

Осцилляции нейтрино: последние результаты и ближайшие перспективы

Ю.Г. Куденко

Представлен краткий обзор новых экспериментальных результатов по изучению осцилляций нейтрино в ускорительных и реакторных экспериментах. Особое внимание уделено указанию на CP -нарушение в нейтринных осцилляциях, полученному в ускорительных экспериментах с длинной базой. Обсуждаются последние результаты по поиску лёгких стерильных нейтрино, а также рассматриваются ближайшие перспективы осцилляционных экспериментов с короткой и длинной базой.

Ключевые слова: осцилляции нейтрино, стерильные нейтрино, нарушение CP -симметрии, иерархия масс нейтрино, эксперименты с короткой и длинной базой

PACS numbers: 14.60.Pq, 25.30.Pt

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.12.038271>

Содержание

1. Введение. Статус нейтринных осцилляций (821).
 2. Поиск нарушения CP -симметрии и измерение осцилляционных параметров (822).
 - 2.1. Поиск CP -нарушения в нейтринных осцилляциях.
 - 2.2. Измерение осцилляционных параметров.
 3. Поиск лёгких стерильных нейтрино (825).
 - 3.1. Проверка "аномалии LSND".
 - 3.2. Проверка "реакторной аномалии".
 4. Ожидаемые результаты и дальнейшие перспективы (827).
 5. Заключение (829).
- Список литературы (829).

1. Введение. Статус нейтринных осцилляций

Открытие нейтринных осцилляций, гипотеза о существовании которых была выдвинута Б.М. Понтекорво [1, 2], явилось одним из наиболее интересных событий в физике элементарных частиц за два последних десятилетия. Это достижение было отмечено Нобелевской премией в 2015 г., а сам результат явился первым прямым экспериментальным доказательством существования новой физики вне рамок Стандартной модели [3, 4]. Как следует из осцилляций, нейтрино имеют малую ненулевую массу и смешиваются и ароматы нейтрино (лептонные числа) не сохраняются. Это противоречит положениям Стандартной модели, согласно которым суще-

ствуют три аромата (типа) активных нейтрино, являющихся безмассовыми частицами, которые не могут менять свой аромат в процессе распространения со скоростью света, т.е. не могут смешиваться.

Нейтринные осцилляции описываются так называемой Стандартной нейтринной моделью, в которой активные нейтрино трёх типов: ν_e, ν_μ, ν_τ , имеющие левую спиральность, связываются через унитарную матрицу U [5] (матрица смешивания Понтекорво–Маки–Накагавы–Сакаты, или PMNS-матрица) с массовыми состояниями ν_1, ν_2, ν_3 , которым соответствуют массы m_1, m_2, m_3 ,

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Унитарность матрицы U означает, что для каждого массового состояния, ν_1, ν_2, ν_3 , суммарная вероятность примеси ν_e, ν_μ, ν_τ равна единице. В общем случае элементы этой матрицы являются комплексными. Стандартная параметризация матрицы U включает в себя три угла смешивания, $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$, и три физические CP -нечётные фазы. Вероятность осцилляций нейтрино зависит от трёх углов смешивания и двух разностей квадратов масс, $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$, $\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2$, и от дираковской CP -нечётной фазы δ_{CP} . Две майорановские фазы, присутствующие в матрице U , не оказывают влияния на осцилляции аромата нейтрино. Соотношение между элементами матрицы (1) и углами смешивания выражается следующим образом:

$$\frac{|U_{e2}|^2}{|U_{e1}|^2} = \tan^2 \theta_{12}, \quad \frac{|U_{\mu 3}|^2}{|U_{\tau 3}|^2} = \tan^2 \theta_{23},$$

$$U_{e3} = \sin \theta_{13} \exp(-i\delta_{CP}). \quad (2)$$

Физика нейтринных осцилляций, экспериментальные методы и полученные результаты подробно описаны в обзорах [6–10].

Менее чем за 20 лет, прошедших после открытия осцилляций, в экспериментах с солнечными, атмосфер-

Ю.Г. Куденко. Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141701 Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация
E-mail: kudenko@inr.ru

Статья поступила 11 октября 2017 г.,
после доработки 23 декабря 2017 г.

ными, реакторными и ускорительными нейтрино был достигнут удивительный прогресс в изучении осцилляционных свойств нейтрино. Разности квадратов масс, характерные для осцилляций солнечных нейтрино, Δm_{21}^2 , и атмосферных нейтрино, $|\Delta m_{32}^2|$, и соответствующие углы смешивания были измерены с точностью несколько процентов. Эти параметры были измерены в основном в экспериментах, в которых изучался дефицит (исчезновение) нейтрино определённого аромата. Затем однозначные подтверждения явления осцилляций и значений осцилляционных параметров были получены в экспериментах, в которых проводился поиск появления нейтрино другого аромата: эксперимент T2K (Tokai to Kamioka) обнаружил осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ [11, 12], а эксперимент OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) однозначно подтвердил существование процесса $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ [13]. Результат T2K впоследствии получил подтверждение в эксперименте NOvA (NuMI (Neutron at the Main Injector) Off-axis ν_e Appearance), который также зарегистрировал появление электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино [14, 15].

Следует отметить, что знак Δm_{32}^2 неизвестен, т.е. не определена иерархия масс нейтрино. Возможны как нормальная, $m_3 \gg m_2 > m_1$, так и инверсная, $m_2 > m_1 \gg m_3$, иерархии масс нейтрино. Вопрос о том, какой порядок масс реализуется в природе, имеет фундаментальное значение для выяснения природы массы нейтрино и механизма смешивания, а также является исключительно важным для поиска безнейтринного двойного бета-распада и интерпретации осцилляционных данных в экспериментах с длинной базой.

Особо следует остановиться на измерениях угла θ_{13} . Настоящий прорыв в этом направлении произошёл в 2011 г., когда был опубликован первый результат эксперимента T2K по измерению осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, который указывал на ненулевую величину угла θ_{13} [11]. Точные измерения этого угла были выполнены в 2012 г. в реакторных экспериментах Double Chooz [16], Daya Bay [17] и RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) [18]. Вскоре этот угол был измерен с ошибкой, близкой к погрешностям, достигнутым для двух других углов смешивания за 15 лет.

Таким образом, эксперименты с солнечными, атмосферными, ускорительными и реакторными нейтрино измерили три угла смешивания, которые не только не равнялись нулю, но и оказались достаточно большими: $\theta_{12} \simeq 34^\circ$, $\theta_{23} \sim 45^\circ$, $\theta_{13} \simeq 9^\circ$, т.е. было установлено, что нейтрино различных ароматов, в отличие от кварков, сильно смешиваются. Эти результаты определили основные проблемы и направления, на которых в настоящее время фокусируются проводимые и планируемые осцилляционные эксперименты: поиск CP -нарушения в лептонном секторе и измерение CP -нечётной фазы, определение иерархии масс нейтрино, прецизионное измерение осцилляционных параметров и поиск стерильных нейтрино.

2. Поиск нарушения CP -симметрии и измерение осцилляционных параметров

2.1. Поиск CP -нарушения в нейтринных осцилляциях

Фундаментальным является вопрос: нарушается ли CP -инвариантность в нейтринных осцилляциях? Параметр Ярлскога (Jarlskog) J_{CP} [19], который показывает вели-

чину CP -нарушения для нейтрино или, другими словами, в лептонном секторе, выражается как

$$J_{CP}^{\text{PMNS}} = \cos \theta_{12} \sin \theta_{12} \cos^2 \theta_{13} \sin \theta_{13} \cos \theta_{23} \sin \theta_{23} \sin \delta_{CP}. \quad (3)$$

Поскольку все три угла смешивания нейтрино, как и у кварков, не равны нулю, то $J_{CP}^{\text{PMNS}} \neq 0$, если $\delta_{CP} \neq 0$. В кварковом секторе $J_{CP}^{\text{CKM}} \sim 3 \times 10^{-5}$, а в лептонном — $J_{CP}^{\text{PMNS}} \sim 0,035 \sin \delta_{CP}$.

