

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Б.М. ПОНТЕКОРВО

Нейтринные ускорительные эксперименты с длинной базой: результаты и перспективы

Ю.Г. Куденко

Представлены результаты, полученные в нейтринных экспериментах с длинной базой в последнее время. Обсуждаются перспективы по определению иерархии масс и поиску CP -нарушения в нейтринных осцилляциях.

PACS numbers: 14.60.Pq, 25.30.Pt

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201405d.0502

Содержание

1. Введение (502).
 2. Современный статус нейтринных осцилляций (502).
 3. Эксперимент T2K (503).
 4. Ближайшие задачи (505).
 5. Отдалённое будущее (506).
 - 5.1. Эксперимент LBNE. 5.2. Эксперимент LAGUNA – LBNO.
 - 5.3. Эксперимент T2HK. 5.4. Нейтринный эксперимент на базе ESS. 5.5. Неускорительные эксперименты.
 6. Заключение (508).
- Список литературы (509).

1. Введение

Нейтринная физика является одной из наиболее динамичных и непредсказуемых областей физики элементарных частиц, и её бурное развитие происходит в русле блестящих идей, выдвинутых Бруно Максимовичем Понтекорво в 1950–1960-е годы. В первую очередь, это гипотеза нейтринных осцилляций $\nu \rightarrow \bar{\nu}$, которая была сформулирована Б.М. Понтекорво [1, 2] в 1957 г. по аналогии с осцилляциями $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$. В 1968 г. Б.М. Понтекорво совместно с В.Н. Грибовым предположили, что нейтрино, рождённые с определённым ароматом, могут менять свой аромат (нарушать лептонное число) с вероятностью, зависящей от расстояния до источника [3].

Ю.Г. Куденко. Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7А, 117312 Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт, пер. Институтский 9, 141700 г. Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация; Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация
Тел: (495) 851-01-84
E-mail: kudenko@inr.ru

Статья поступила 18 февраля 2014 г.

Осознание того, что правое и левое нейтрино не могут участвовать в слабых взаимодействиях, позволило Б.М. Понтекорво ввести понятие "стерильное" нейтрино.

В последние 15–20 лет в нейтринной физике было получено много фундаментальных результатов, важнейшим из которых является открытие нейтринных осцилляций, предсказанных Б.М. Понтекорво. Этот результат явился первым прямым экспериментальным доказательством модели. Как следует из наличия осцилляций, нейтрино имеют малую ненулевую массу, смешиваются, и лептонные числа не сохраняются. Это противоречит положениям Стандартной модели, в соответствии с которыми существуют три типа (аромата) 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 три типа активных нейтрино, ν_e, ν_μ, ν_τ , имеющих левую спиральность, связываются через унитарную матрицу U [4] (матрица смешивания Понтекорво–Маки–Накагавы–Сакаты (Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata), или PMNS-матрица) с массовыми состояниями ν_1, ν_2, ν_3 , которым соответствуют массы m_1, m_2, m_3 . В общем случае элементы этой матрицы являются комплексными величинами. 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, двух разностей квадратов масс, $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ и $\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2$, и дираковской CP -нечётной фазы δ . Две майорановские фазы, присутствующие в матрице U , не оказывают влияния на осцилляции аромата нейтрино.

2. Современный статус нейтринных осцилляций

С момента открытия осцилляций был достигнут удивительный прогресс в измерении осцилляционных пара-

метров: $\sin^2 \theta_{12} = 0,857 \pm 0,024$, $\sin^2 (2\theta_{23}) > 0,95$ для 90%-ного доверительного интервала (Confidence Level — CL), $\Delta m_{21}^2 = (7,50 \pm 0,20) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$, $|\Delta m_{32}^2| = (2,32^{+0,132}_{-0,08}) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$. Как видно из приведённых выше данных, ошибки этих параметров составляют всего несколько процентов. Следует отметить, что знак Δm_{32}^2 неизвестен, т.е. не определена иерархия масс нейтрино. Возможна как нормальная иерархия — $m_3 \gg m_2 > m_1$, так и инверсная — $m_2 > m_1 \gg m_3$. Подробно физика нейтринных осцилляций, осцилляционные эксперименты и их результаты рассматриваются в обзорах [5–10].

Наиболее существенным результатом последнего времени в нейтринной физике явилось измерение угла θ_{13} . До недавнего времени угол θ_{13} оставался неизвестным параметром, для него был найден только верхний предел: $\sin^2 (2\theta_{13}) < 0,15$ (90 % CL) в эксперименте Chooz [11]. Многие теоретические модели, в которых делались попытки объяснить экспериментальные данные и предложить механизмы смешивания нейтрино, предсказывали очень малое или нулевое значение этого угла. В 2011 г. в ускорительном эксперименте T2K (Tokai-to-Kamioka) было получено первое указание на ненулевую величину угла θ_{13} [12]. Этот результат вскоре был подтверждён в другом ускорительном эксперименте — MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) [13]. Наиболее точные измерения этого угла были выполнены в 2012 г. в реакторных экспериментах Double Chooz [14], Daya Bay [15] и RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) [16]. Усреднённое значение угла θ_{13} по трём реакторным экспериментам составило величину $9,1^\circ \pm 0,6^\circ$ [17]. В течение короткого периода (около двух лет) угол θ_{13} был измерен с ошибкой, близкой к точностям, достигнутым для двух других углов смешивания за 15 лет.

Таким образом, оказалось, что все три угла смешивания, θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , PMNS-матрицы не равны нулю и происходит сильное смешивание между различными ароматами нейтрино. Следующим важным результатом явилось открытие осцилляций мюонных нейтрино в электронные [18] в эксперименте T2K.

