

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

*О. Ю. Смирнов*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены последние данные по измерению потоков солнечных нейтрино, обсуждается совместимость данных с моделью осцилляций Михеева–Смирнова–Вольфенштейна. Обсуждаются актуальные проблемы нейтринной физики низких энергий: необходимость точного измерения потока нейтрино из углеродно-азотного цикла в связи с противоречивыми данными по составу Солнца и возможность существования нейтринных осцилляций, не укладывающихся в трехфлейворную модель.

New data on the solar neutrino flux measurements are presented, and their compatibility with the MSW model is discussed. The actual problems in low-energy neutrino physics are reviewed: the problem of CNO-neutrino flux measurement in view of the contradictory data on the Solar elements abundancies, and the possibility of the neutrino oscillations not matching the three neutrino flavours model.

PACS: 26.65.+t; 14.60.Pq; 13.15.+g

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на более чем полувековую историю изучения свойств нейтрино, экспериментальные данные продолжают интриговать исследователей. В последнее время активно обсуждается вопрос существования нестандартных стерильных нейтрино и возможного различия параметров осцилляций нейтрино и антинейтрино в связи с имеющимися экспериментальными указаниями. С другой стороны, существует ряд проблем, таких как проблема солнечной металличности, отсутствие подъема вероятности выживания для борных нейтрино в области малых энергий, разрешить которые можно только улучшив измерение соответствующих потоков нейтрино.

1. НОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО И ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО В МОДЕЛИ MSW

В 2012 г. опубликован ряд новых данных измерений потоков солнечных нейтрино. Коллаборация «Борексино» опубликовала результаты исследования солнечных нейтрино в области энергий 1,0–1,5 МэВ [1]. Нейтрино в этой области энергий до сих пор не наблюдались в режиме реального времени. В жидкосцинтилляционном детекторе, каким

¹E-mail: osmirnov@jinr.ru

является детектор «Борексино», в данной области энергий доминирует спектр позитронного распада космогенного ^{11}C , постоянно нарабатываемого в органическом сцинтилляторе при прохождении космических мюонов. Ожидаемый счет нейтринных событий более чем на порядок меньше космогенного вклада, поэтому простой спектральный анализ данных (подгонка линейной комбинацией ожидаемых спектральных вкладов) в соответствующем диапазоне энергий не обладает достаточной чувствительностью для выделения сигнала от солнечных нейтрино. Для выделения нейтринного сигнала в анализе использовались новые методы дискриминации событий от β^+ -распадов. В результате фон от космогенного ^{11}C был подавлен приблизительно в десять раз при сохранении половины экспозиции. Из-за схожести энергетических спектров электронов отдачи для CNO-нейтрино и β -спектра от одной из компонент остаточного фона естественной радиоактивности, ^{210}Bi , вклад от CNO-нейтрино достоверно не выделяется, но, тем не менее, для него были получены достаточно сильные ограничения.

Скорость счета солнечных *реп*-нейтрино составила $(3,1 \pm 0,6(\text{стат.}) \pm 0,3(\text{сист.}))$ событий/сут/100 т. Те же данные позволили получить ограничения на поток нейтрино от углеродно-азотного цикла на Солнце $R(\text{CNO}) < 7,9$ событий/сут/100 т для 95 %-го уровня достоверности. Статистическая значимость ненулевого сигнала от *реп*-нейтрино составила 98 %. В предположении модели нейтринных осцилляций Михеева–Смирнова–Вольфенштейна (МСВ) с параметрами LMA (от Large Mixing Angle — область параметров осцилляций, соответствующая большим углам смешивания, для которой наблюдается наилучшее согласие с экспериментальными данными) полученные скорости счета соответствуют нейтринным потокам $(1,6 \pm 0,3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $< 7,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (95 %-й уровень достоверности) для *реп*- и CNO-нейтрино соответственно, в согласии с предсказаниями стандартной модели Солнца (СМС). Этот результат представляет собой первое прямое измерение потока *реп*-нейтрино и, соответственно, наиболее сильное на сегодня ограничение на поток солнечных нейтрино из углеродно-азотного цикла.