Следует подчеркнуть, что надежды на то, что CP -нарушение в кварковом секторе является ключом к разгадке барионной асимметрии Вселенной, не оправдались. Это связано с малостью масс кварков по сравнению с характерным размером шкалы электрослабого взаимодействия ~ 100 ГэВ. Учёт CP -нарушения в кварковом секторе даёт величину барионной асимметрии Вселенной, примерно на 10 порядков меньшую наблюдаемой величины [20]. Учитывая, что углы смешивания имеют большие величины, можно предположить, что эффект CP -нарушения в лептонном секторе может быть очень большим (в зависимости от значения δ_{CP}) по сравнению с таковым в кварковом секторе.

Таким образом, изучение нейтринных осцилляций открывает уникальную возможность поиска нового источника CP -нарушения. Открытие CP -нарушения в нейтринных осцилляциях вместе с несохранением лептонного числа могут являться важными косвенными аргументами в пользу объяснения барионной асимметрии Вселенной через механизм лептогенезиса [21]. Хотя в настоящее время доминирует представление о том, что прямой связи между CP -нарушением в лептонном секторе при низких энергиях и CP -асимметрией в распадах тяжёлых нейтрино в ранней Вселенной нет, в ряде предложенных теоретических моделей устанавливаются связи между этими механизмами [22–24].

Каким образом CP -нарушение может быть обнаружено и измерено в нейтринных осцилляциях? Открытие осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ даёт прекрасный шанс для поиска CP -нарушения. Если для простоты рассмотреть осцилляции в вакууме, то CP -асимметрия будет выражаться следующим образом:

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \simeq -\frac{\cos \theta_{23} \sin(2\theta_{12})}{\sin \theta_{23} \sin \theta_{13}} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \sin \delta_{CP}, \quad (4)$$

т.е. A_{CP} может быть измерена в эксперименте с пучками нейтрино и антинейтрино. Величина A_{CP} пропорциональна $1/\sin \theta_{13}$, а вероятности $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ и $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$, т.е. число зарегистрированных электронных нейтрино (антинейтрино), появившихся в результате осцилляций, пропорциональны $\sin^2(2\theta_{13})$. При измерениях переходов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ в осцилляционном максимуме, т.е. при оптимальном и постоянном отношении базы эксперимента L к энергии нейтрино (антинейтрино) E , величина CP -асимметрии не зависит от энергии нейтрино (антинейтрино). Использование величины угла θ_{13} , измеренного прецизионно в реакторных экспериментах, и вероятности $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$, которая зависит от θ_{13} и δ_{CP} , позволяет также ограничить область значений CP -нечётной фазы. Результаты анализа данных эксперимента

Т2К, полученные как с использованием только данных по осцилляциям мюонных нейтрино и антинейтрино, так и с привлечением ограничений на величину θ_{13} из реакторных данных, представлены ниже.

Первый поиск нарушения CP -симметрии был выполнен в эксперименте Т2К, где используется чистый внеосевой (off-axis) (смещённый от направления протонного пучка на $2,5^\circ$) квазимоноэнергетический пучок мюонных нейтрино (антинейтрино), созданный на сильноточном протонном ускорителе J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex). Энергия нейтрино (антинейтрино) настроена на первый осцилляционный максимум, соответствующий осцилляциям атмосферных нейтрино с $\Delta m^2 \sim 2,4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$. Параметры нейтринного пучка до момента возможных осцилляций измеряются комплексом ближних нейтринных детекторов. Пролётная база эксперимента 295 км, в качестве дальнего нейтринного детектора используется водный черенковский детектор Супер-Камиоканде (Super-Kamiokande, SK). Детальное описание эксперимента, установки, методики измерений и анализа данных представлено в работах [25–29].

В 2013 г. в эксперименте Т2К впервые было получено указание на максимальное CP -нарушение в нейтринных осцилляциях [12]. Для этого использовалась комбинация измеренной вероятности перехода $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и величины θ_{13} , полученной в реакторных экспериментах. В начале 2017 г. Т2К опубликовал результаты первого прямого поиска CP -нарушения из сравнения $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ и $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$. Затем в 2017 г. был опубликован первый результат по поиску CP -нарушения в эксперименте NOvA (США), который имеет базу длиной 810 км и среднюю энергию нейтринного внеосевого (off-axis) пучка около 2,2 ГэВ. В этом эксперименте была измерена вероятность осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, а для получения информации о CP -нарушении использовалась величина θ_{13} из реакторных экспериментов. Результат NOvA [15] находится в согласии с данными Т2К и также указывает на максимальное CP -нарушение.

За время, прошедшее с момента первой публикации, в Т2К была существенно увеличена статистика нейтринных событий. С 2010 г. по 2017 г. в эксперименте набрана статистика, соответствующая интегральному потоку $2,25 \times 10^{21}$ протонов на мишени. Соотношение времён измерений с пучком мюонных нейтрино и пучком мюонных антинейтрино равнялось примерно 2:1. В анализе данных также был достигнут существенный прогресс. Были улучшены алгоритмы отбора нейтринных событий в Супер-Камиоканде, снижен вклад фона от нейтральных пионов, возникающих в результате нейтринных взаимодействий через нейтральные токи, в число зарегистрированных электронных событий, увеличен активный объём Супер-Камиоканде, а также в осцилляционном анализе были учтены события, в которых в детекторе Супер-Камиоканде электрон регистрировался вместе с пионом. Это позволило улучшить эффективность регистрации полезных событий на 30%. Новый результат эксперимента Т2К, полученный летом 2017 г., был представлен на нескольких конференциях (см., например, [30]). Число электронных нейтрино и антинейтрино, зарегистрированных в Супер-Камиоканде после применения всех критериев отбора, приведено в таблице. Всего было зарегистрировано 89 электронных нейтрино, тогда как в случае сохранения CP -симметрии ожидалось около 67 событий. С пучком мюонных анти-

Таблица. Число электронных нейтрино и антинейтрино, зарегистрированных дальним детектором Супер-Камиоканде и предсказанных для различных значений CP -нечётной фазы δ_{CP}

Частица	Число частиц				
	Данные Т2К	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$
ν_e	74	73,5	61,5	49,9	62,0
$\nu_e + 1\pi$	15	6,92	6,01	4,87	5,78
$\bar{\nu}_e$	7	7,93	9,04	10,04	8,93

нейтрино было зарегистрировано семь электронных антинейтрино, в то время как в случае сохранения CP -симметрии ожидалось девять событий.

Результаты осцилляционного анализа для схемы с тремя активными нейтрино и антинейтрино показаны на рис. 1. Учёт величины $\sin^2 \theta_{13} = 0,0210 \pm 0,0011$ из реакторных экспериментов [31] позволяет дополнительно ограничить область возможных значений CP -нечётной фазы. На рисунке 2 показаны доверительные интер-

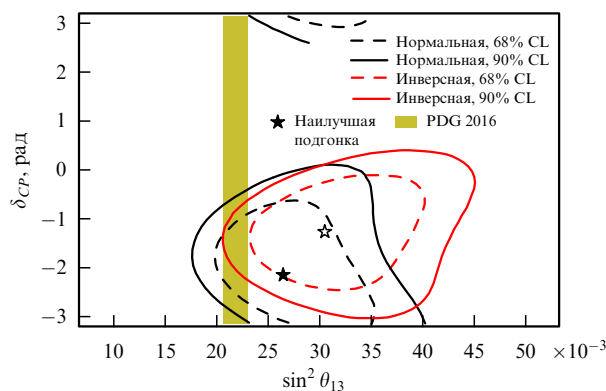


Рис. 1. (В цвете онлайн.) Предварительный результат Т2К, показывающий область допустимых значений δ_{CP} и $\sin^2 \theta_{13}$ для нормальной и инверсной иерархий масс. Затемнённой полосой отмечен интервал значений $\sin^2 \theta_{13}$ из реакторных экспериментов, обозначенный как PDG 2016. Звёздочками показаны результаты наилучшей аппроксимации данных для нормальной (чёрные кривые) и инверсной (красные кривые) иерархий масс нейтрино.

