

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТА ЭКСПЕРИМЕНТА «НЕЙТРИНО-4» С ДРУГИМИ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ И КОСМОЛОГИЧЕСКИМ ОГРАНИЧЕНИЕМ НА СТЕРИЛЬНОЕ НЕЙТРИНО

А. П. Серебров¹, Р. М. Самойлов, М. Е. Чайковский, О. М. Жеребцов

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Проанализировано соответствие результатов, полученных в эксперименте «Нейтрино-4», результатам других экспериментов на реакторах, ускорителях и экспериментов с нейтринным источником. Обсуждается согласие результатов эксперимента «Нейтрино-4», эксперимента BEST и галлиевой аномалии (ГА) по углу смешивания. Обсуждается разногласие результатов экспериментов с результатами реакторной антинейтринной аномалии (РАА), а также с ограничениями из солнечных и космологических данных.

The correspondence of the results obtained in the Neutrino-4 experiment with the results of other experiments on reactors, accelerators and experiments with a neutrino source is analyzed. The agreement of the results of the Neutrino-4 experiment, the BEST experiment and the gallium anomaly (GA) on the mixing angle is discussed. The disagreement between the experimental results and the results of the reactor anti-neutrino anomaly (RAA), as well as with the limitations of solar and cosmological data, is discussed.

PACS: 14.60.Pq; 26.65.+t; 95.85.Ry

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент «Нейтрино-4» [1] проводится на реакторе СМ-3 (Димитровград, Россия). В эксперименте «Нейтрино-4», благодаря малому размеру активной зоны реактора СМ-3 и высокой мощности в 90 МВт, удается применить метод относительных измерений, используя перемещаемый детектор.

Подробное описание эксперимента «Нейтрино-4» представлено в работе [1]. Процесс осцилляций может быть наглядно представлен в виде зависимости от L/E . Результат анализа данных показан на рис. 1, а. Анализ систематики сделан в [1].

¹E-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

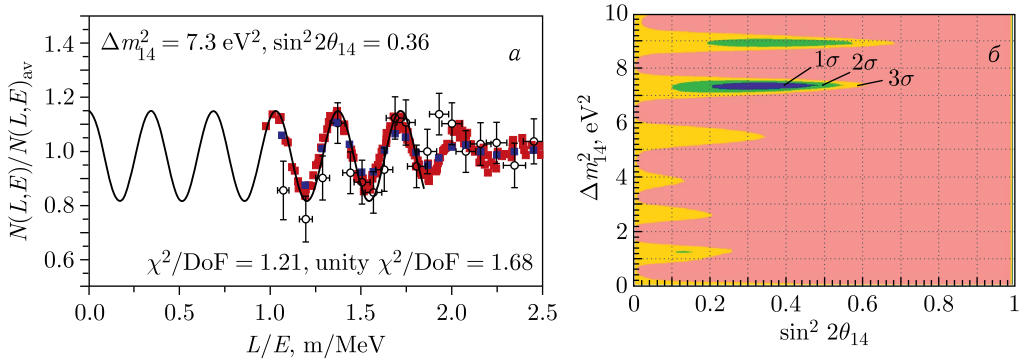


Рис. 1. а) Осцилляционная кривая нейтринного сигнала; б) результаты анализа данных на плоскости параметров осцилляций

Сравнение экспериментальной матрицы и ожидаемой матрицы может быть выполнено также методом $\Delta\chi^2$. Результат анализа показан на рис. 1, а.

В области $\Delta m_{14}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} = 0,36 \pm 0,12_{\text{стат}}$ осцилляции наблюдаются на уровне $2,9\sigma$, анализ на основе моделирования методом Монте-Карло показал уровень достоверности $2,7\sigma$.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ «НЕЙТРИНО-4», ГА, РАА И СОЛНЕЧНОЙ МОДЕЛИ

Эксперимент «Нейтрино-4» направлен на прямое измерение параметра осцилляций $\sin^2 2\theta_{14}$, значение которого в два раза превышает дефицит полного потока нейтрино на больших расстояниях. Для сравнения результатов «Нейтрино-4» и экспериментов, измеряющих полный нейтринный поток (РАА и ГА), значение $\sin^2 2\theta_{14}$ может быть использовано для вычисления дефицита, или наоборот.