Измерение стало возможным благодаря исключительно низкому уровню внутреннего фона в «Борексино» и применению новой методики дискриминации фона. Данный результат демонстрирует принципиальную возможность более точного измерения *реп*- и CNO-нейтрино при условии снижения доминирующего остаточного фона от распадов радиоактивного ^{210}Bi в ходе продолжающейся очистки сцинтиллятора.

Новые измерения солнечных потоков из других экспериментов в прошлом году представлены не были. Следует отметить уточнение результата SuperKamiokaNDE, полученное при переработке старых данных и представленное на конференции «Нейтрино-2012» [2]: новый результат для потока солнечных борных нейтрино составляет $(2,39 \pm 0,04 \pm 0,05) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [3], по сравнению с предыдущими расчетами $(2,32 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$ были приняты во внимание поправки к спектру отдачи электронов и учтен эффект суточных вариаций потока (см. обсуждение ниже).

Следует отметить также попытку коллаборации SNO поставить ограничение на самый высокоэнергетичный поток солнечных нейтрино из *hep*-реакции. Предел составляет $22 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (90 %-й уровень достоверности), в согласии с предсказаниями стандартной модели Солнца $(8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$ [4].

Совокупность накопленных экспериментальных данных в целом укладывается в трехфлейворную модель нейтринных осцилляций. На рис. 1 представлена вероятность выживания электронных нейтрино (P_{ee}), определенная с использованием всех доступных

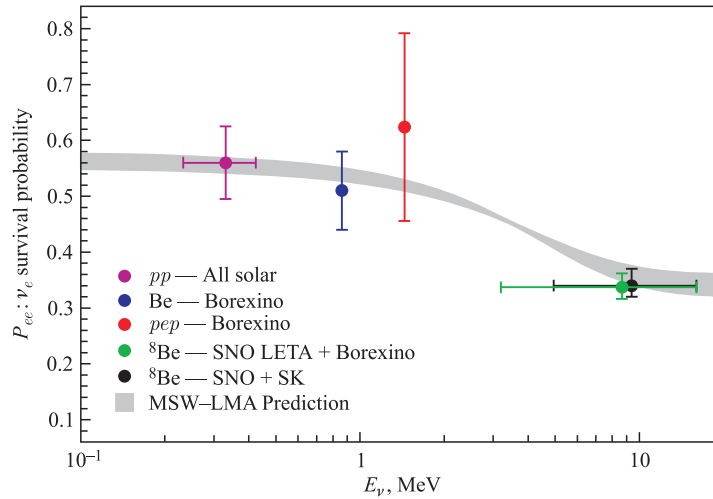


Рис. 1. Вероятность выживания электронных нейтрино (P_{ee}). Точки на графике слева направо: все эксперименты (область pp -нейтрино); измерение потока нейтрино из реакции 7Be («Борексино»), измерение pep -нейтрино («Борексино»); измерение потока нейтрино из реакции 8B с низким порогом («Борексино» + SNO LETA) и измерение потока нейтрино из реакции 8B (SuperKamiokaNDE). Предсказания модели MCB/LMA показаны в виде серой полосы (ее ширина соответствует теоретической ошибке 1σ)

экспериментальных данных по потокам солнечных нейтрино, в сравнении с предсказанной моделью MCB. Предсказания модели MCB нейтринных осцилляций для набора параметров LMA показаны в виде серой полосы (ее ширина соответствует теоретической ошибке 1σ). Общим свойством модели MCB/LMA является наличие двух областей (области вакуумных осцилляций при малых энергиях и области осцилляций в веществе при более высоких энергиях) с постоянной вероятностью и переходной областью между этими двумя режимами осцилляций. Отметим, что при расчете вероятности выживания по экспериментальным данным следует принять во внимание вклад от упругого рассеяния на электронах нейтрино всех флейворов, поэтому вероятность выживания электронных нейтрино в экспериментах, чувствительных к упругому рассеянию («Борексино», SNO, SuperKamiokaNDE), не равна простому отношению измеренного потока к ожидаемому в отсутствие осцилляций. Из-за теоретической неопределенности потока бериллиевых нейтрино фактически половину ошибки в определении вероятности выживания электронных нейтрино соответствующей энергии ($P_{ee}(862 \text{ кэВ}) = 0,51 \pm 0,07$) составляет теоретическая неопределенность потока [5]. «Борексино» получил вероятность P_{ee} для трех разных диапазонов энергий нейтрино, причем для двух из них нет других измерений. Точность определения P_{ee} для бериллиевых нейтрино пока что ограничена теоретической неопределенностью солнечной модели, в отличие от P_{ee} для pep -нейтрино, где доминирующий вклад в ошибку составляет экспериментальная ошибка, теоретические же оценки потока pep -нейтрино достаточно точны.