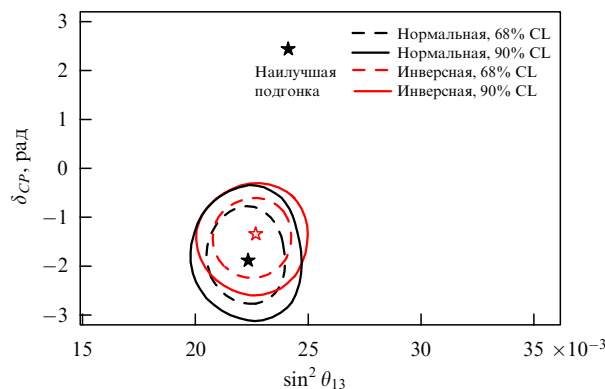


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Область допустимых значений δ_{CP} и $\sin^2 \theta_{13}$, полученная в эксперименте Т2К (предварительный результат) для нормальной и инверсной иерархий масс при условии наложения на значения $\sin^2 \theta_{13}$ ограничений реакторных экспериментов в интервале $\pm 1\sigma$. Звёздочками показаны результаты наилучшей подгонки для данных в случаях нормальной (чёрный цвет) и инверсной (красный цвет) иерархий масс нейтрино.

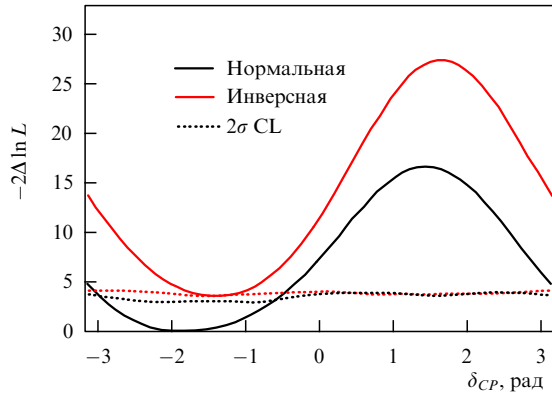


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Зависимость функции максимального правдоподобия $-2\Delta\ln L$ от значения δ_{CP} для нормальной (чёрная сплошная кривая) и инверсной (красная сплошная кривая) иерархий масс. Пунктирные кривые показывают 95%-ный уровень доверительной вероятности (CL) для нормальной и инверсной иерархий масс. Области значений δ_{CP} , соответствующие значениям функции правдоподобия, находящимся выше пунктирных кривых, исключены на уровне 2σ (95% CL).

валы на плоскости $\delta_{CP}-\sin^2\theta_{13}$ после учёта дополнительного ограничения на $\sin^2\theta_{13}$ из реакторных данных. Статистическая значимость, с которой δ_{CP} отклоняется от величины, дающей наилучшее описание осцилляционных данных для нормальной и инверсной иерархий масс, показана на рис. 3. Наилучшим образом экспериментальные данные описываются для значения CP -нечётной фазы $\delta_{CP} = -1,83^{+0,60}_{-0,66}$ рад для нормальной иерархии масс, что близко к максимальному CP -нарушению. Из рисунка 3 видно, что значения $\delta_{CP}=0, \pi$ находятся за пределом допустимого доверительного интервала 2σ . Например, область допустимых значений δ_{CP} для доверительного интервала 90% ограничена углами $[-161^\circ, -48^\circ]$ для нормальной иерархии масс. Таким образом, результат T2K впервые исключил сохранение CP -симметрии в нейтринных осцилляциях на уровне доверительного интервала 95% (2σ). Этот результат делает ещё более значимыми указания на максимальное CP -нарушение в нейтринных осцилляциях, полученные ранее [12, 15, 32].

2.2. Измерение осцилляционных параметров

Исследование нейтринных осцилляций показывает, что смешивание мюонных и тау-нейтрино почти максимально, т.е. угол θ_{23} близок к $\pi/4$. Однако неизвестно, действительно ли его значение точно равняется $\pi/4$ или немного отличается от этой величины. Определение иерархии масс и прецизионное измерение угла θ_{23} исключительно важны как для интерпретации осцилляций мюонных нейтрино (антинейтрино) в электронные нейтрино (антинейтрино), так и для чувствительного поиска CP -нарушения и измерения CP -нечётной фазы δ_{CP} .

В последнее время были опубликованы новые результаты измерений параметров $|\Delta m_{32}^2|$ и $\sin^2\theta_{23}$ в экспериментах с атмосферными нейтрино (IceCube [33] и Super-Kamiokande [35]) и ускорительными нейтрино (T2K [32] и NOvA [15]). Эти результаты, а также более ранние данные эксперимента MINOS (Muon Injector Neutrino Oscillation Search) [34] показаны на рис. 4. В недавней публикации [37] коллаборация Super-Kamiokande немного уменьшила допустимую область параметров $|\Delta m_{32}^2|$ и

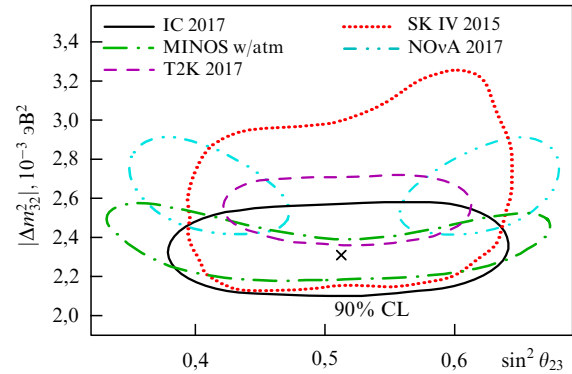


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Области 90%-ных доверительных интервалов на плоскости параметров $|\Delta m_{32}^2|-\sin^2\theta_{23}$, полученные при предположении нормальной иерархии масс в экспериментах IceCube (IC 2017) [33], MINOS (MINOS w/atm) [36], T2K (T2K 2017) [32], NOvA (NOvA 2017) [34] и Super-Kamiokande (SK IV 2015) [35].

$\sin^2\theta_{23}$. Следует подчеркнуть, что имеется расхождение между результатами T2K, IceCube и Super-Kamiokande, указывающими на максимальное смешивание, и данными эксперимента NOvA, которые исключают максимальное смешивание на уровне $2,6\sigma$. Поскольку все эксперименты продолжают набор данных, можно ожидать, что довольно скоро удастся объяснить разницу между величинами θ_{23} в этих экспериментах, которая может оказаться чисто статистической флуктуацией.

Наиболее точные значения угла θ_{13} были получены в 2017 г. в эксперименте Daya Bay [38]: $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,0841 \pm 0,0027(\text{стат.}) \pm 0,0019(\text{сист.})$. Результат эксперимента RENO, полученный с большей погрешностью, $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,086 \pm 0,006(\text{стат.}) \pm 0,005(\text{сист.})$ [39], находится в хорошем согласии с результатом Daya Bay. Однако следует отметить, что существует расхождение на уровне $\sim 2\sigma$ между наиболее прецизионным результатом Daya Bay и последними измерениями эксперимента Double Chooz, который недавно представил предварительный результат [40]: $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,119 \pm 0,016$. Насколько значимо это расхождение, покажет ближайшее будущее, поскольку в этих экспериментах продолжается набор статистики, изучаются систематические погрешности и улучшается анализ данных.