Значения параметров осцилляций (точка лучшего фита) в галлиевых экспериментах с учетом нового результата эксперимента BEST: $\sin^2 2\theta_{14} = 0,34_{-0,09}^{+0,14}$, $\Delta m_{14}^2 = 1,25_{-0,25}^{+\infty} \text{ эВ}^2$ [2]. Этот результат хорошо согласуется с результатами «Нейтрино-4».

Эксперимент BEST был направлен на определение параметров осцилляций $\sin^2 2\theta_{14}$ и Δm_{14}^2 в области $\Delta m_{14}^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$. С этой целью галлиевый детектор был разделен на два объема. Однако для $\Delta m_{14}^2 \sim 7 \text{ эВ}^2$ происходит усреднение осцилляций в обоих объемах. В эксперименте удалось измерить дефицит нейтринного потока для обоих объемов ($R_{\text{inn}} = 0,79 \pm 0,05$ и $R_{\text{out}} = 0,77 \pm 0,05$). Подробный анализ попыток определения Δm_{14}^2 сделан в работе [2]. Простейшая совместная оценка на $\sin^2 2\theta_{14}$ для ГА с BEST и «Нейтрино-4» может быть сделана в предположении, что эффект находится в области быстрых осцилляций, на что указывает эксперимент «Нейтрино-4». Тогда среднее значение $\sin^2 2\theta_{14}$ из результата «Нейтрино-4» и ГА $\sin^2 2\theta_{14} = 0,35_{-0,07}^{+0,09}$, и достоверность наличия осцилляций составляет $\sim 5\sigma$. Эта оценка приближительна, более точный анализ результатов «Нейтрино-4» и ГА — в [3]. Сравнение показано на рис. 2.

Сравнение РАА, ГА и «Нейтрино-4» для $\sin^2 2\theta_{14}$ можно делать также в предположении быстрых осцилляций с параметром $\Delta m_{14}^2 \approx 7 \text{ эВ}^2$. Дефицит в РАА

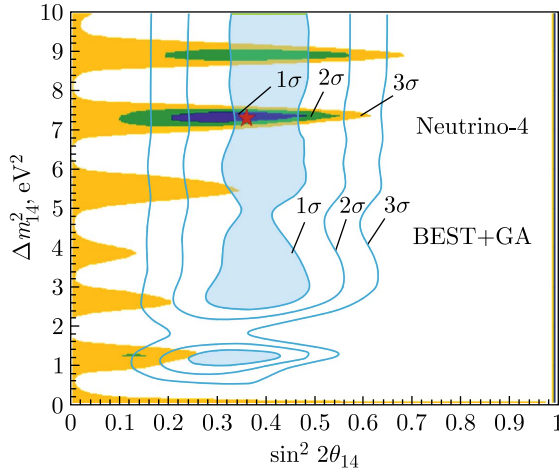


Рис. 2. Сравнение результата эксперимента BEST с ГА и результата «Нейтрино-4». Показан результат наложения плоскостей $\sin^2 2\theta_{14}$, Δm_{14}^2

по модели Хубера–Мюллера составляет $R = 0,930_{-0,023}^{+0,024}$ [4], тогда можно оценить $\sin^2 2\theta_{14} = 0,13 \pm 0,04$. Сравнение этой оценки с $\sin^2 2\theta_{14} = 0,35_{-0,07}^{+0,09}$ показывает расхождение $0,22_{-0,09}^{+0,10}$ в $2,4\sigma$. Это расхождение не вышло за пределы 3σ , но требуется интерпретация этой ситуации.

РАА основана на рассчитанном спектре, который имеет необъясненные расхождения с измеренным спектром по интегралам и по формам. Трудность расчетов характеризуется следующим набором результатов для R-отношения наблюдаемого потока к ожидаемому: $0,930_{-0,023}^{+0,024}$ ($2,8\sigma$), $0,975_{-0,030}^{+0,032}$ ($0,8\sigma$), $0,922_{-0,023}^{+0,024}$ ($3,0\sigma$), $0,970 \pm 0,02$ ($1,4\sigma$), $0,960_{-0,021}^{+0,022}$ ($1,8\sigma$) [4]. Видно, что точность расчетов не позволяет сделать конкретное заключение о дефиците. Что касается определения дефицита из эффекта осцилляций в эксперименте «Нейтрино-4», то можно сказать, что для $\Delta m_{14}^2 = 7,3$ эВ² эффект усреднения осцилляций на расстояниях больше 10 м определенно реализуется. Поэтому соотношение $R = 1 - 1/2 \sin^2 2\theta_{14}$ будет справедливым и предсказывающим $R = 0,82 \pm 0,06$. Но все перечисленные расчетные значения R-отношения оказываются выше ожидаемого значения из эффекта осцилляций. При этом расхождение между результатом «Нейтрино-4» и РАА — это расхождение между прямыми и косвенными, зависящими от сложных расчетов, измерениями.