Как видно из рис. 2, точность определения вероятности выживания электронных нейтрино пока что невелика, наиболее точное значение получено для интегрального значения по спектру борных нейтрино. Для дифференциального энергетического спектра

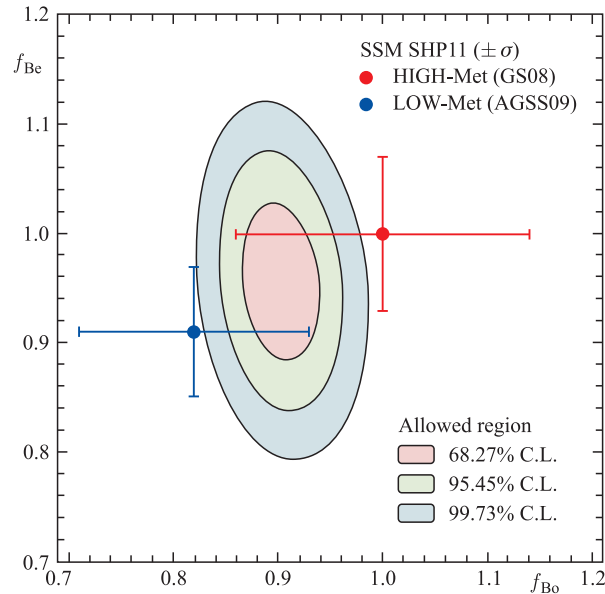


Рис. 2. Сравнение результатов «Борексино» по борным (отложены по оси X) и бериллиевым (по оси Y) нейтрино с предсказаниями двух вариантов солнечной модели с разной металличностью. Экспериментальные результаты представлены эллипсами ошибок для $1, 2$ и 3σ , теоретические предсказания показаны точками с интервалом ошибок для 1σ

борных нейтрино наиболее интересной представляется переходная область, где должен наблюдаться подъем вероятности выживания при переходе от больших к малым энергиям. В спектрах, полученных как в эксперименте SNO, так и в эксперименте SuperKamioKaNDE, не наблюдается подъема вероятности выживания при уменьшении энергии, при этом подгонка данных SuperKamioKaNDE плоским распределением $P_{ee}(E)$ предпочтительнее подгонки распределением, предсказываемым моделью MCB [3], разница в χ^2 составляет $1,3-1,9\sigma$ в зависимости от выбранной модели. В опубликованных данных детектора «Борексино» по измерению потока борных нейтрино измерение в самой низкоэнергетичной точке также находится на $1,2\sigma$ ниже предсказания MCB [6]. Возможно, причина в недостаточной точности измерения при малых энергиях, хотя в последнее время появились объяснения с привлечением осцилляций в сверхлегкие (с $\Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ эВ}^2$) стерильные нейтрино [7]. Точность измерений пока что недостаточна для однозначного утверждения о наблюдении отклонения от предсказаний модели MCB, более высокую точность смогут обеспечить только детекторы следующего поколения: мегатонный SuperKamioKaNDE [8] либо 20-кт жидкосцинтилляционный детектор LENA [9].

Поскольку нейтрино на пути от Солнца могут пересекать Землю, то при разных параметрах осцилляций эффект усиления осцилляций в веществе (в данном случае в плотных слоях Земли) может проявляться в виде суточных вариаций потока нейтрино. Для параметров в области LMA суточные вариации нейтриноного потока при энергиях до 1 МэВ (куда попадают моноэнергетические бериллиевые нейтрино) не ожидаются, но при более высоких энергиях (борные нейтрино) эффект, по расчетам, должен составлять около 2%.