Как отмечалось, определение иерархии масс нейтрино является одной из ключевых задач осцилляционных экспериментов. В последнее время появились первые результаты в решении этой проблемы. Благодаря длинной базе (810 км) эксперимент NOvA обладает хорошей чувствительностью к иерархии масс нейтрино. Результаты измерения $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ указывают на существование нормальной иерархии масс. Например, для $\theta_{23} < \pi/4$ инверсная иерархия масс исключена на уровне $> 93\%$ для всех значений δ_{CP} [15]. Анализ данных, накопленных детектором Super-Kamiokande для экспозиции 328 кт лет, показал предпочтительность нормальной иерархии масс [37]. Для 90%-ных доверительных интервалов осцилляционных параметров данные Super-Kamiokande отвергают инверсную иерархию с вероятностью от 80,6% до 90,6%. Использование данных T2K для установления дополнительных ограничений позволяет Super-Kamiokande отвергнуть инверсную иерархию масс на уровне 91,4–94,4%. Для фиксированных значений θ_{13} из реакторных экспериментов и $\delta_{CP} \sim -\pi/2$ из T2K статистическая

значимость решения, свидетельствующая в пользу нормальной иерархии масс, составляет около $2,3\sigma$ [36].

3. Поиск лёгких стерильных нейтрино

Как отмечено в разделе 1, осцилляционные результаты описываются схемой с тремя слабо взаимодействующими нейтрино, двумя независимыми величинами Δm^2 и тремя углами смешивания. Однако несколько так называемых нейтринных аномалий не находят объяснения в рамках такого подхода и, возможно, указывают на существование по крайней мере ещё одного, дополнительного, нейтринного состояния (стерильного нейтрино) с массой ~ 1 эВ.

1. В нейтринном эксперименте с короткой базой LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) [41], в котором исследовалось смешивание мюонных антинейтрино и электронных антинейтрино в результате осцилляций, был обнаружен избыток электронных антинейтрино на уровне $3,8\sigma$ для величины отношения $E/L \sim 1$ эВ². Проверка этого эффекта проводилась в эксперименте MiniBooNE (Mini Booster Neutrino Experiment) [42], результаты которого в целом согласовались с результатом LSND, однако достигнутая в MiniBooNE чувствительность не позволила однозначно подтвердить или опровергнуть результат LSND.

2. При измерениях с искусственными источниками нейтрино в экспериментах SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) и GALLEX (Gallium Experiment) число зарегистрированных событий оказалось меньше ожидаемого. Статистическая значимость эффекта ("галлиевая аномалия") составила около $2,9\sigma$. Этот дефицит также может быть объяснён осцилляциями между электронным нейтрино и стерильным нейтрино с $\Delta m^2 \sim 1$ эВ² [43, 44].

3. В результате новой оценки потока антинейтрино от реакторов [45] получено, что величина этого потока примерно на 3 % больше предыдущего значения, используемого в течение длительного времени в реакторных экспериментах. Это привело к тому, что потоки нейтрино, измеренные в разных экспериментах на расстояниях ≤ 100 м от активной зоны реактора, оказались меньше потоков, определённых для этих расстояний на основе работы [45]. Такое расхождение между предсказанным и измеренным потоками антинейтрино могло бы быть объяснено исчезновением антинейтрино из-за осцилляций с $\Delta m^2 \sim 1$ эВ². Этот эффект, статистическая значимость которого составила $2,8\sigma$, получил название "реакторная аномалия".

Следует, однако, отметить, что результаты LSND и MiniBooNE (появление электронных нейтрино и антинейтрино) находятся в противоречии с результатами эксперимента MINOS (исчезновение мюонных нейтрино), который не обнаружил дефицита мюонных нейтрино [46], ожидаемого в случае осцилляций с $\Delta m^2 \sim 1$ эВ². Также явилось неожиданным наблюдение в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz в спектре антинейтрино "бампа" (от англ. bump — шишка, выпуклость) при энергии около 5 МэВ (см., например, обсуждение этого эффекта в работе [47]), который не предсказывается теоретическими моделями, что поставило вопрос о надёжности предсказания потока антинейтрино или о завышении статистической значимости реакторной аномалии. В разделах 3.1, 3.2 кратко рас-

смотрены новые результаты по поиску стерильных нейтрино, полученные в последнее время.

3.1. Проверка "аномалии LSND"

3.1.1. IceCube. На установке IceCube был измерен спектр атмосферных мюонных нейтрино ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) в зависимости от зенитного угла в диапазоне энергий от 320 ГэВ до 20 ТэВ [48]. Для энергий нейтрино > 100 ГэВ период осцилляций для "атмосферной" разности квадратов масс становится больше диаметра Земли и этим эффектом можно пренебречь. Наличие стерильного нейтрино с характерным диапазоном $0,1 - 10$ эВ² для разности квадратов масс с активным нейтрино в схеме $3 + 1$ (3 активных нейтрино + 1 стерильное нейтрино) приводит вследствие эффекта Михеева – Смирнова – Вольфенштейна к искажению спектра, которое может быть измерено детектором IceCube. Результат анализа данных, накопленных в течение одного года, представлен на рис. 5, где показаны ограничения на область параметров $\Delta m_{41}^2 - \sin^2(2\theta_{24})$ в схеме $3 + 1$. Область параметров, соответствующая "положительному" сигналу LSND/MiniBooNE, т.е. сигналу, свидетельствующему об обнаружении стерильного нейтрино, исключена на уровне доверительного интервала (confidence level, CL) 99 %.

3.1.2. Daya Bay/MINOS. Чувствительный поиск стерильных нейтрино также был выполнен в реакторном эксперименте Daya Bay [51] и ускорительном эксперименте MINOS [52]; результат комбинированного анализа представлен в работе [53]. Для этого анализа привлекались также данные реакторного эксперимента Bugey-3 [54]. Прежде всего следует отметить, что в экспериментах LSND и MiniBooNE проводился поиск стерильных нейтрино при исследовании осцилляций $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \rightarrow \nu_e (\bar{\nu}_e)$. В схеме $3 + 1$ для унитарной матрицы смешивания 4×4 , которая является расширенной матрицей U , вероятность

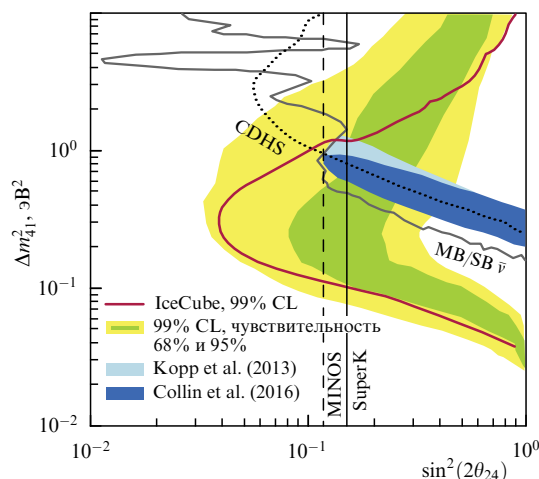


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Результат IceCube по поиску стерильного нейтрино [48]. Область справа от сплошной тёмно-коричневой кривой исключена на уровне 99 % CL. Показаны также ограничения, полученные в других экспериментах. Области допустимых параметров стерильных нейтрино, полученные на основе глобального анализа данных LSND/MiniBooNE, показаны голубым (Kopp et al. [49]) и синим (Collin et al. [50]) цветом. Используются следующие обозначения: CDHS — CERN – Dortmund – Heidelberg – Saclay, MB — MiniBooNE, SB — SciBooNe.