Совместный результат экспериментов «Нейтрино-4» и BEST с ГА вступает в противоречия с ограничениями на $\sin^2 2\theta_{14}$, основанными на измерениях потоков солнечных нейтрино (рис. 3). Кроме наблюдений, эти ограничения требуют расчетов потока солнечных нейтрино, имеющих ряд проблем: расчет потока основан на Стандартной солнечной модели (ССМ), включает неопределенности этой модели и проблему металличности Солнца; вероятность обнаружения электронного нейтрино в полном потоке солнечных нейтрино зависит от нескольких элементов матрицы PMNS — точность расчетов зависит от точности измерения этих углов; для борных нейтрино теоретический поток включает учет эффекта MSW, для которого используются распределение плотности электронов в Солнце и адиабатическое приближение.

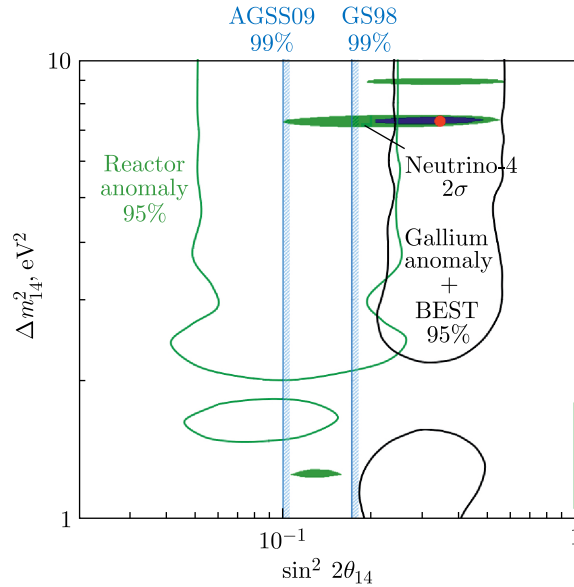


Рис. 3. Сравнение результата «Нейтрино-4», ГА + BEST, РАА [6] и солнечной модели [5]

В работе [5] получены ограничения $\sin^2 2\theta_{14}$ на основе анализа данных «Борексина», SK и SNO. Для двух основных моделей металличности ограничения отличаются в 1,8 раза. Точность расчета для нейтрино, появляющихся в основном pp -цикле в ССМ, составляет 0,6%, но точность эксперимента 16%.

Выход борных нейтрино измерен с точностью 4%, если сложить результаты всех экспериментов. Неопределенность в расчете этого выхода составляет $\pm 12\%$, а результаты расчета для двух моделей металличности отличаются на 17% [5].

В итоге есть точность эксперимента, но нет точности расчета для борных нейтрино, и наоборот — есть точность расчета, но нет точности эксперимента для pp -цикла. Наблюдается противоречие между экспериментами, однако солнечные модели еще содержат значительные неопределенности, тогда как прямые измерения потоков нейтрино от реакторов или радиоактивных источников в меньшей степени опираются на расчеты. Данное противоречие, скорее, указывает на необходимость пересмотра ССМ, если результат «Нейтрино-4» + BEST + ГА подтвердится.

«НЕЙТРИНО-4» И РЕЗУЛЬТАТЫ ДРУГИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сравнение с другими реакторными нейтринными экспериментами: DANSS [7], NEOS + RENO [8], PROSPECT [9] и STEREO [10] — представлено на рис. 4. Результат эксперимента PROSPECT не вполне согласуется с «Нейтрино-4» — область $7,3 \text{ эВ}^2$ с уровнем достоверности $\sim 1\sigma$ накладывается на область ограничений с уровнем достоверности 95% PROSPECT. Тогда как контуры ограничений на параметры осцилляций, полученные в STEREO, достаточно близки к областям допустимых значений параметров «Нейтрино-4» и лучший фит эксперимента STEREO находится в