3. Эксперимент T2K

Общая схема эксперимента T2K показана на рис. 1. Основными элементами установки T2K [19, 20] являются нейтринный канал, созданный на базе сильноточного протонного ускорителя JPARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), комплекс ближних нейтринных детекторов (ND-280), расположенный в шахте на расстоянии 280 м от мишени, и дальний детектор Супер-Камиоканде, находящийся на расстоянии 295 км от мишени. Комплекс ND-280 [21, 22], состоящий из двух нейтринных детекторов, используется для измерения параметров нейтринного пучка вблизи мишени (до осцилляций), постоянного контроля за его свойствами и измерения сечений взаимодействия нейтрино с ядрами. Один детектор (монитор нейтринного пучка INGRID (Interactive Neutrino GRID)) расположен на оси пучка, т.е. под нулевым углом по отношению к направлению протонного пучка, а второй ближний детектор нейтрино расположен под углом $2,5^\circ$ на оси, соединяющей распадный объём и дальний детектор Супер-Камиоканде. В эксперименте T2K впервые используется квазимоноэнергетичный неосевой (off-axis) пучок нейтрино. Как следует из кинематики распада $\pi \rightarrow \mu + \nu$, для небольших углов между импульсом пиона и нейтрино энергия нейтрино E_ν практически не зависит от энергии пиона E_π . Угол $2,5^\circ$ выбран таким образом, чтобы пик интенсивности энергетического спектра нейтрино был настроен на первый

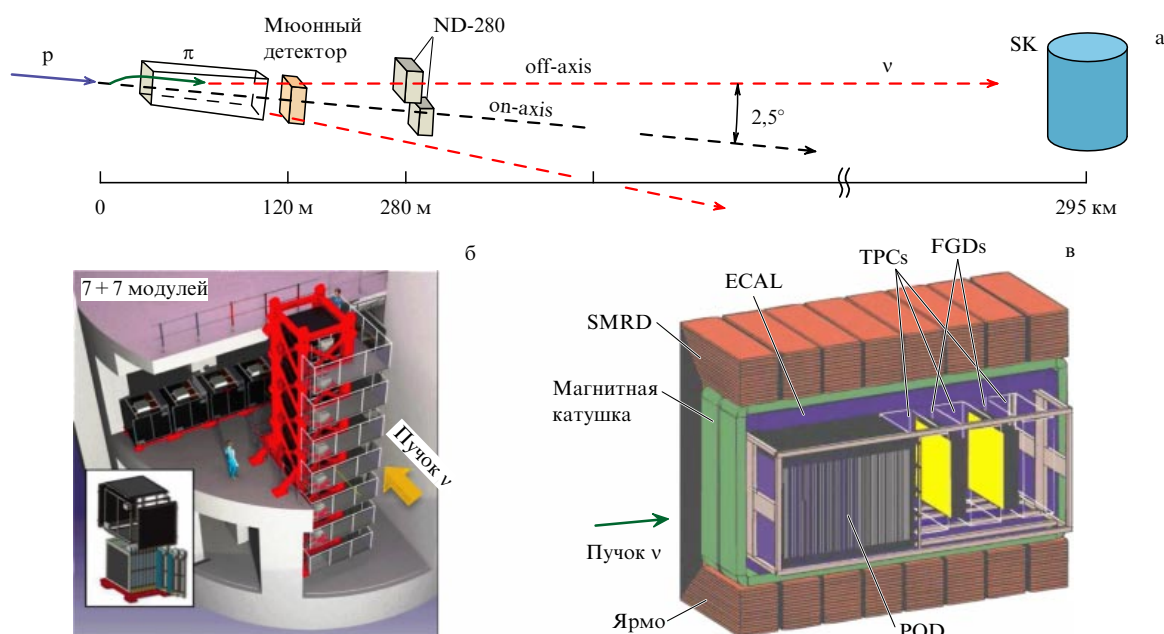


Рис. 1. Схема эксперимента T2K. (а) Основные элементы установки: нейтринный пучок; монитор нейтринного пучка; ближний детектор нейтрино ND-280, расположенный на расстоянии 280 м от мишени; дальний нейтринный детектор Супер-Камиоканде (SK). (б) Общий вид установленного на оси (on-axis) монитора нейтринного пучка INGRID. (в) Ближний (off-axis) детектор нейтрино, включающий в себя детектор нейтральных пионов (POD), электромагнитный калориметр (ECAL), детектор пробега мюонов (SMRD) и трековый детектор, состоящий из трёх времяпроекционных камер (TPC) и двух высокосегментированных сцинтилляционных детекторов (FGD).

осцилляционный максимум для $L = 295$ км и $|\Delta m_{32}^2| = 2,4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$. Эти условия определяют характерную энергию нейтринного пучка в этом эксперименте: $E_\nu = \Delta m_{32}^2 L / 2\pi \simeq 0,6 \text{ ГэВ}$.

В настоящее время мощность 30-ГэВ-ного протонного пучка JPARC составляет 230 кВт, что соответствует интенсивности около $1,1 \times 10^{14}$ протонов на импульс при длительности импульса около 3,0 мкс и быстром выводе пучка на мишень каждые 2,5 с. При энергиях, соответствующих максимуму интенсивности нейтринного спектра, примесь электронных нейтрино от распадной цепочки $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ и распадов каонов составляет около 0,5 % для угла $2,5^\circ$.

В качестве дальнего детектора используется водный черенковский детектор Супер-Камиоканде [23], который регистрирует нейтрино в диапазоне энергий от 4,5 МэВ до 1 ТэВ. Размер, форма и направление черенковского конуса используются для идентификации события: однокольцевое мюоноподобное (μ -like), однокольцевое электроноподобное (e -like) или многокольцевое событие. Импульсное разрешение детектора составляет 2,4 % для мюонов с импульсом 1 ГэВ/с.