осцилляций выражается следующим образом:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx 4|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right), \quad (5)$$

для области параметров, в которой $\Delta m_{41}^2 \gg |\Delta m_{32}^2|$ и $\Delta m_{32}^2 L / (4E) \sim 0$. Наличие отличной от нуля амплитуды $4|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2$ является возможным объяснением результатов LSND и MiniBooNE. Реакторный эксперимент с короткой базой, в котором измеряется дефицит электронных антинейтрино, чувствителен к матричному элементу $|U_{e4}|^2$, так как

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right). \quad (6)$$

Ускорительный эксперимент, измеряющий дефицит мюонных нейтрино, чувствителен к $|U_{\mu4}|^2$:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - 4|U_{\mu4}|^2(1 - |U_{\mu4}|^2) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right). \quad (7)$$

Таким образом, поскольку появление электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино требует выполнения условий $|U_{e4}| > 0$ и $|U_{\mu4}| > 0$, эффект стерильного нейтрино, если оно действительно обнаружено в осцилляциях $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, должен проявиться и в измерениях дефицита ν_μ и $\bar{\nu}_e$ в экспериментах с энергиями и базой, настроенными на ожидаемую величину $\Delta m_{41}^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$. Результат комбинированного анализа экспериментов Daya Bay, MINOS и Bugey-3 показан на рис. 6, где область осцилляционных параметров, исключённая в комбинированном анализе, сравнивается с областью, разрешённой в экспериментах LSND и MiniBooNE. Как видно, существует явное противоречие между этими результатами.

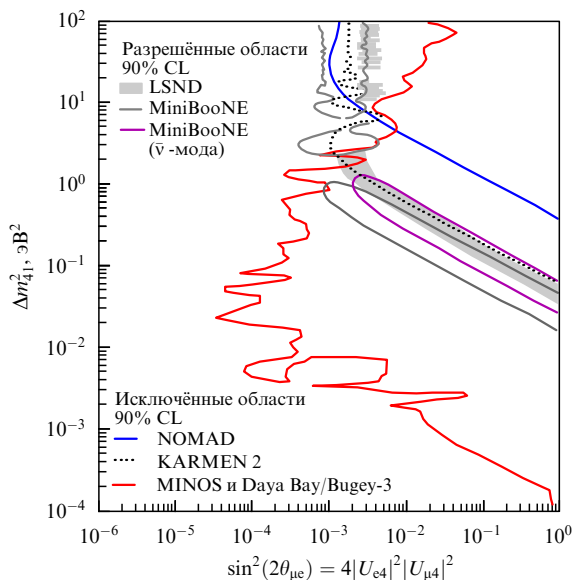


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Результат комбинированного анализа данных MINOS, Daya Bay и Bugey-3. Приведены также результаты анализа данных экспериментов NOMAD (Neutrino Oscillation MAGnetic Detector) и KARMEN 2 (KArlsruhe – Rutherford interMEdiate Energy Neutrino 2). Область параметров справа от красной кривой исключена на уровне 90% CL. Также показаны области допустимых значений, полученные в экспериментах LSND и MiniBooNE.

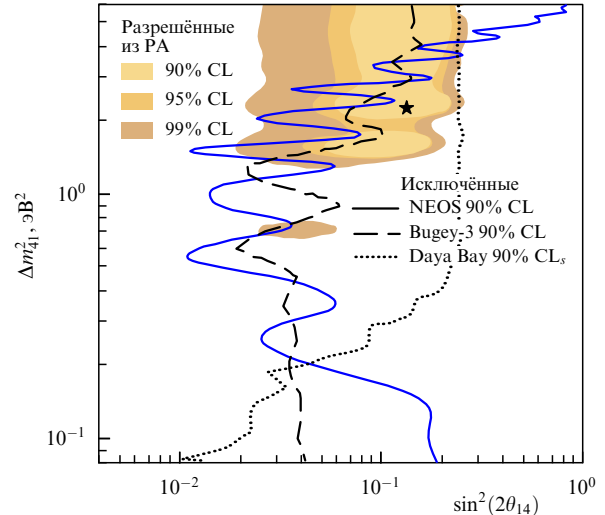


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Ограничение на параметры осцилляций в схеме для стерильных нейтрино $3 + 1$, полученное в эксперименте NEOS. Область справа от сплошной кривой синего цвета исключена на уровне 90% CL. Разрешённая область параметров для стерильных нейтрино из реакторной аномалии (РА) [45] показана тёмным цветом. Звёздочкой отмечены оптимальные значения параметров Δm_{41}^2 и $\sin^2(2\theta_{14})$ для стерильного нейтрино, следующие из РА. Показаны также ограничения из экспериментов Daya Bay и Bugey-3.

3.2. Проверка "реакторной аномалии"

3.2.1. Реакторный эксперимент NEOS. Реакторный эксперимент NEOS (Neutrino Experiment for Oscillation at Short Baseline) [55] был выполнен в Корее на атомной станции Ханбит, где проводится эксперимент RENO. Детектор был расположен на расстоянии около 24 м от центра активной зоны ближнего реактора мощностью 2,8 ГВт, что позволило провести чувствительный поиск стерильных нейтрино с массой около 1 эВ. Результат эксперимента представлен на рис. 7. Как видно, в эксперименте получено новое ограничение на угол смешивания активного и стерильного нейтрино θ_{14} для $\Delta m_{41}^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ и ограничена, но не исключена полностью область параметров смешивания активных и стерильных нейтрино, определённая из "реакторной аномалии".

3.2.2. Реакторные эксперименты DANSS и "Нейтрино-4". Реакторные эксперименты с короткой базой DANSS (Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator) [56], который проводится на Калининской атомной станции, и "Нейтрино-4" [57] на реакторе CM-3 мощностью 100 МВт в Димитровграде также представили предварительные результаты анализа данных. Результаты эксперимента DANSS, основанные на измерениях спектра антинейтрино на расстоянии от центра активной зоны от 10,7 до 12,7 м, показаны на рис. 8. DANSS, как и NEOS, существенно ограничивает область допустимых параметров смешивания и исключает наиболее вероятные значения разности квадратов масс и угла смешивания активного и стерильного нейтрино. Эксперимент "Нейтрино-4" измеряет поток антинейтрино на расстоянии 6–10 м от центра активной зоны. Предварительный анализ данных показывает, что в этом эксперименте не наблюдается характерного для наличия стерильного нейтрино отклонения потока антинейтрино от функции $\sim 1/R^2$, где R — расстояние от центра активной зоны до детектора. DANSS и "Нейтрино-4"

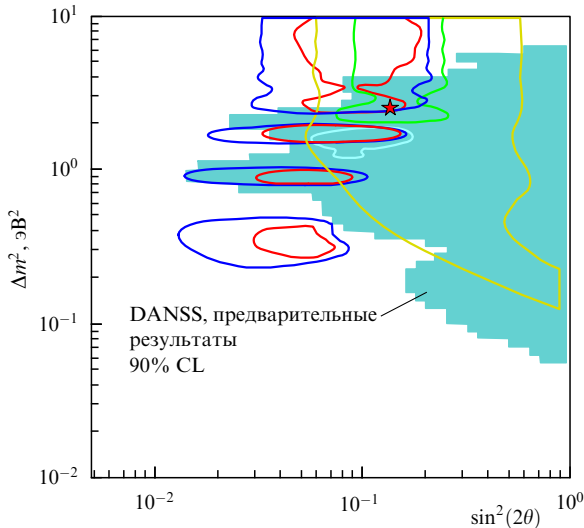


Рис. 8. (В цвете онлайн.) Предварительное ограничение на параметры осцилляций в схеме для стерильных нейтрино $3 + 1$, полученное в эксперименте DANSS [56]. Область синего цвета исключена на уровне 90 % CL. Звёздочкой показаны оптимальные значения параметров Δm^2 и $\sin^2(2\theta)$ для стерильного нейтрино, которые следуют из реакторной аномалии. Кривыми разного цвета выделены разрешённые области по результатам разных экспериментов. (Адаптированный рисунок из работы [58].)