Отсутствие суточных вариаций потока бериллиевых нейтрино в данных «Борексино» [10], вместе с предыдущим измерением солнечных ^8B -нейтрино [6], позволяет выделить на высоком уровне достоверности область, соответствующую большим углам смешивания нейтрино LMA, без включения в анализ данных детектора KamLAND для реакторных антинейтрино, т. е. в отсутствие предположения CPT-инвариантности фундаментальных взаимодействий. Данный результат особенно важен в свете последних, пока что требующих дальнейших подтверждений, экспериментальных указаний на возможное отличие между параметрами осцилляций нейтрино и антинейтрино (см. следующий раздел). Независимое выделение области параметров LMA-решения, полученное в эксперименте «Борексино» с использованием только нейтрино, является ключевым моментом для подтверждения согласованности наших представлений о нейтринных осцилляциях.

На конференции «Нейтрино-2012» коллаборация «SuperKamiokeNDE» представила новые предварительные данные о суточных вариациях потока борных нейтрино [3]. Наблюдается небольшая разница в потоках нейтрино днем и ночью: $A_{\text{DN}} = 2(\phi_{\text{D}} - \phi_{\text{N}})/(\phi_{\text{D}} + \phi_{\text{N}}) = -4,0 \pm 1,3 \pm 0,8$ (значимость отклонения от нуля составляет $2,3\sigma$). Теория в рамках механизма MCB с параметрами, соответствующими решению LMA, предсказывает вариацию потока на уровне нескольких процентов, таким образом механизм MCB подтверждается при энергиях борных нейтрино.

2. ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНОЙ МЕТАЛЛИЧНОСТИ И ПОТОКИ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

Распространенность химических элементов на поверхности Солнца была рассчитана около 10 лет тому назад в одномерной модели (статическая модель для отдельных слоев атмосферы Солнца — фотосферы, хромосферы), использующей данные спектроскопических наблюдений фотосферы (модель GS98 [11]). Эта модель согласуется с гелиосейсмологическими данными, а именно с измерениями скорости прохождения механических волн в Солнце. Ситуация изменилась с публикацией группы Асплунда в 2007 г. данных по химическому составу солнечной поверхности [12], рассчитанных с помощью трехмерной магнитогидродинамической модели конвективной зоны, фотосферы, хромосферы и короны. Содержание таких распространенных элементов, как C, N и O, значительно уменьшилось по сравнению с данными GS98. Металличность (относительная концентрация элементов тяжелее гелия) Солнца в целом уменьшилась до значения $Z/X = 0,0178$ (низкая металличность) по сравнению с предыдущим значением $Z/X = 0,0229$ (высокая металличность). Трехмерная модель воспроизводит наблюдаемый профиль атомных и молекулярных линий в солнечной атмосфере, но находится в противоречии с гелиосейсмологическими данными. В настоящее время нет удовлетворительного объяснения данного факта [13].

В таблице приведено сравнение предсказаний стандартной модели Солнца для сценариев высокой и низкой металличности с экспериментальными измерениями потоков солнечных нейтрино. В пределах ошибок (теоретические предсказания тоже имеют достаточно большую неопределенность) экспериментальные данные согласуются с обоими сценариями, что не позволяет сделать достоверный выбор модели. К примеру, на рис. 2 проведено сравнение результатов эксперимента «Борексино» по потокам борных (отложены по оси X) и бериллиевых (по оси Y) солнечных нейтрино с предсказаниями двух

Предсказания стандартной модели Солнца и экспериментальные измерения потоков солнечных нейтрино

| Поток ν | GS98, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ | AGS09, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ | Измерение/эксперимент, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ |
|--------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\nu_{\text{реп}}$ | $(1,44 \pm 0,012) \cdot 10^8$ | $(1,47 \pm 0,012) \cdot 10^8$ | $(1,6 \pm 0,3) \cdot 10^8$ «Борексино» [1] |
| ${}^7\text{Be}$ | $(5,00 \pm 0,07) \cdot 10^9$ | $(4,56 \pm 0,07) \cdot 10^9$ | $(4,87 \pm 0,24) \cdot 10^9$ «Борексино» [5] |
| ${}^8\text{B}$ | $(5,58 \pm 0,14) \cdot 10^6$ | $(4,59 \pm 0,14) \cdot 10^6$ | $(5,2 \pm 0,3) \cdot 10^6$ SNO + SK + «Борексино» + KamLAND $(5,25 \pm 0,16^{+0,011}_{-0,013}) \cdot 10^6$ SNO-LETA |
| ${}^{13}\text{N}$ | $(2,96 \pm 0,14) \cdot 10^8$ | $(2,17 \pm 0,14) \cdot 10^8$ | $< 7,4 \cdot 10^8$ «Борексино» (поток CNO) [1] |
| ${}^{15}\text{O}$ | $(2,23 \pm 0,15) \cdot 10^8$ | $(1,56 \pm 0,15) \cdot 10^8$ | |
| ${}^{17}\text{F}$ | $(5,52 \pm 0,17) \cdot 10^6$ | $(3,40 \pm 0,16) \cdot 10^6$ | |