Результат T2K. С января 2010 г. по апрель 2013 г. в эксперименте T2K было накоплено $6,4 \times 10^{20}$ протонов на мишени (protons on target — p.o.t.). Детали анализа экспериментальных данных подробно описаны в работе [24]. Всего в Супер-Камиоканде было зарегистрировано 532 события от нейтрино, пролетевших расстояние 295 км от JPARC. Энергия каждого из этих событий полностью измерялась внутренним детектором при отсутствии какого-либо сигнала во внешнем детекторе. Ожидаемый фон от атмосферных нейтрино составил 0,07 событий. Из 532 нейтринных событий 28 событий были идентифицированы как электроноподобные события — кандидаты в электронные нейтрино [25]. Ожидаемое число электроноподобных событий в отсутствие осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ($\theta_{13} = 0$) составило бы всего $4,92 \pm 0,55$ события за это время измерений. Распределение по энергии 28 событий и ожидаемый фон показаны на рис. 2. Распределение зарегистрированных электронов по импульсу и углу относительно направления нейтринного

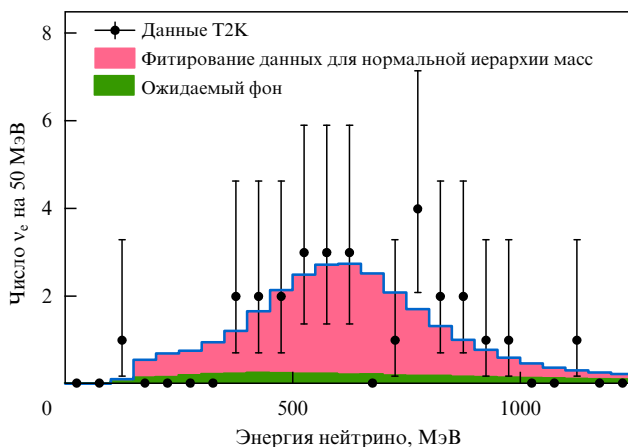


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Распределение по энергии 28 электронных нейтрино, зарегистрированных дальним детектором Супер-Камиоканде. Гистограммы показывают: фитирование сигнала для нормальной иерархии масс нейтрино (красный цвет), ожидаемый фон (зеленый цвет).

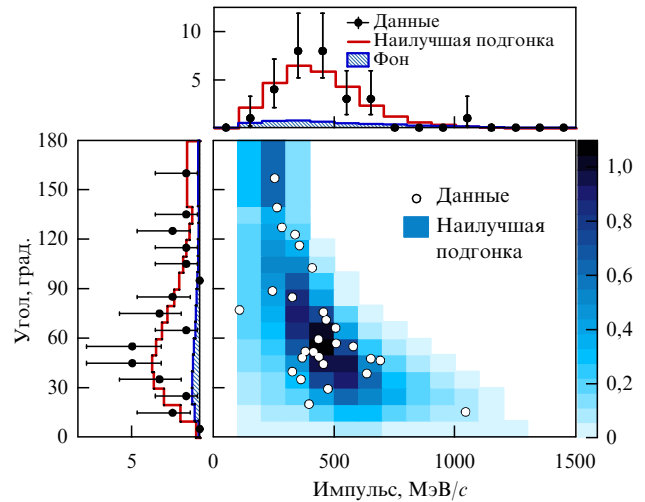


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Распределение по импульсу и углу относительно направления нейтринного пучка 28 электронных событий от квазиупругого рассеяния электронных нейтрино. Прямоугольниками разного цвета показано распределение электронов от зарегистрированных электронных нейтрино, полученное моделированием методом Монте-Карло для $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,150$, соответствующего наилучшей подгонке данных для случая нормальной иерархии масс и $\delta = 0$, $\Delta m_{32}^2 = 2,4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ [18].

пучка приведено на рис. 3. Статистический анализ показывает, что измеренный эффект появления электронных нейтрино, т.е. осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, составляет $7,3\sigma$. Вероятность того, что случайная статистическая флуктуация может привести к наблюдаемому избытку электронных нейтрино в пучке мюонных нейтрино, чрезвычайно мала, $< 10^{-12}$. Этот результат является первым прямым наблюдением превращения мюонных нейтрино в электронные нейтрино, т.е. впервые осцилляции нейтрино обнаружены как появление электронных нейтрино в чистом пучке мюонных нейтрино, в то время как в предыдущих осцилляционных экспериментах измерялся "дефицит" (исчезновение) различных типов нейтрино.

Зависимость величины CP -нечётной фазы δ от значения $\sin^2(2\theta_{13})$ для нормальной и инверсной иерархий масс показана на рис. 4. Здесь также приведено полученное в реакторных экспериментах значение $\sin^2(2\theta_{13})$ [17]. Из рисунка видно, что сравнение величины $\sin^2(2\theta_{13})$ из реакторных экспериментов с данными T2K (при улучшении точности измерений $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ и угла смешивания θ_{23}) может стать первым шагом в поиске CP -нарушения и даже указать на существование этого эффекта в наиболее благоприятном случае, например, если $\delta \simeq -\pi/2$.

Комбинация этого результата T2K с величиной θ_{13} , полученной в реакторных экспериментах, позволила получить первые экспериментальные ограничения на CP -нечётную фазу δ . Функция максимального правдоподобия $-2\Delta \ln L$ для всех возможных значений δ , от $-\pi$ до π , показана на рис. 5. Сплошная (пунктирная) кривая показывает 90%-ный уровень доверительной вероятности (CL) для нормальной (инверсной) иерархии масс. Для нормальной иерархии масс область значений $\delta = (0,19 - 0,80)\pi$, лежащая выше соответствующей сплошной кривой, исключена на уровне 90 % CL. Для случая инверсной иерархии масс (пунктирная кривая) значения δ в интервалах от $-\pi$ до $-0,97\pi$ и от $-0,04\pi$ до π исключены на уровне 90 % CL.