продолжают набор статистики, и в ближайшее время планируется улучшить их чувствительность к стерильным нейтрино.

4. Ожидаемые результаты и дальнейшие перспективы

Какой чувствительности к иерархии масс и δ_{CP} можно ожидать от текущих экспериментов T2K и NOvA? Предполагая, что полная интегральная светимость T2K составит 8×10^{21} протонов на мишени (protons on target, POT), что позволит достичь чувствительности на уровне $\sim 2\sigma$ для фазы $\delta_{CP} = -\pi/2$. В процессе обсуждения находится предложение о втором этапе этого эксперимента — T2K-II. В этом случае ожидается набрать интегральный поток 20×10^{21} POT и достичь чувствительности около 3σ к эффекту CP -нарушения, если $\delta_{CP} = -\pi/2$. Набор статистики в эксперименте NOvA будет проводиться в течение шести лет (три года с пучком нейтрино и три года с пучком антинейтрино) при мощности пучка 700 кВт. Ожидается, что удастся достичь чувствительности на уровне $> 2\sigma$ для значений фазы $\delta_{CP} = \pi/2$ или $-\pi/2$. В эксперименте NOvA может быть получена чувствительность к иерархии масс на уровне $\sim 3\sigma$ для указанных значений δ_{CP} . Обсуждается план продолжения набора статистики в эксперименте NOvA до 2024 г. Предполагается начиная с 2019 г. использовать протонный пучок мощностью 800 кВт, а в 2021 г. достичь мощности 900 кВт. В случае реализации этого плана NOvA может достичь статистической значимости около $4,5\sigma$ к иерархии масс и исключить CP -сохранение на уровне 3σ [59].

В настоящее время идёт подготовка проектов двух ускорительных экспериментов с длинной базой, основными целями которых являются чувствительный поиск CP -нарушения и определение иерархии масс нейтрино, и

одного реакторного эксперимента с длинной базой, в котором планируется определить иерархию масс нейтрино.

Эксперимент DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment). В эксперименте DUNE (США) [60] будет использоваться нейтринный пучок из Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаб), а дальний нейтринный детектор будет состоять из четырёх жидкоаргоновых время-проекционных камер. В эксперименте планируется использовать детекторы двух типов: однофазную время-проекционную камеру и двухфазную камеру. Прототипы обоих вариантов детекторов в настоящее время разрабатываются в рамках Нейтринной платформы (ЦЕРН) [61]. Четыре модуля с общей активной массой 40 кт будут расположены под землёй в нейтринной лаборатории Хоумстейк в Южной Дакоте на расстоянии 1300 км от Фермилаб. Работы по сооружению подземной лаборатории для комплекса детекторов DUNE начались в июле 2017 г. Мощность протонного пучка составит 1,3 МВт с возможностью дальнейшего повышения до 2,4 МВт. Планируется начать набор статистики с пучком нейтрино из Фермилаб в 2026 г. Ожидается, что чувствительность $> 5\sigma$ для 50%-ного интервала возможных значений δ_{CP} будет достигнута после 10 лет набора статистики. В этом эксперименте различие между нормальной и инверсной иерархиями масс может быть установлено на уровне более 5σ для всего интервала возможных значений δ_{CP} , от 0 до 2π .

Эксперимент T2HK (Tokai-to-Hyper-Kamiokande). Основной целью эксперимента T2HK (Япония) [62] являются чувствительный поиск нарушения CP -симметрии и измерение δ_{CP} . В этом проекте будет использоваться настроенный на первый осцилляционный максимум интенсивный внеосевой пучок мюонных нейтрино и антинейтрино из протонного комплекса J-PARC и два гигантских водных черенковских детектора Hyper-Kamiokande общей массой 0,52 Мт, расположенных на расстоянии 295 км от J-PARC. На первом этапе эксперимента будет функционировать один черенковский детектор массой 0,26 Мт, а мощность протонного пучка составит 1,3 МВт, что позволит в этой конфигурации за 10 лет набора статистики получить чувствительность к δ_{CP} , лучшую чем 5σ , в интервале более 57 % возможных значений этого параметра. Если будет определена иерархия масс (например, в другом эксперименте), то чувствительность к CP -нарушению для $\delta_{CP} \sim -\pi/2$ составит $\sim 8\sigma$. Этот проект в августе 2017 г. был включён в дорожную карту больших проектов Японии с наивысшим статусом. Финансирование проекта должно быть начато в 2019 г., а завершить создание детектора и начать набор статистики предполагается в 2026 г. Одновременно будет проводиться работа по повышению интенсивности протонного пучка J-PARC и модернизации ближнего нейтринного детектора.

Чувствительность упомянутых выше экспериментов с длинной базой иллюстрируется на рис. 9 и 10. Эксперименты T2HK (первая фаза с одним черенковским детектором) и DUNE имеют реальные шансы на открытие CP -нарушения в широком диапазоне значений CP -нечётной фазы. Более того, ожидается, что точность измерения CP -нечётной фазы составит $\sigma \approx 22^\circ$ для значений $\delta_{CP} \approx \pm \pi/2$ и около 7° , если δ_{CP} равна 0 или π .

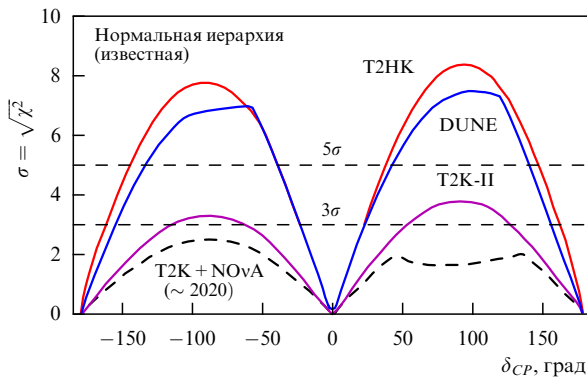


Рис. 9. Статистическая значимость исключения CP -сохранения (обнаружение CP -нарушения) в нейтринных осцилляциях [63]. Предполагается, что иерархия масс нейтрино известна. В эксперименте T2HK с одним черенковским детектором открытие CP -нарушения на уровне $\geq 5\sigma$ возможно для $\geq 57\%$ всех допустимых значений δ_{CP} . Эксперимент DUNE имеет близкую чувствительность. Эксперимент T2K-II может достичь чувствительности к CP -нарушению $\geq 3\sigma$ для значений δ_{CP} около $\pm\pi/2$. Показана также чувствительность, которой могут достичь T2K и NOvA в случае комбинированного анализа данных.

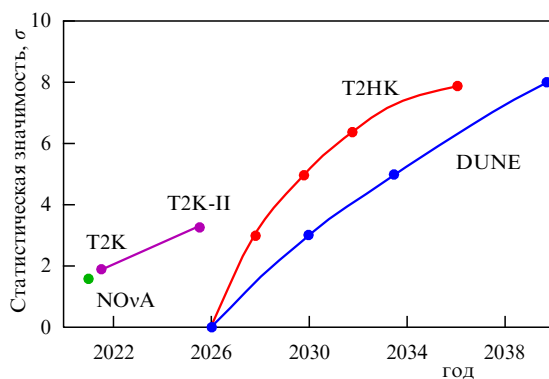


Рис. 10. Статистическая значимость эффекта CP -нарушения для нормальной иерархии масс и значения $\delta_{CP} = -\pi/2$, которая может быть достигнута в экспериментах с длинной базой [64]. Предполагается, что эксперименты T2HK (красная кривая) с одним черенковским детектором и DUNE начнут набор статистики в 2026 г.