вариантов солнечной модели с разной металличностью. Потоки, соответствующие высокой металличности, приняты за единицу измерения на соответствующих осях. Как видно, помимо недостаточной точности измерений центральное значение оказалось между предсказаниями для двух моделей, что делает невозможным выбор модели для представленных экспериментальных данных. Точность измерения потоков борных (6%) и бериллиевых (5%) нейтрино на сегодня самая высокая и вряд ли будет значительно улучшена в ближайшее время (во второй фазе «Борексино» планируется достичь 3%-й точности измерения потока бериллиевых нейтрино). Как видно из таблицы, предсказанные потоки CNO-нейтрино имеют наиболее сильные различия (30–40%) для двух моделей. Поэтому первостепенное значение для решения проблемы металличности Солнца могут иметь измерения потока солнечных нейтрино из CNO-цикла.

Потоки нейтрино из углеродно-азотного цикла относительно малы и непосредственно не измерялись. Существуют интегральные измерения полных потоков солнечных нейтрино в двух радиохимических экспериментах; в эксперименте «Борексино» получено ограничение сверху на поток нейтрино из углеродно-азотного цикла (CNO-нейтрино): в предположении модели нейтринных MCB/LMA поток CNO-нейтрино $< 7,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (95%-й уровень достоверности), что находится в согласии с предсказаниями обоих вариантов стандартной модели Солнца. Данный результат демонстрирует принципиальную возможность более точного измерения $\nu_{\text{реп}}$ - и CNO-нейтрино при условии снижения доминирующего остаточного фона от распадов радиоактивного ${}^{210}\text{Bi}$.

Измерение потока CNO-нейтрино включено в программу второй фазы эксперимента «Борексино» и в программу солнечной фазы эксперимента SNO+ [4].

3. ОСЦИЛЛЯЦИИ ЗА РАМКАМИ ТРЕХФЛЭЙВОРНОЙ МОДЕЛИ

Как обсуждалось выше, совокупность накопленных экспериментальных данных в целом укладывается в трехфлэйворную модель осцилляций (см., например, [14]). Тем не менее, существует целый ряд экспериментальных указаний (т. е. статистическая значимость данных экспериментов невелика, обычно на уровне $2-3\sigma$) на возможность осцилляций нейтрино с $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ (напомним, что $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$). Существование осцилляций на масштабе 1 эВ автоматически влечет существование «лишнего» типа ней-

трино. В самом деле, на сегодня установлены $\Delta m_{12}^2 \sim 10^{-5} \text{ эВ}^2$ и $\Delta m_{23}^2 \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$. В случае трех типов нейтрино Δm_{13}^2 не является независимым параметром и неизбежно оказывается того же порядка величины, что наибольшая из Δm^2 . Число типов нейтрино $n = 3 \pm 0,01$ было определено по ширине распада Z -бозона в эксперименте, поэтому если существует четвертый тип нейтрино, то он должен быть нейтральным (стерильным) с точки зрения слабых взаимодействий.