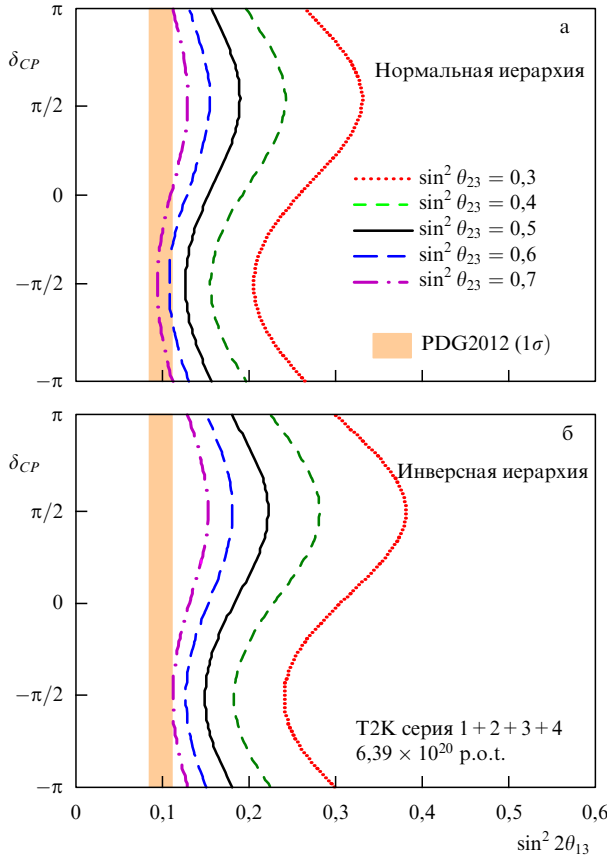


Рис. 4. Результат T2K, показывающий зависимость δ от $\sin^2(2\theta_{13})$ для нескольких возможных значений углов смешивания $\sin^2\theta_{23}$ в случае нормальной (а) и инверсной (б) иерархии масс нейтрино. Сплошная чёрная кривая относится к максимальному смешиванию, $\theta_{23} = \pi/4$. Приведено также значение $\sin^2(2\theta_{13})$, полученное в реакторных экспериментах (обозначено как PDG2012).

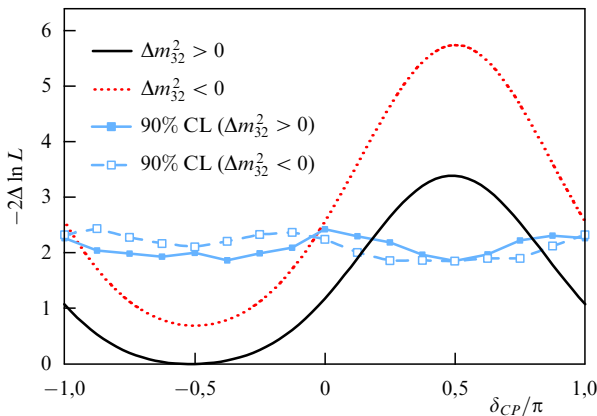


Рис. 5. Зависимость функции максимального правдоподобия $-2\ln L$ от δ [18]. Сплошная и пунктирная кривые показывают 90%-ный уровень доверительной вероятности соответственно для нормальной и инверсной иерархий масс. Область значений δ выше этих кривых исключена на уровне 90 % CL.

Следует также отметить, что недавно ещё в двух экспериментах были получены указания на эффект "появления" в осцилляциях нейтрино. Это прямое наблюдение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. В эксперименте Супер-Камиоканде с атмосферными нейтрино на уровне $3,8\sigma$ наблюдался избыток зарегистрированных в детекторе тау-нейтрино по сравнению с потоком, ожидаемым в отсут-

ствии осцилляций [26]. В эксперименте с длинной базой OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus), в котором ведётся поиск осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, в настоящее время обнаружено три тау-нейтрино при ожидаемом фоне 0,23 события и эффект появления тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино составляет $3,5\sigma$ [27].

4. Ближайшие задачи

Фундаментальными вопросами, стоящими перед нейтринной физикой, являются следующие: нарушается ли CP -инвариантность в нейтринных осцилляциях и какой порядок (иерархия масс) реализуется в природе?

Параметр Ярльског (С. Jarlskog) J_{CP} [28], который показывает силу CP -нарушения, для нейтрино или, другими словами, в лептонном секторе выражается следующим образом:

$$J_{CP}^{\text{PMNS}} = \cos\theta_{12} \sin\theta_{12} \cos^2\theta_{13} \sin\theta_{13} \cos\theta_{23} \sin\theta_{23} \sin\delta. \quad (1)$$

Поскольку все три угла смешивания нейтрино, как и для кварков, не равны нулю, то $J_{CP}^{\text{PMNS}} \neq 0$, если $\delta \neq 0$. В случае CP -нарушения в кварковом секторе $J_{CP}^{\text{CKM}} \sim 3 \times 10^{-5}$, а для лептонного сектора $J_{CP}^{\text{PMNS}} \sim 0,035 \sin\delta$. Следует подчеркнуть, что надежды на то, что CP -нарушение в кварковом секторе явилось бы ключом к разгадке барионной асимметрии Вселенной, не оправдались из-за малости J_{CP}^{CKM} . Ввиду довольно больших углов смешивания эффект CP -нарушения в лептонном секторе в принципе может быть очень большим (в зависимости от значения δ) по сравнению с таковым в кварковом секторе. Таким образом, изучение нейтринных осцилляций открывает уникальную возможность для 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.