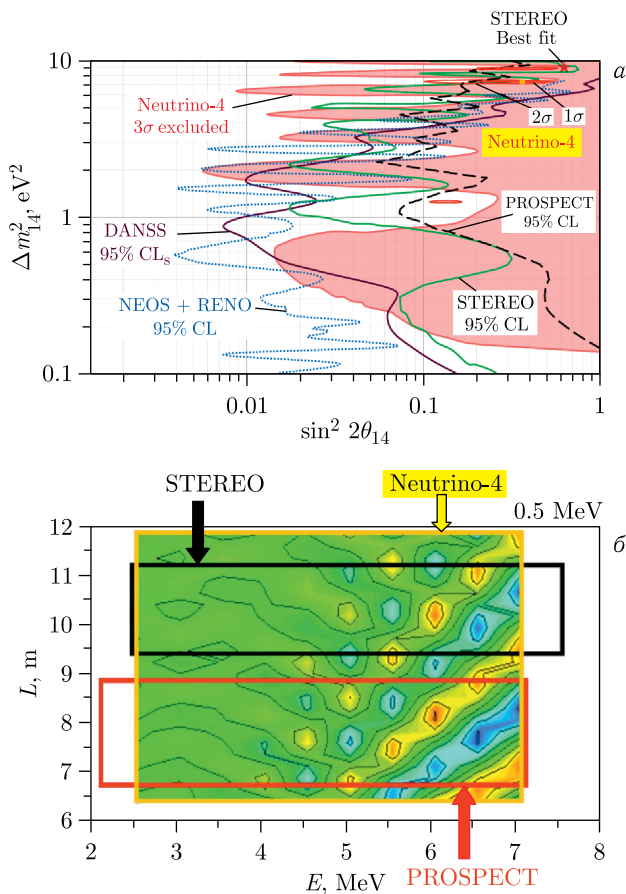


Рис. 4. а) Сравнение результатов реакторных экспериментов. б) Сравнение областей (L, E) в измерениях для «Нейтрино-4», STEREO и PROSPECT

области результата эксперимента «Нейтрино-4». Возможно, при большей чувствительности в STEREO мог бы наблюдаться эффект осцилляций с параметрами, близкими к $\sin^2 2\theta_{14} \sim 0,3$, $\Delta m^2_{14} \sim 7 \text{ эВ}^2$. «Нейтрино-4» использует значительно больший диапазон расстояний, чем STEREO и PROSPECT (см. рис. 4, б) [12], что позволяет наблюдать процесс осцилляций непосредственно в измерениях, используя метод когерентного сложения результатов измерений с одинаковой фазой.

Для сравнения с результатами экспериментов MiniBooNE и LSND необходимо, кроме данных для $\sin^2 2\theta_{14}$, иметь информацию $\sin^2 2\theta_{24}$.

Анализ экспериментальных данных для $\sin^2 2\theta_{24}$ представлен на рис. 5, взятом из работы [11] эксперимента IceCube, где кроме результатов самого эксперимента представлены ограничения из целого ряда других. Красная линия (1) проведена нами как огибающая пределов всех экспериментов при 99%-м уровне достоверности. Она исключает лучший фит, но не опровергает результат IceCube из-за большого диапазона ошибок эксперимента.

