text{ м}$ этот минимум соответствует энергии антинейтрино около 5.8 МэВ, т.е. полной (включая аннигиляционные фотоны) энергии позитрона около 5 МэВ. Ошибка в измерении энергии должна составлять $19\% \sqrt{E} = 0.42 \text{ МэВ}$. Это соответствует относительной ошибке в E_ν , равной 7.3%, и ширине первого минимума, равной 0.21, что много больше 0.11. Приведенная оценка не учитывает систематические эффекты, которые должны привести к еще большему размытию осцилляционной кривой. Таким образом, учет энергетического разрешения кардинально изменяет МК предсказания для ос-

¹⁾e-mail: danilov@lebedev.ru

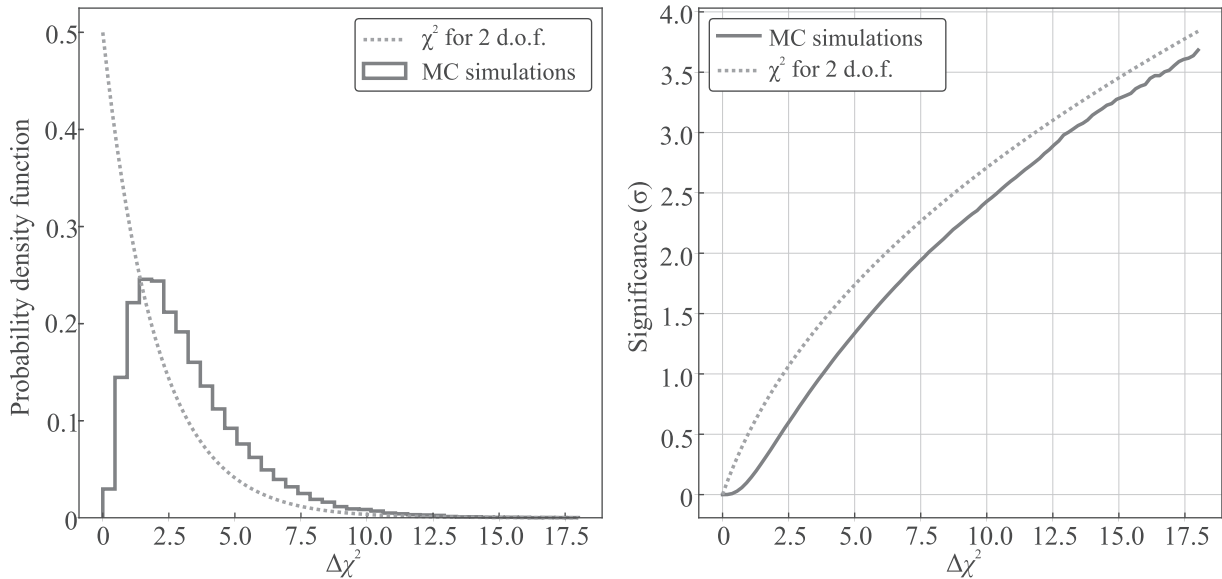


Рис. 1. (Цветной онлайн) Слева: распределение $\chi^2 = \chi_{3\nu}^2 - \chi_{4\nu}^2_{\min}$, полученные для эксперимента DANSS с помощью численных экспериментов (сплошная линия), и согласно теореме Вилкса, т.е. χ^2 с двумя степенями свободы (пунктирная линия); справа: значимость лучшей точки в зависимости от $\Delta\chi^2$

цилляционной кривой и должен сильно повлиять на результаты и их значимость.

2. Использование в анализе спектров с еще меньшим шагом (250 и 125 кэВ) совершенно не оправдано и практически эквивалентно полному отсутствию учета разрешения детектора. Усреднение результатов, полученных с различной шириной шага гистограмм, совершенно не понятно с точки зрения статистики. Усредняются одни и те же экспериментальные данные. Совершенно не ясно, как интерпретировать результаты такого усреднения.