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 как

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

Величина A_{CP} пропорциональна $1/\sin\theta_{13}$, а $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \sin^2(2\theta_{13})$. При измерениях в осцилляционном максимуме, т.е. при оптимальном и постоянном отношении базы эксперимента L к энергии нейтрино E , величина CP -асимметрии не зависит от энергии нейтрино и A_{CP} может быть измерена в эксперименте с пучками нейтрино и антинейтрино. Другим методом является измерение с широким пучком нейтрино осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ одновременно в первом и втором осцилляционном максимумах. Сравнение формы спектра электронных нейтрино, интенсивности и положений первого и второго осцилляционных максимумов позволяет измерить фазу δ даже с одним пучком нейтрино, если иерархия масс известна. Наличие вещества при измерении осцил-

лящий имитирует ложный эффект CP -нарушения, который должен быть отделён от "истинного" CP -нарушения.

Ненулевая CP -фаза δ , измеренная в нейтринных осцилляциях, т.е. при низких энергиях, является фундаментальным параметром. Хотя нет модельно-независимых указаний на связь CP -асимметрии в осцилляциях нейтрино с асимметрией в распадах тяжёлых нейтрино в ранней Вселенной, элегантное объяснение массы нейтрино через механизм качелей ("see-saw"), который связывает тяжёлые нейтрино с массами $10^{10} - 10^{15}$ ГэВ и лёгкие активные нейтрино, возможно, является мостиком между этими двумя асимметриями.

Информация о иерархии масс играет исключительно важную роль для экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада. В случае инверсной иерархии масс чувствительность планируемых экспериментов позволяет наблюдать этот процесс, что будет являться однозначным доказательством майорановской природы нейтрино. Это будет также означать, что две из трёх масс должны практически совпадать, чего не наблюдается в массовом спектре заряженных лептонов и кварков. Кроме того, определение иерархии масс является важным ключом для установления абсолютной шкалы масс нейтрино, механизм образования которой представляет собой одну из самых больших загадок физики элементарных частиц.

Значение угла θ_{13} около 9° открыло уникальную возможность для измерения иерархии масс нейтрино и поиска CP -нарушения в ускорительных экспериментах с длинной базой с использованием существующих в настоящее время нейтринных пучков и детекторов. В первую очередь это относится к проводимым сейчас экспериментам T2K и NOvA (NuMI (Neutrinos at the Main Injector) Off-Axis ν_e Appearance Experiment).

Эксперимент NOvA [29] использует нейтринный (off-axis) пучок со средней энергией около 2,2 ГэВ, направленный из Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Фермилаб) в дальний детектор массой 14 кт, находящийся на расстоянии 810 км. Параметры нейтринного пучка до осцилляций измеряются ближним детектором массой 0,3 кт, установленным на расстоянии 1 км от мишени. Оба детектора представляют собой сегментированные трековые калориметры, активная часть которых (жидкий сцинтиллятор) составляет около 70 % полной массы детекторов. Эксперимент начал набор статистики в сентябре 2013 г. с частью установленных блоков дальнего детектора при мощности 120 ГэВ-ного протонного пучка около 280 кВт. Ближний детектор будет полностью смонтирован и запущен в работу в начале 2014 г. При предположении, что набор статистики в эксперименте NOvA будет происходить в течение шести лет (три года с пучком нейтрино и три года с пучком антинейтрино) при мощности пучка 700 кВт, а полная интегральная светимость T2K составит 8×10^{21} p.o.t., комбинированный анализ данных по появлению электронных нейтрино в обоих экспериментах позволит достичь чувствительности к иерархии масс на уровне 3σ для небольшой области фазы δ в благоприятном случае максимального CP -нарушения, как видно из рис. 6. Ожидаемая чувствительность к фазе δ , показанная на рис. 7, достигает уровня $(1,5-2)\sigma$ для наиболее благоприятных случаев [30]. Таким образом, можно утверждать, что возможности текущих экспериментов позволяют получить указание на CP -нарушение и определить иерархию

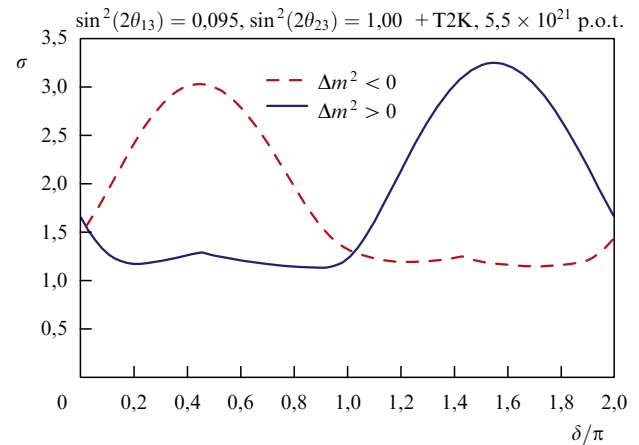


Рис. 6. Комбинированная чувствительность к иерархии масс σ экспериментов NOvA и T2K. Набор статистики NOvA: три года с пучком нейтрино + три года с пучком антинейтрино при мощности 700 кВт. Статистика эксперимента T2K соответствует интегральной светимости $5,5 \times 10^{21}$ p.o.t.

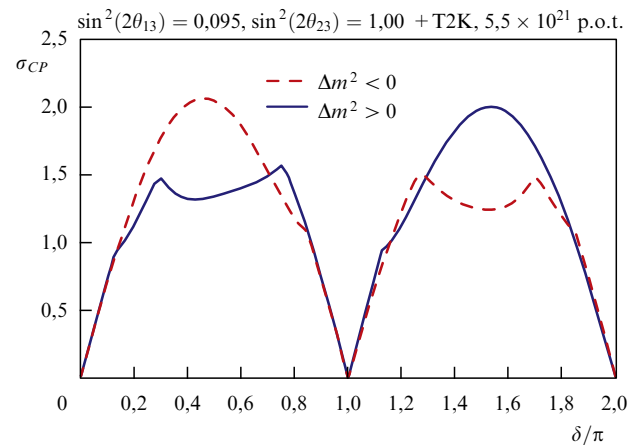


Рис. 7. Комбинированная чувствительность σ_{CP} к CP -нечётной фазе δ экспериментов NOvA и T2K. Набор статистики NOvA: три года с пучком нейтрино + три года с пучком антинейтрино при мощности 700 кВт. Статистика эксперимента T2K соответствует интегральной светимости $5,5 \times 10^{21}$ p.o.t.