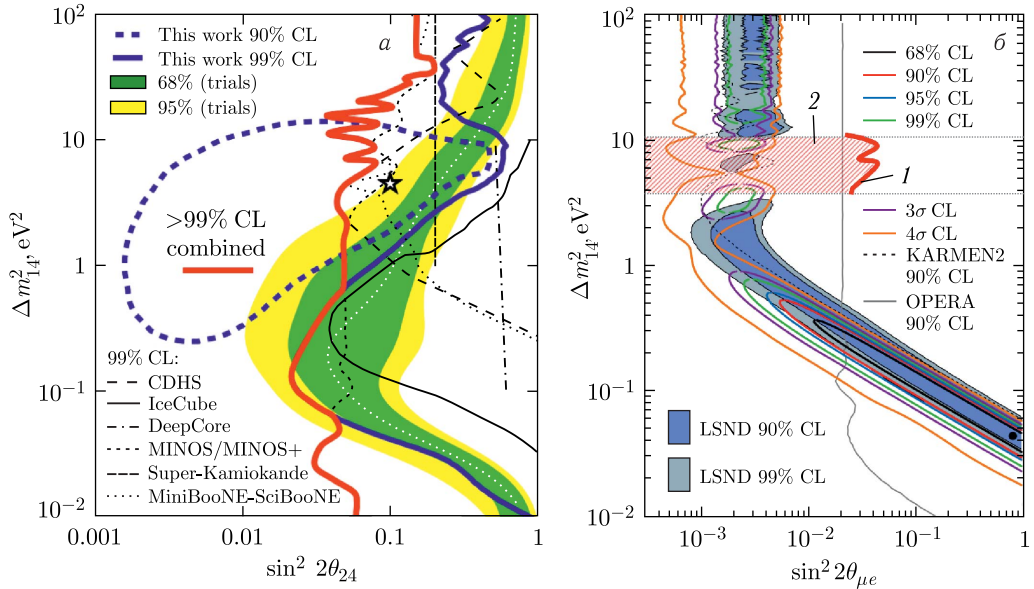


Рис. 5 (цветной в электронной версии). *а*) Результаты эксперимента IceCube из работы [11] и ограничения ряда других экспериментов. Звезда — точка лучшего фита IceCube. *б*) Красная линия (1) — предел на $\sin^2 2\theta_{\mu e}$ в результате переноса ограничений на $\sin^2 2\theta_{24}$ и значение $\sin^2 2\theta_{14} = 0,36 \pm 0,12$. Красная штриховка (2) — ограничения на Δm^2_{14} на уровне $\sim 95\%$ из эксперимента «Нейтрино-4» с учетом систематической ошибки. Рисунок для сравнения взят из [12]

Для проверки соотношения $\sin^2 2\theta_{\mu e} \approx 1/4 \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 2\theta_{24}$ нужно умножить это распределение значения из данных эксперимента «Нейтрино-4»: $\sin^2 2\theta_{14} = 0,36 \pm 0,12$. Предел на $\sin^2 2\theta_{24}$ с уровнем достоверности больше 99% переносится на плоскость $\sin^2 2\theta_{\mu e}$ (см. рис. 5) при значении $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0,55$, т. е. соответствует крайнему значению области с уровнем достоверности 2σ для разности квадратов масс в пределах, полученных в эксперименте «Нейтрино-4». Это дает предел на плоскости $\sin^2 2\theta_{\mu e}$ (тоже красная линия) также на уровне достоверности $\sim 2\sigma$. В заштрихованную область, ограниченную красной линией и пределами на Δm^2_{14} , попадают контуры областей с достоверностью $\sim 3\sigma$, полученные в экспериментах LSND и MiniBooNE. Можно заключить, что на уровне контуров с достоверностью 2–3 σ есть пересечения, и, таким образом, возможность согласования экспериментальных результатов экспериментов: «Нейтрино-4», BEST и ГА, MiniBooNE, LSND, IceCube в рамках нейтринной модели 3 + 1 полностью не закрыта. Экспериментальной точности при $L/E < 1$ пока недостаточно, чтобы наблюдать осцилляционную зависимость, похожую на осцилляционную зависимость из эксперимента «Нейтрино-4».

«НЕЙТРИНО-4» И КОСМОЛОГИЯ

На динамику плотности стерильного нейтрино влияют три процесса: 1) расширение Вселенной; 2) переходы активного нейтрино в стерильное и 3) обратные переходы стерильного нейтрино в активное состояние.

Обратный переход стерильного нейтрино рассматривается как осцилляция стерильного состояния в активное с взаимодействием активной компоненты. Ниже представлено уравнение, учитывающее генерацию ν_s и их «сток». В уравнение входит эффективное взаимодействие стерильного нейтрино с плазмой за счет осцилляций:

$$\frac{dn_{\nu_s}}{dt} + 3Hn_{\nu_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2 2\theta_{m14}n_{\nu_e}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m24}n_{\nu_\mu}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m34}n_{\nu_\tau}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2 2\theta_{m14}n_{\nu_e}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m24}n_{\nu_\mu}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m34}n_{\nu_\tau}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) n_{\nu_s}.$$

Рис. 6, а иллюстрирует скорость рождения и уничтожения стерильных нейтрино при параметрах осцилляций, полученных в эксперименте «Нейтрино-4». В определенный момент достигается баланс между рождением и уничтожением стерильных нейтрино и устанавливается равновесие.