Реакторный эксперимент JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory). Основными задачами эксперимента JUNO (Китай) [65] являются определение иерархии масс нейтрино и прецизионное измерение осцилляционных параметров. Работы по сооружению подземной лаборатории были начаты в январе 2015 г. В качестве детектора реакторных антинейтрино будет использоваться сферический детектор диаметром около 35 м, заполненный жидким сцинтиллятором массой 20 кт. Принципиально важным параметром создаваемой установки, необходимым для достижения основных целей эксперимента, является энергетическое разрешение нейтринного детектора. Необходимо получить разрешение $3\%/\sqrt{E}$ [МэВ], а также осуществить калибровку абсолютной энергетической шкалы детектора и контроль за ней с точностью, лучшей чем 1%, что является трудной задачей и требует нового качественного шага в развитии технологии больших нейтринных детекторов. В эксперименте планируется определить иерархию масс нейтрино на уровне статистической значимости (3–4) σ и измерить

параметры смешивания $\sin^2 \theta_{12}$ и Δm_{21}^2 с точностью, лучшей чем 1%, после шести лет набора статистики.

Каких результатов можно ожидать в ближайшем будущем от экспериментов, нацеленных на поиск лёгких стерильных нейтрино? Новые данные текущих экспериментов с атмосферными реакторными и ускорительными нейтрино позволят ещё больше ограничить область допустимых параметров стерильных нейтрино. Например, коллаборация NOvA опубликовала первый результат по поиску стерильных нейтрино, полученный посредством измерения дефицита (уменьшения) нейтринных событий через нейтральные токи в дальнем детекторе [66]. Решающий тест аномалии LSND планируется выполнить в Фермилаб в рамках нейтринной программы экспериментов с короткой базой, основной целью которых является чувствительный поиск стерильных нейтрино с массой около 1 эВ [67]. Для этих измерений будут использованы три детектора на основе жидкоаргоновых время-проекционных камер: ближний детектор LAr1-ND, дальний детектор модернизированный ICARUS-T600 (ICARUS — аббр. от Imaging Cosmic And Rare Underground Signals) и детектор MicroBooNE. Для интегрального потока $6,6 \times 10^{20}$ POT при наборе статистики с детекторами LAr1-ND и ICARUS-T600, а также для потока $13,2 \times 10^{20}$ POT при измерениях с детектором MicroBooNE чувствительность этих измерений к осцилляциям $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ в области LSND-сигнала, соответствующая доверительному интервалу 99%, составит $\sim 5\sigma$. Ожидается, что набор статистики начнётся в 2020 г.

"Реакторная аномалия" будет протестирована в нескольких текущих и находящихся в стадии подготовки к набору статистики реакторных экспериментах с очень короткой базой. К упомянутым выше NEOS, DANSS и "Нейтрино-4" следует добавить эксперимент SoLid (Short oscillation search with Lithium-6 detector) [68], который будет проведён на реакторе BR2 в Центре ядерных исследований Бельгии (SCK (Studie Centrum voor Kernenergie)/CEN (Centre D'Etude de l'energie Nucléaire)), эксперимент PROSPECT (PRecision Oscillation and SPECTrum experiment) [69] на реакторе мощностью 85 МВт в Окриджской национальной лаборатории (США) и эксперимент STEREO [70] на исследовательском реакторе в Институте Лауэ–Ланжевена в Гренобле (Франция).

Проверка "галлиевой аномалии" будет выполнена в эксперименте SOX (Short distance neutrino Oscillations with Borexino) [71], где детектор Borexino будет применён для регистрации электронных антинейтрино от искусственного источника ^{144}Ce активностью около 100–150 кКи, который будет изготовлен на предприятии "Маяк" в России. Источник будет находиться на расстоянии около 8 м от центра детектора. Предполагается начать измерения в 2018 г., и после набора статистики в течение 18 месяцев ожидается, что эксперимент достигнет чувствительности, позволяющей исключить большую часть области осцилляционных параметров, соответствующих "галлиевой аномалии". Эта аномалия может быть протестирована также в эксперименте BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) [72], в котором поток электронных нейтрино от источника ^{51}Cr активностью 3 МКи планируется измерить на двух расстояниях: около 0,4 и 0,8 м. В качестве нейтринной мишени/детектора будет использоваться двухзонный реактор, заполненный жидким галлием.

5. Заключение

Поиск нарушения CP -симметрии в нейтринных осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино и поиск стерильных нейтрино являются одними из фундаментальных задач нейтринной физики. После открытия осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и обнаружения большой величины угла θ_{13} появилась реальная возможность обнаружения CP -нарушения в нейтринных осцилляциях. Первые указания на максимальное CP -нарушение уже получены в текущих экспериментах с длинной базой T2K и NOvA. Эксперименты следующего поколения DUNE и T2HK имеют реальные перспективы обнаружить нарушение CP -симметрии с высокой статистической значимостью и измерить фазу δ_{CP} . Несколько экспериментальных результатов, так называемые нейтринные аномалии, не укладывающиеся в схему смешивания трёх активных нейтрино, пока не получили дальнейших экспериментальных подтверждений. Напротив, последние результаты существенно уменьшили область допустимых параметров для лёгких стерильных нейтрино, существованием которых можно было бы объяснить эти аномалии. В свою очередь однозначное подтверждение хотя бы одной аномалии, безусловно, будет прорывным результатом и откроет новую страницу нейтринной физики. Широкая экспериментальная программа с использованием ускорителей, реакторов и искусственных источников нейтрино даёт реальные шансы решить проблему лёгких стерильных нейтрино в самом ближайшем будущем.

Автор выражает благодарность В.А. Рубакову, инициировавшему написание этой статьи. Считаю приятным долгом выразить глубокую признательность за полезные советы, замечания и плодотворные обсуждения А. Блонделю, Д. Варку, М. Зито, С.С. Герштейну, Д.С. Горбунову, М.В. Данилову, А.П. Сереброву и М.М. Хабибуллину.

Работа поддержана Программой Президиума РАН "Фундаментальные свойства материи и астрофизика" и совместным грантом Российского фонда фундаментальных исследований и JSPS (Japan Society for Promotion of Science) № 17-52-50038-ЯФ.а.

Добавление при корректуре. За несколько месяцев, прошедших после написания статьи, произошёл ряд важных событий. Эксперимент SOX с использованием детектора Wogehino был, к сожалению, отменён из-за невозможности изготовления интенсивного источника нейтрино радионуклида церия-144. На XXVIII международной конференции по физике нейтрино и астрофизике, которая проходила в Гейдельберге (Германия) с 4 по 9 июня 2018 г. (<https://www.mpi-hd.mpg.de/nu2018/>), было представлено несколько новых интересных результатов. В эксперименте NOvA было зарегистрировано 18 электронных антинейтрино при ожидаемом фоне 5,3 события. Было объявлено об обнаружении осцилляций $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ со статистической значимостью $> 4\sigma$. Этот эксперимент также представил новый результат по измерению угла смешивания θ_{23} , допустимая область значений которого изменилась по сравнению с таковой для данных, показанных на рис. 4, и теперь находится в лучшем согласии с результатами других экспериментов. Реакторные эксперименты с короткой базой DANSS, PROSPECT и STEREO, измеряющие поток и спектр реакторных антинейтрино вблизи активной зоны, доложили новые ре-

зультаты, в которых не обнаружили "дефицита" потока нейтрино и искажений спектра. Таким образом, "реакторная аномалия" не находит дальнейшего подтверждения в нескольких независимых экспериментах, и можно вполне обоснованно предположить, что этот эффект будет окончательно "закрыт" в ближайшие один-два года.