масс с чувствительностью 3σ для небольшой области значений δ , но они явно недостаточны для полного однозначного решения проблемы CP -нарушения и иерархии масс.

5. Отдалённое будущее

В настоящее время существуют три проекта ускорительных экспериментов с длинной базой, основной целью которых является определение иерархии масс нейтрино и чувствительный поиск CP -нарушения. Эти проекты основываются на упомянутых в разделе 4 взаимно дополняющих друг друга методах.

5.1. Эксперимент LBNE

В эксперименте LBNE (Long-Baseline Neutrino Experiment) [31] планируется использовать широкий нейтринный пучок из Фермилаб, направленный в дальний детектор, расположенный на расстоянии 1300 км в шахте Хоумстейк (Южная Дакота, США). Дальний детектор — это однофазная жидкоаргоновая время-

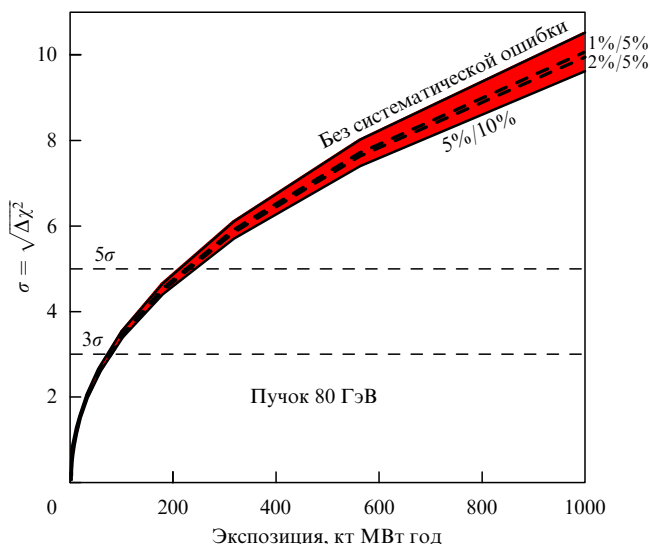


Рис. 8. Чувствительность LBNE к иерархии масс в зависимости от длительности экспозиции (кВт год) на пучке нейтрино [31]. Кривые приведены для случая только статистической ошибки и следующих соотношений между систематическими ошибками для сигнала и фона: 1 %/5 %, 2 %/5 % и 5 %/10 %.

проекторная камера массой 35 кт (чувствительный объём). Мощность протонного 60–120-ГэВ-ного пучка составит 700 кВт (после модернизации предполагается достичь мощности 2,3 МВт). Зависимость чувствительности к иерархии масс от экспозиции для протонного пучка 80 ГэВ показана на рис. 8. Как видно из рисунка, влияние систематических ошибок на чувствительность к иерархии масс незначительно.

Чувствительность к CP -нечётной фазе показана на рис. 9. В отличие от чувствительности к иерархии масс, чувствительность к δ сильно зависит от систематических погрешностей. При массе детектора 35 кт и наборе статистики в течение трёх лет систематические погрешности существенно снижают чувствительность экспери-

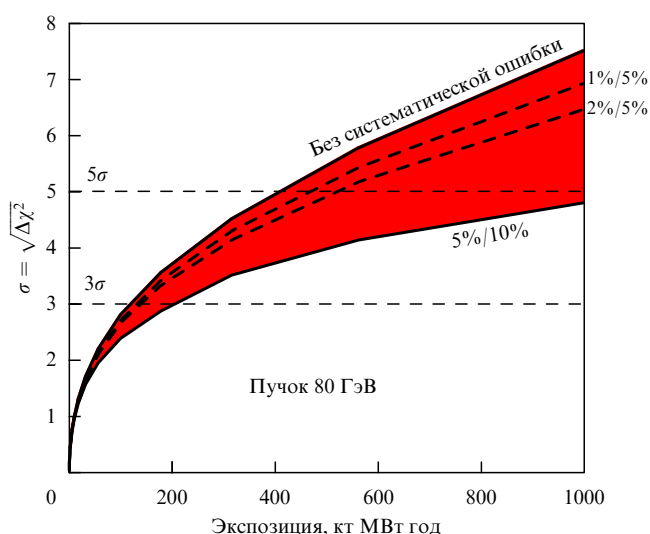


Рис. 9. Чувствительность LBNE к CP -нечётной фазе δ в зависимости от экспозиции (кВт год) на пучке нейтрино [31]. Кривые приведены для 50 %-ной области возможных значений δ для случая только статистической ошибки и следующих соотношений систематических ошибок сигнал/фон: 1 %/5 %, 2 %/5 % и 5 %/10 %.

мента к δ . После 10 лет набора статистики (пять лет с пучком нейтрино и пять лет с пучком антинейтрино) предполагается достичь чувствительности к фазе δ на уровне $\geq 3\sigma$ для 60 % всего возможного диапазона фаз, от $-\pi$ до π . Эксперимент также может определить иерархию масс с достоверностью около 3σ примерно через два года набора статистики с пучком нейтрино.