3.1. Ускорительные эксперименты. Исторически первые указания на существование осцилляций с $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ были получены в эксперименте LSND [15], изучавшем распад мюонов $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ в покое на некотором расстоянии от точки распада. На расстоянии около 30 м было обнаружено некоторое превышение числа регистрируемых электронных антинейтрино над фоном, что интерпретировалось как осцилляции мюонных антинейтрино. Заметим, что такие осцилляции возможны при определенном выборе параметров. Специально для проверки результатов LSND был запущен эксперимент MiniBOONE [16], набирающий данные с 2002 г. При проектировании отношение L/E было сохранено при несколько измененной геометрии эксперимента (30 м и около 30 МэВ для LSND против 500 м и 500 МэВ для MiniBOONE), при этом метки событий и энергия пучка изменились, что должно было исключить влияние систематических ошибок. MiniBOONE в отличие от LSND способен регистрировать как антинейтрино, так и нейтрино. Набор данных в нейтринной и антинейтринной модах ведется независимо. Результаты эксперимента на сегодня достаточно неожиданны: с одной стороны, MiniBOONE не наблюдает избытка событий в нейтринной моде при энергиях LSND, с другой стороны, наблюдается как избыток нейтринных событий при более высоких энергиях, так и избыток событий в антинейтринной моде. Совместный анализ данных осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ дает избыток электронных нейтрино и антинейтрино в количестве $(240,3 \pm 34,5 \pm 52,6)$ событий $(3,8\sigma)$ в области энергий нейтрино 200–1250 МэВ. В предположении CP -инвариантности результаты MiniBOONE совместимы со сценарием осцилляций для $0,01 < \Delta m^2 < 1 \text{ эВ}^2$ и с данными эксперимента LSND [17]. Результаты MiniBOONE и LSND при малых энергиях совместимы, только если предположить разные параметры осцилляций для нейтрино и антинейтрино (т.е. в нарушение CPT -инвариантности).

Следует отметить, что коллаборация SuperKamiokaNDE не нашла отличий в параметрах осцилляций атмосферных нейтрино и антинейтрино в данных Super-Kamiokande-I, II и III в предположении двухфлейворной модели со свободными независимыми параметрами для нейтрино и антинейтрино [18]. С другой стороны, параметры осцилляций, полученные коллаборацией SuperKamiokaNDE по солнечным данным (нейтрино), несколько отличаются от параметров, полученных в эксперименте KamLAND для реакторных нейтрино (антинейтрино), хотя при существующей точности измерений отличие составляет всего $1,6\sigma$ [3].

3.2. Измерения с источниками нейтрино. Радиохимические галиевые детекторы солнечных нейтрино SAGE и независимо GALLEX калибровались с помощью искусственных источников нейтрино. Использовались два типа радиоактивных источников: на основе Cr-51 (электронный захват, энергия нейтрино 752,7 кэВ) и на основе Ar-37 (электронный захват, энергия нейтрино 813,5 кэВ). Было проведено два сеанса облучения на детекторе GALLEX (оба с источником Cr-51) [19] и два сеанса облучения на детекторе SAGE (один с Cr-51 и один с Ar-37) [20]. В первых сеансах с источником Cr-51 на обоих детекторах наблюдалось хорошее согласие с ожидаемым эффектом (ре-

гистрировался сигнал $0,95 \pm 0,11$ от ожидаемого для GALLEX и $0,95 \pm 0,12$ для SAGE). Вторые сеансы имели статистически значимые отклонения от ожидаемого: регистрировался сигнал $0,81 \pm 0,11$ от ожидаемого для GALLEX (источник Cr-51) и $0,79 \pm 0,10$ для SAGE (источник Ag-37). Взвешенное среднее по четырем сеансам имеет отклонение от ожидаемого в $2,6\sigma$ и составляет $0,87 \pm 0,05$. Результат согласуется с осцилляциями на сверхкороткой базе для $\Delta m^2 > 0,1$ эВ². Мы не касаемся других возможных объяснений эффекта, таких как ошибки в сечениях и т. п.

3.3. Реакторная аномалия. Следующим фактом, указывающим на возможное существование четвертого типа нейтрино, является так называемая антинейтринная реакторная аномалия.