Список литературы

1. Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **33** 549 (1957); Pontecorvo B *Sov. Phys. JETP* **6** 429 (1958)
2. Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **34** 247 (1958); Pontecorvo B *Sov. Phys. JETP* **7** 172 (1958)
3. Kajita T *Rev. Mod. Phys.* **88** 030501 (2016)
4. McDonald A B *Rev. Mod. Phys.* **88** 030502 (2016)
5. Maki Z, Nakagawa M, Sakata S *Prog. Theor. Phys.* **28** 870 (1962)
6. Биленький С М, Понтекорво Б М *УФН* **123** 181 (1977); Bilen'kii S M, Pontecorvo B *Sov. Phys. Usp.* **20** 776 (1977)
7. Герштейн С С, Кузнецов Е П, Рябов В А *УФН* **167** 811 (1997); Gershtein S S, Kuznetsov E P, Ryabov V A *Phys. Usp.* **40** 773 (1997)
8. Биленький С М *УФН* **173** 1171 (2003); Bilen'kii S M *Phys. Usp.* **46** 1137 (2003)
9. Ахмедов Е Х *УФН* **174** 121 (2004); Akhmedov E Kh *Phys. Usp.* **47** 117 (2004)
10. Троицкий С В *УФН* **182** 77 (2012); Troitsky S V *Phys. Usp.* **55** 72 (2012)
11. Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 041801 (2011)
12. Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **112** 061802 (2014)
13. Agafonova N et al. (OPERA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **115** 121802 (2015)
14. Adamson P et al. (NOvA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **116** 151806 (2016)
15. Adamson P et al. (NOvA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **118** 231801 (2017)
16. Abe Y et al. (Double Chooz Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 131801 (2012)
17. An F P et al. *Phys. Rev. Lett.* **108** 171803 (2012)
18. Ahn J K et al. (RENO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 191802 (2012)
19. Jarlskog C *Phys. Rev. Lett.* **55** 1039 (1985)
20. Gavela M B et al. *Mod. Phys. Lett. A* **9** 795 (1994)
21. Fukugita M, Yanagida T *Phys. Lett. B* **174** 45 (1986)
22. Pascoli S, Petcov S T, Riotto A *Phys. Rev. D* **75** 083511 (2007)
23. Molinaro E, Petcov S T *Eur. Phys. J. C* **61** 93 (2009)
24. Petcov S T *Int. J. Mod. Phys. A* **29** 1430028 (2014)
25. Abe K et al. (T2K Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **659** 106 (2011)
26. Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. D* **88** 032002 (2013)
27. Куденко Ю Г *УФН* **181** 569 (2011); Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **54** 549 (2011)
28. Куденко Ю Г *УФН* **181** 997 (2011); Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **54** 961 (2011)
29. Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. D* **91** 072010 (2015)
30. Kim J, in *19th Intern. Workshop on Neutrinos from Accelerators, NUFAC2017, Uppsala, Sweden, 25–30 September 2017*, talk given on behalf of the T2K Collaboration
31. Patrignani C et al. (Particle Data Group) *Chin. Phys. C* **40** 100001 (2016)
32. Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **118** 151801 (2017)
33. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **120** 071801 (2018); arXiv:1707.07081
34. Adamson P et al. (NOvA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **118** 151802 (2017)
35. Wendell R (Super-Kamiokande Collab.) *AIP Conf. Proc.* **1666** 100001 (2015)
36. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **112** 191801 (2014)
37. Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. D* **97** 072001 (2018); arXiv:1710.09126
38. An F P et al. (Daya Bay Collab.) *Phys. Rev. D* **95** 072006 (2017)

39. Seo S-H (RENO Collab.), arXiv:1710.08204
40. Dawson J, in *17th Intern. Workshop on Next Generation Neutron Decay and Neutrino Detectors (NNN17), Warwick, UK, 26–28 October 2017*, talk given on behalf of the Double Chooz Collab.
41. Aguilar A et al. (LSND Collab.) *Phys. Rev. D* **64** 112007 (2001)
42. Aguilar-Arevalo A A et al. (MiniBooNE Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **105** 181801 (2010)
43. Abdurashitov J N et al. *Phys. Rev. C* **73** 045805 (2006)
44. Hampel W et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **420** 114 (1998)
45. Mention G et al. *Phys. Rev. D* **83** 073006 (2011)
46. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. D* **81** 052004 (2010)
47. Hayes A C et al. *Phys. Rev. D* **92** 033015 (2015)
48. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **117** 071801 (2016)
49. Kopp J et al. *J. High Energ. Phys.* **2013** 50 (2013)
50. Collin G H et al. *Nucl. Phys. B* **908** 354 (2016)
51. An F P et al. (Daya Bay Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **117** 151802 (2016)
52. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **117** 151803 (2016)
53. Adamson P et al. (Daya Bay Collab., MINOS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **117** 151801 (2016)
54. Achkar B et al. (Bugey-3 Collab.) *Nucl. Phys. B* **434** 503 (1995)
55. Ko Y J et al. *Phys. Rev. Lett.* **118** 121802 (2017)
56. Danilov M, in *52nd Rencontres de Moriond EW 2017, La Thuile, Italy, 18–25 March 2017*, talk given on behalf of the DANSS Collab.
57. Serebrov A P et al., arXiv:1708.00421
58. Ashenfelter J et al. *J. Phys. G* **43** 113001 (2016); arXiv:1512.02202
59. Davies G S, in *19th Intern. Workshop on Neutrinos from Accelerators (NUFACT2017), Uppsala, Sweden, 25–30 September 2017*, talk given on behalf of the NOvA Collab
60. Acciarri R et al., arXiv:1601.05471
61. CENF. CERN Neutrino Platform, <http://cenf.web.cern.ch/>
62. Abe K et al. (Hyper-Kamiokande Proto-Collab.) *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2015** 053C02 (2015)
63. Shimizu I, in *17th Intern. Workshop on Next Generation Neutron Decay and Neutrino Detectors (NNN17), Warwick, UK, 26–28 October 2017*, talk given on behalf of the Hyper-Kamiokande Collab.
64. Nakaya T, in *28th Intern. Symp. on Lepton Photon Interactions at High Energies, Guangzhou, China, 7–12 August 2017*
65. An F et al. (JUNO Collab.) *J. Phys. G* **43** 030401 (2016)
66. Adamson P et al. (NOvA Collab.) *Phys. Rev. D* **96** 072006 (2017)
67. Acciarri R et al., arXiv:1503.01520
68. Abreu Y et al. (SoLid Collab.) *JINST* **12** P04024 (2017)
69. Ashenfelter J et al. (PROSPECT Collab.) *J. Phys. G* **43** 113001 (2016)
70. Manzanillas L *PoS* **283** 033 (2017); arXiv:1702.02498
71. Bellini G et al. *J. High Energ. Phys.* **2013** 38 (2013)
72. Barinov V et al. *Phys. Rev. D* **93** 073002 (2016)

Neutrino oscillations: recent advances and future prospects

Yu.G. Kudenko

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences,
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation;
Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
Institutskii per. 9, 141701 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation;
National Research Nuclear University MEPhI,
Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation
E-mail: kudenko@inr.ru*

A brief review of recent results on neutrino oscillations from accelerator and reactor experiments is presented. An emphasis is placed on the indication of the CP violation in neutrino oscillations obtained in long baseline accelerator experiments. The latest results of a search for a sterile neutrino are discussed and nearest term prospects for long and short baseline oscillation experiments are outlined.

Keywords: neutrino oscillations, sterile neutrino, CP violation, neutrino mass hierarchy, short and long baseline experiments

PACS numbers: 14.60.Pq, 25.30.Pt

Bibliography — 72 references

Received 11 October 2017, revised 23 December 2017

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (8) 821–830 (2018)

Physics–Uspekhi **61** (8) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.12.038271>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.12.038271>