5.2. Эксперимент LAGUNA–LBNO

В Европе рассматривается возможность эксперимента LAGUNA–LBNO (Large Apparatus studing Grand Unification Neutrino Astrophysics–Long Baseline Neutrino Oscillation experiment) с нейтринным пучком из ЦЕРНа [32], направленным в шахту Пихасалми (Финляндия), где планируется расположить детектор нейтрино, представляющий собой двухфазную жидкоаргоновую времяпроекционную камеру массой 70 кт (20 кт на первом этапе) и магнитный 35-килотонный детектор нейтрино (MIND — Magnetized Iron Neutrino Detector). Широкий пучок нейтрино в диапазоне энергий 1–9 ГэВ и база эксперимента 2300 км позволяют измерять осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ в первом и втором осцилляционных максимумах, что определяет уникально высокую чувствительность эксперимента к иерархии масс ($> 5\sigma$) для всего упомянутого выше возможного диапазона значений CP -нечётной фазы и позволяет обнаружить эффект CP -нарушения для 60 % значений параметра δ . Такая чувствительность ожидается для интегрального числа 400-ГэВ-ных протонов на мишени $1,25 \times 10^{21}$. Первым этапом в подготовке этого эксперимента будет создание и тестирование двухфазной жидкоаргоновой времяпроекционной камеры размером $6 \times 6 \times 6$ м³, которая является прототипом 70-килотонного нейтринного детектора. Эта работа будет выполняться в ЦЕРНе.

5.3. Эксперимент T2HK

Целью эксперимента T2HK (Tokai-to-Hyper-Kamiokande) [33] являются чувствительный поиск и измерение фазы δ с использованием настроенного на первый осцилляционный максимум интенсивного off-axis-пучка нейтрино и антинейтрино из JPARC и гигантского 1-мегатонного водного черенковского детектора (эффективная масса 0,56 Мт эквивалентна 25 детекторам Супер-Камиоканде), расположенного на расстоянии 295 км от JPARC. Для регистрации черенковского света будут использоваться 100 тыс. фотоумножителей диаметром 20 дюймов. После модернизации протонного ускорителя JPARC планируется достичь мощности протонного пучка 1,66 МВт. Энергия мюонных нейтрино (антинейтрино) в максимуме спектра составляет около 600 МэВ.

Большая величина θ_{13} благоприятствует быстрому набору статистики для осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$, но величина CP -нечётной асимметрии в первом осцилляционном максимуме находится в интервале 10–30 % для всех возможных значений δ , как следует из выражения (2). Таким образом, в эксперименте необходимо получить уровень систематических погрешностей менее 5 %, для того чтобы достичь хорошей чувствительности к фазе δ , как это видно из рис. 10. Эксперимент T2K существенно снизил уровень систематических ошибок в измерении вероятности переходов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ — до 8,8 %, что делает вполне достижимой цель получения в T2HK систематических погрешностей ≤ 5 %.

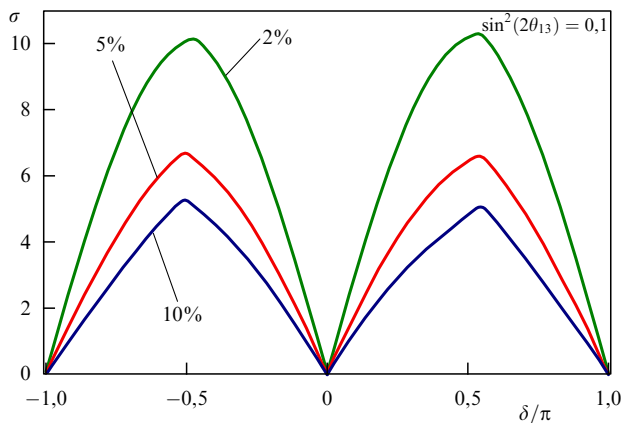


Рис. 10. Чувствительность эксперимента T2HK к фазе δ в случае нормальной иерархии масс и систематических ошибок 10 %, 5 % и 2 %. Интегральная светимость составляет 7,5 МВт год.

За 10 лет набора статистики планируется достичь чувствительности к δ на уровне $\geq 3\sigma$ для 70%-ного интервала возможных значений этого параметра. Точность измерения δ , как ожидается, должна составить 20° , если фаза близка к $\pi/2$ или $-\pi/2$, и 10° , если фаза близка к 0 или π . Особо следует отметить, что такая чувствительность может быть получена только в том случае, если иерархия масс будет определена в других экспериментах, так как этот эксперимент не чувствителен к иерархии масс из-за относительно короткой базы.

5.4. Нейтринный эксперимент на базе ESS

Целью европейского проекта ESS (European Spallation Source) является создание мощного импульсного источника нейтронов на основе сильноточного протонного ускорителя в Лунде (Швеция). Планируется построить сверхпроводящий линейный ускоритель протонов с энергией 2 ГэВ и мощностью 5 МВт, что позволит получить интенсивность протонного пучка на мишени $1,6 \times 10^{16}$ р.о.т. с^{-1} . Средняя энергия нейтринного пучка составит 0,2–0,4 ГэВ. Ожидается, что первый пучок будет получен в 2017 г., а полная интенсивность будет достигнута к 2022 г. С учётом параметров этого комплекса рассматривается возможность постановки осцилляционного эксперимента с базой 360 или 560 км и водным черенковским детектором массой 500 кт [34], размещённым в одной из шахт Швеции. Такой эксперимент будет обладать высокой чувствительностью с CP -нарушению и имеет реальные шансы после 10 лет набора статистики измерить δ с точностью $10^\circ - 15^\circ$.