Недавно группа французских физиков провела более точные расчеты реакторных антинейтринных спектров для ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu, и ²³⁸U [21]. Переоценка спектров привела к 3 %-му увеличению ожидаемых потоков антинейтрино, причем в хорошем приближении данная оценка верна для всех проводившихся ранее реакторных экспериментов. Совместный анализ всех опубликованных данных экспериментов для расстояний менее 100 м дает отношение наблюдаемого потока к ожидаемому $0,976 \pm 0,024$. Используя новые расчеты потоков, авторы утверждают, что это отношение составляет $0,943 \pm 0,023$, т. е. отклонение от единицы имеет статистическую значимость 98,6 %, назвав это отклонение антинейтринной реакторной аномалией [22]. Эффект укладывается в картину осцилляций на малых расстояниях с привлечением нестандартного четвертого типа нейтрино.

Одновременный анализ показывает, что реакторные данные, данные экспериментов с источником по калибровке галлиевых детекторов, а также данные эксперимента MiniBooNE несовместимы с отсутствием осцилляций на 99,8 %-м уровне достоверности. Параметры осцилляций соответствуют $|\Delta m_{\text{new}}^2| > 1,5$ эВ² (95 %) и $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) = 0,14 \pm 0,08$ (95 %) [22].

3.4. Предложения по поиску стерильных нейтрино. Таким образом, имеются экспериментальные указания на существование нестандартного типа нейтрино. Обсуждаются несколько проектов по поиску осцилляций на малой базе.

Первое предложение основано на использовании возможности реконструирования точки взаимодействия в большом жидкосцинтилляционном детекторе. Если база осцилляций составляет ~ 1 м (что соответствует $\Delta m^2 \sim 1$ эВ², то при облучении детектора мощным источником нейтрино с достаточно малыми размерами $\ll 1$ м должна возникать типичная картина осцилляций — на кривой количества зарегистрированных событий в зависимости от расстояния до источника будут видны провалы и подъемы. Подходящим детектором является «Борексино», в проекте которого был предусмотрен специальный тоннель для загрузки калибровочного источника. Соответствующий проект утвержден коллаборацией (проект SOX — Short baseline Oscillation eXperiment), и уже получены европейские гранты на создание источника нейтрино на основе Cr-51. Сам детектор не потребует модификации для работы с внешним источником нейтрино. Возможен также аналогичный эксперимент с источником антинейтрино, помещаемым в центр детектора. Преимуществом является меньшая интенсивность источника, но потребуются значительная переделка детектора, не совместимая с программой измерения солнечных нейтрино. Такая переделка возможна только по окончании набора солнечных данных перед окончательной остановкой детектора.

Поиск осцилляций на короткой базе возможен и на ядерных реакторах. Естественно, размер активной зоны реактора должен быть много меньше длины осцилляций. Подхо-

дьящими реакторами являются исследовательский реактор ПИК в Гатчине (высота 50 см при диаметре 39 см [23]) и исследовательский реактор в Димитровграде (размер зоны $42 \times 42 \times 35$ см [24]). Поиск осцилляций можно проводить с помощью жидкосцинтилляционного детектора сравнительно малого объема. Например, в предложении эксперимента POSEIDON [25] авторами рассматривается жидкосцинтилляционный детектор с размером центральной зоны $1 \times 1 \times 1,5$ м на расстоянии 5–15 м от 100 МВт-го реактора, область чувствительности такого детектора к параметрам осцилляций лежит в пределах $\delta m^2 = 0,3\text{--}6$ эВ² и $\sin^2(2\theta) > 0,01$.