3. Поток антинейтрино в эксперименте измеряется одним и тем же детектором на разных расстояниях от реактора. Это очень эффективный метод для уменьшения систематических ошибок, связанных с различной эффективностью секций детектора и различным фоном. В результате измерения при фиксированных значениях L/E проводятся с помощью разных секций детектора и усредняются, что приводит к уменьшению ошибок. Однако для крайних позиций детектора усреднения не происходит. Для этих позиций в качестве оценки снизу неопределенности в относительной эффективности различных секций детектора можно было бы взять разброс счета коррелированного фона в разных секциях относительно аппроксимирующей кривой (рис. 47 из [2]). Он равен примерно $\pm 8\%$ и уже сравним с амплитудой наблюдаемых осцилляций. А мы даже не затрагиваем вопрос о различии откликов ячеек внутри одной секции и вопрос о точности и методе получения аппрок-

симирующей кривой. Авторы обращают внимание на эту проблему и приводят результаты без использования крайних позиций. Это приводит к уменьшению значимости наблюдаемого эффекта до примерно 2σ . Естественно именно это значение и использовать для оценки значимости эффекта осцилляций.

4. Оценка значимости эффекта осцилляций на основе распределения χ^2 с двумя степенями свободы приводит к ее переоценке. Например, в эксперименте DANSS значимость, оцененная таким способом и с помощью численных экспериментов, отличается примерно на 0.5σ при значении значимости около 1.5σ , и на 0.2σ при значимости 3.2σ , заявленной в обсуждаемой работе (см. рис. 1). При проведении численных экспериментов предполагалась гипотеза без стерильного нейтрино, а разброс точек соответствовал экспериментально полученным ошибкам. Видно, что в численных экспериментах гипотеза со стерильным нейтрино чаще дает существенно лучшее значение χ^2 по сравнению с исходно моделировавшейся гипотезой без стерильного нейтрино, чем в случае распределения χ^2 с двумя степенями свободы.

5. Странно звучит утверждение, что увеличение ширины интервала в гистограммах по энергии позитрона не влияет на амплитуду осцилляций, а только сокращает число наблюдаемых периодов. Увеличение ширины интервала в каком-то смысле соответствует ухудшению энергетического разрешения детектора, что должно приводить к размытию осцилляционной картины. Например, в эксперименте

DANSS учет энергетического разрешения, эквивалентный ухудшению в 1.4 раза разрешения в L/E при энергии позитронов в районе 4 МэВ, приводит к уменьшению амплитуды осцилляций в зависимости от энергии примерно в 2 раза [3].

6. Использование в анализе нормировки на усредненные значения спектра приводит к корреляциям между различными точками по энергии и расстоянию от реактора. Однако скорее всего, учет этих корреляций мало изменит результаты.

7. Фон от космических мюонов примерно в 2 раза превышает сигнал. Поэтому его вариации даже на несколько процентов весьма существенны. К сожалению, из статьи трудно понять, как это было учтено.

Нам кажется, что рано говорить об обнаружении стерильного нейтрино до прояснения вопросов, поднятых в данном комментарии. Поэтому мы не обсуждаем часть статьи, посвященную интерпретации ре-

зультатов. Проблемы, упомянутые в пунктах 1, 3 и 4, уже обсуждались в работах [4] и [5, 6], соответственно.

Данная работа поддержана грантом Российского научного фонда # 17-12-01145П.

-
1. A. P. Serebrov and R. M. Samoilov, JETP Lett. **112**, 211 (2020).
 2. A. P. Serebrov, V. G. Ivochkin, R. M. Samoilov et al. (Neutrino-4 collaboration), arXiv:2005.05301.
 3. N. A. Skrobova, Bull. Lebedev Phys. Inst. **47**, 101 (2020).
 4. M. Danilov, J. Phys.: Conf. Ser. **1390**, 012049 (2019).
 5. M. Andriamirado, A. B. Balantekin, H. R. Band et al. (PROSPECT Collaboration) and H. Almazan, A. Bonhomme, C. Buck et al. (STEREO Collaboration), arXiv:2006.13147v1.
 6. A. P. Serebrov and R. M. Samoilov, arXiv:2006.13639.