Массовые состояния m_i , $i = 1, \dots, 3$, представляют собой смесь электронных, мюонных и тау с малой долей стерильного состояния. Поэтому массовые состояния m_i обладают слабым взаимодействием, в то время как массовое состояние m_4 в основном стерильное и «взаимодействует» только за счет малого вклада электронных, мюонных и тау. Отношение плотности стерильного нейтрино к плотности электронного в момент времени 1 с будет ~ 1 . Следствием является очень важный результат: к моменту закалки всех нейтрино плотность стерильных оказывается приблизительно той же, что и плотность электронных, как и плотности тау- и мюонных нейтрино оказываются одинаковыми. Это отражает рис. 6, б, где представлена динамика в отношении плотностей нейтрино различного типа.

Следует сделать оценку вклада активных и стерильных нейтрино в плотность энергии Вселенной. Вклад стерильного нейтрино является определяющим, плотность числа частиц стерильного нейтрино такая же, как и активных нейтрино, а масса больше $m_4 = 2,7$ эВ. Доля активных нейтрино в плотность энергии Вселенной определяется [13]: $\Omega_i \approx (m_i/1 \text{ эВ}) 0,01h^{-2}$. Тогда для $\nu_4 \Omega_{\nu_4} \approx (\sum m_i/1 \text{ эВ}) 0,01h^{-2} n_{\nu_4} m_4 / \sum n_{\nu_i} m_i \approx 0,053$.

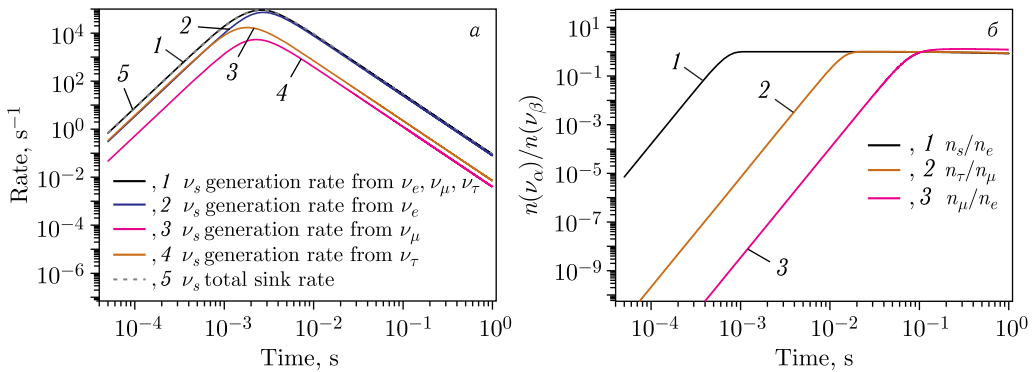


Рис. 6. а) Генерация и сток ν_s . б) Относительные плотности нейтрино

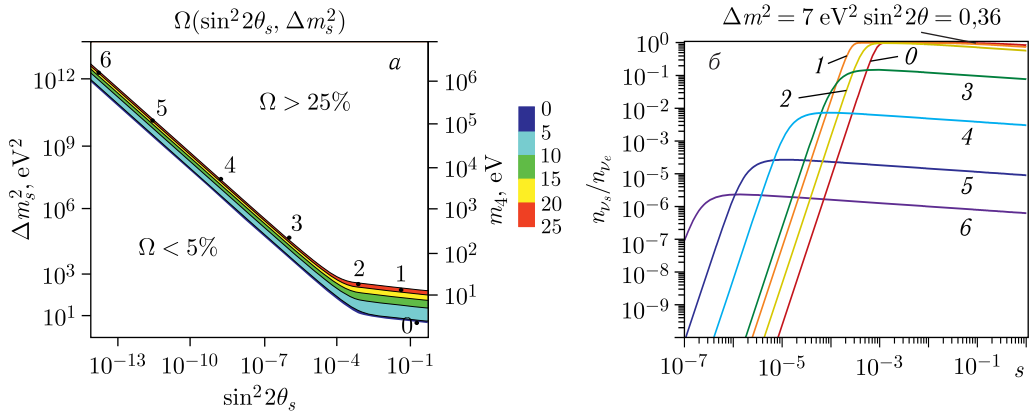


Рис. 7. а) Область $\sin^2 2\theta_{14}$, Δm_{14}^2 , приводящих к допустимому вкладу в темную материю. б) Отношение n_{ν_s}/n_{ν_e} для значений параметров $(\sin^2 2\theta_{14}, \Delta m_{14}^2)$

На рис. 6 показано, что легкие стерильные нейтрино при больших углах смешивания приходят в термодинамическое равновесие с плазмой и их плотность сравнивается с плотностью активных нейтрино. Но для больших масс термодинамическое равновесие недопустимо, так как приведет к превышению порога в 25%. А значит, чтобы остаться в рамках ограничения, при увеличении массы нейтрино угол смешивания должен уменьшаться.