Эксперимент DANSS (Detector Anti Neutrino from Solid Scintillator), предложенный группой ученых из ОИЯИ и ИТЭФ, планируется осуществить на Калининской атомной станции [26]. Впервые для регистрации реакторных антинейтрино будет использован твердый сцинтиллятор. Детектор антинейтрино нового поколения DANSS будет представлять собой сцинтилляционный пластмассовый детектор объемом 1 м³, разбитый на 2500 ячеек и на десять самостоятельных секций по 250 ячеек в каждой. Ожидаемая скорость счета антинейтрино около 10 000 событий/сут на расстоянии 11 м от реактора, что соответствует статистической точности измерений 1%. Помимо других задач спектрометр DANSS можно использовать для поиска стерильных нейтрино.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейтринная физика продолжает оставаться чрезвычайно интересной областью для исследователей. Экспериментально достоверно наблюдаемые осцилляции нейтрино являются прямым указанием на неполноту стандартной модели. Помимо хорошо исследованного механизма трехфлейворных осцилляций, имеются экспериментальные указания на существование нестандартного стерильного нейтрино, а также на возможное отличие в параметрах осцилляций для нейтрино и антинейтрино. Поиск стерильных нейтрино будет в центре внимания физиков в ближайшие годы. При изучении солнечных нейтрино первоочередной задачей является измерение потока нейтрино из углеродно-азотного цикла, что позволит решить проблему металличности Солнца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belini G. et al. (Borexino Collab.)*. First Evidence of *pep* Solar Neutrinos by Direct Detection in Borexino // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 051302.
2. <http://neu2012.kek.jp/neu2012/programme.html>
3. *Smy M. (Super-Kamiokande)*. Results from Super-Kamiokande, 2012 // XXV Intern. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics «Neutrino 2012», Kyoto, Japan, June 3–9, 2012.
4. *McDonald A. (SNO)*. SNO and Future Solar Neutrino Experiments, 2012 // *Ibid.*
5. *Belini G. et al. (Borexino Collab.)*. Precision Measurement of the ⁷Be Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107. P. 141302.
6. *Belini G. et al. (Borexino Collab.)*. Measurement of the Solar ⁸B Neutrino Rate with a Liquid Scintillator Target and 3 MeV Energy Threshold in the Borexino Detector // *Phys. Rev. C*. 2010. V. 81. P. 034602.
7. *de Holanda P. C., Smirnov A. Yu.* // *Phys. Rev. D*. 2011. V. 83. P. 113011.

8. Abe K. et al. Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment — Detector Design and Physics Potential. arXiv:1109.3262v1 [hep-ex]. 2011.
9. von Feilitzsch F. LENA: Status and Prospects // Neutrino Geoscience. 2010; http://geoscience.lngs.infn.it/Program/Pdf_presentations/Feilitzsch.pdf.
10. Belini G. et al. (Borexino Collab.). Absence of Day/Night Asymmetry of 862 keV ${}^7\text{Be}$ Solar Rate in Borexino and MSW Oscillation Parameters. arXiv:1104.2150v1 [hep-ex].
11. Grevesse N., Sauval J. Standard Solar Composition // Space Sci. Rev. 1998. V. 85. P. 161–174.
12. Asplund M. et al. The Chemical Composition of the Sun // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2009. V. 47. P. 481–522.
13. Serenelli A. M., Haxton W. C., Pena-Garay C. // Astrophys. J. 2011. V. 7432. P. 4.
14. Naumov D. V., Naumov V. A. A Diagrammatic Treatment of Neutrino Oscillations // J. Phys. G. 2010. V. 37. P. 105014.
15. Athanassopoulos C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 2650; 1996. V. 77. P. 3082; 1998. V. 81. P. 1774; Phys. Rev. C. 1998. V. 58. P. 2489; Aguilar A. et al. // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. P. 112007.
16. Aguilar-Arevalo A. A. et al. The MiniBooNE detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 599. P. 28–46.
17. Aguilar-Arevalo A. A. et al. A Combined $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ and $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ Oscillation Analysis of the MiniBooNE Excesses. arXiv:1207.4809v2 [hep-ex]. 2012.
18. Abe K. et al. (Super-Kamiokande Collab.). Search for Differences in Oscillation Parameters for Atmospheric Neutrinos and Antineutrinos at Super-Kamiokande // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 241801.
19. Anselmann P. et al. (GALLEX Collab.) // Phys. Lett. B. 1995. V. 342. P. 440; Kaether F. et al. // Phys. Lett. B. 2010. V. 685. P. 47.
20. Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 4708; Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collab.) // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. P. 045805.
21. Mueller Th. A. et al. Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. P. 054615.
22. Mention G. et al. Reactor Antineutrino Anomaly // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 073006.
23. http://nrd.pnpi.spb.ru/facilities/menu_pik.html; http://nrd.pnpi.spb.ru/pdf/booklet_enr.pdf. 2011.
24. Reactors. <http://www-dev.niiar.ru/ork/sm/features.htm>.
25. Derbin A. V., Kayunov A. S., Muratova V. N. arXiv:1204.2449v1 [hep-ph]. 2012.
26. <http://www.itep.ru/rus/Experiments/GEMMA/>

Получено 17 декабря 2012 г.