Уменьшение угла смешивания приводит к тому, что стерильное нейтрино не успевает прийти в равновесие с электронным нейтрино до момента отделения нейтрино от плазмы, т. е. отношение n_{ν_s}/n_{ν_e} остается меньше 1. На рис. 7, а выделены 7 точек на плоскости $(\sin^2 2\theta_{14}, \Delta m_{14}^2)$, для которых на рис. 7, б справа построены кривые отношения числа стерильных нейтрино к числу электронных. С уменьшением угла смешивания и увеличением массы это отношение уменьшается. Из приведенного анализа можно сделать вывод, что тяжелые дираковские нейтрино должны обладать малым углом смешивания из-за космологических ограничений. А значит, тяжелые стерильные нейтрино не вносят вклада в реакторные нейтринные эксперименты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты *прямых* экспериментов по поиску стерильного нейтрино — «Нейтрино-4» и ГА — указывают на существование стерильного нейтрино с параметрами осцилляций $\Delta m_{14}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} = 0,35 \pm 0,07(5,0\sigma)$.

Область значений эффекта на appearance в экспериментах MiniBooNE, LSND *не исключена, но ограничена* данными на disappearance мюонных нейтрино при использовании $\sin^2 2\theta_{14} = 0,36$ и $\Delta m_{14}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$ из эксперимента «Нейтрино-4».

Стерильное нейтрино с параметрами $\Delta m_{14}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} = 0,36$ дает вклад в темную материю приблизительно 5%, но является релятивистским. Для объяснения структуры Вселенной нужны тяжелые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00079).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Serebrov A. P. et al. (Neutrino-4 Collab.)*. Search for Sterile Neutrinos with the Neutrino-4 Experiment and Measurement Results // *Phys. Rev. D*. 2021. V. 104. P. 032003.
2. *Barinov V. V. et al. (BEST Collab.)*. A Search for Electron Neutrino Transitions to Sterile States in the BEST Experiment // *Phys. Rev. C*. 2022. V. 105. P. 065502.
3. *Barinov V., Gorbunov D.* BEST Impact on Sterile Neutrino Hypothesis // *Phys. Rev. D*. 2022. V. 105. P. L051703.
4. *Giunti C., Li Y. F., Ternes C. A., Xin Z.* Reactor Antineutrino Anomaly in Light of Recent Flux Model Refinements // *Phys. Lett. B*. 2022. V. 829. P. 137054.
5. *Goldhagen K., Maltoni M., Reichard S. E. et al.* Testing Sterile Neutrino Mixing with Present and Future Solar Neutrino Data // *Eur. Phys. J. C*. 2022. V. 82. P. 116.
6. *Abazajian K. N. et al.* Light Sterile Neutrinos: A White Paper. arXiv:1204.5379v1.
7. *Alekseev I. et al. (DANSS Collab.)*. Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment // *Phys. Lett. B*. 2018. V. 787. P. 56.
8. *Atif Z. et al. (The RENO and NEOS Collab.)*. Search for Sterile Neutrino Oscillation Using RENO and NEOS Data // *Phys. Rev. D*. 2022. V. 105. P. L111101.
9. *Andriamirado M. et al. (PROSPECT Collab.)*. Improved Short-Baseline Neutrino Oscillation Search and Energy Spectrum Measurement with the PROSPECT Experiment at HFIR // *Phys. Rev. D*. 2021. V. 103. P. 032001.
10. *Almazán H. et al. (STEREO Collab.)*. Improved Sterile Neutrino Constraints from the STEREO Experiment with 179 Days of Reactor-On Data // *Phys. Rev. D*. 2020. V. 102. P. 052002.
11. *Aartsen M. G. et al. (IceCube Collab.)*. eV-Scale Sterile Neutrino Search Using Eight Years of Atmospheric Muon Neutrino Data from the IceCube Neutrino Observatory // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 125. P. 141801.
12. *Aguilar-Arevalo A. A. et al. (MiniBooNE Collab.)* // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 221801.
13. *Gorbunov D. S., Rubakov V. A.* Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory. 2nd ed. New Jersey: World Sci., 2017.

Получено 27 октября 2022 г.