5.5. Неускорительные эксперименты

5.5.1. JUNO и RENO-50. Большая величина угла θ_{13} предоставляет интересную возможность для определения иерархии масс нейтрино в реакторных экспериментах с базой около 50 км. В настоящее время предложено два таких эксперимента: один в Корее — RENO-50 [35], а другой, JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory), [36] в Китае. В эксперименте JUNO предлагается использовать сцинтилляционный детектор массой 20 кт, расположенный на расстоянии 50 км от реакторов общей мощностью 36 ГВт, а в эксперименте RENO-50 планируется использовать сцинтилляционный детектор массой 10 (или 18) кт на расстоянии 47 км от реакторов мощностью 16,5 ГВт. Реакторные антинейтрино в этих

экспериментах регистрируются с помощью обратного бета-распада:



Чувствительность к иерархии масс возникает благодаря эффекту интерференции двух осцилляционных мод: "атмосферной" с Δm_{32}^2 и солнечной с Δm_{21}^2 — и отличному от $\pi/4$ углу смешивания θ_{12} . Для успешного решения проблемы иерархии масс в этих экспериментах необходимо при измерении осцилляционного спектра получить энергетическое разрешение детектора $\leq 3\%/\sqrt{E [\text{МэВ}]}$, что является очень трудной задачей ввиду сравнительно небольших масс детекторов. Например, энергетическое разрешение детектора KamLAND (Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) массой 1 кт составляет $6\%/\sqrt{E [\text{МэВ}]}$. Если удастся достичь разрешения $3\%/\sqrt{E [\text{МэВ}]}$, то иерархия масс может быть определена на уровне 3σ при наборе статистики в течение примерно шести лет.

5.5.2. PINGU (Precision IceCube Next Generation Upgrade).

Основной целью эксперимента PINGU (проект модернизации детектора IceCube/DeepCore для детектирования атмосферных нейтрино с нижним порогом несколько ГэВ) является измерение иерархии масс нейтрино с использованием зависимости эффекта Михеева — Смирнова — Вольфенштейна от иерархии масс при прохождении атмосферных нейтрино сквозь Землю. Для этого планируется установить в центральную часть IceCube/DeepCore 40 дополнительных стрингов на расстоянии 20 м друг от друга с 60 оптическими модулями в каждом стринге [37]. Ожидается, что уже после одного года набора статистики чувствительность к иерархии масс может составить около 2σ .

5.5.3. INO (India-based Neutrino Observatory).

Основным детектором в INO будет 50-килотонный калориметр, состоящий из пассивных слоёв намагниченного железа и активных детекторов — резистивных плоских камер (RPC) [38]. Слои намагниченного железа создают магнитное поле величиной 1,3 Тл, что позволяет определять заряд частиц и измерять осцилляции атмосферных нейтрино и антинейтрино по отдельности. Предполагается, что детектор начнёт функционировать примерно в 2018 г. и после 10 лет набора статистики ответ на вопрос о иерархии масс может быть получен с достоверностью $\sim 2,5\sigma$. Комбинация с другими экспериментами может улучшить чувствительность до $\sim 3,5\sigma$.

6. Заключение

Идея Б.М. Понтекорво о возможности нейтринных осцилляций на многие десятилетия определила направление исследований в нейтринной физике, в котором были получены фундаментальные результаты и которое является одним из самых интересных и плодотворных в физике элементарных частиц.

Обнаружение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ в эксперименте T2K и отличная от нуля величина угла θ_{13} , измеренная в реакторных и ускорительных экспериментах, кардинальным образом изменили ситуацию в ускорительной нейтринной физике и открыли уникальную возможность для поиска CP -нарушения в лептонном секторе и определения иерархии масс нейтрино в ускорительных экспери-

ментах с длинной базой. Проводимые эксперименты T2K и NOvA в сочетании с реакторными экспериментами могут дать первое указание на CP -нарушение в нейтринных осцилляциях, но глобального прогресса в этом направлении можно ожидать от экспериментов следующего поколения. Иерархия масс может быть установлена в ускорительных экспериментах, а также в реакторных экспериментах и экспериментах с атмосферными нейтрино. Обнаружение и дальнейшее исследование CP -нарушения в лептонном секторе возможно только в ускорительных экспериментах с длинной базой. В случае обнаружения CP -нарушения в нейтринных осцилляциях, т.е. $\delta \neq 0$ и $\delta \neq 180^\circ$, перед экспериментами с длинной базой открывается широкая физическая программа, краеугольным камнем которой будет прецизионное измерение фазы δ , которая до сих пор остаётся единственным неизмеренным параметром PMNS-матрицы.

Работа поддержана Программой президиума РАН "Фундаментальные свойства материи и астрофизика" и совместным грантом РФФИ/JSPS (Япония) 13-02-92101-ЯФ_а.

Список литературы

- Понтекоров Б М *ЖЭТФ* **33** 549 (1957) [Pontecorvo B M *Sov. Phys. JETP* **6** 429 (1957)]
- Понтекоров Б М *ЖЭТФ* **34** 247 (1957) [Pontecorvo B M *Sov. Phys. JETP* **7** 172 (1958)]
- Gribov V, Pontecorvo B *Phys. Lett. B* **28** 493 (1969)
- Maki Z, Nakagawa M, Sakata S *Prog. Theor. Phys.* **28** 870 (1962)
- Биленький С М, Понтекоров Б М *УФН* **123** 181 (1977) [Bilen'kii S M, Pontecorvo B *Sov. Phys. Usp.* **20** 776 (1977)]
- 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)]
- Биленький С М *УФН* **173** 1171 (2003) [Bilen'kii S M *Phys. Usp.* **46** 1137 (2003)]
- Ахмедов Е Х *УФН* **174** 121 (2004) [Akhmedov E Kh *Phys. Usp.* **47** 117 (2004)]
- Куденко Ю Г *УФН* **181** 569 (2011) [Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **54** 549 (2011)]
- Троицкий С В *УФН* **182** 77 (2012) [Troitsky S V *Phys. Usp.* **55** 72 (2012)]
- Apollonio M et al. (Chooz Collab.) *Eur. Phys. J. C* **27** 331 (2003)
- Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 041801 (2011)
- Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 181802 (2011)
- Abe Y et al. (Double Chooz Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 131801 (2012)
- An F P et al. (Daya Bay Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 171803 (2012)
- Ahn J K et al. (RENO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 191802 (2012)
- Beringer J et al. (Particle Data Group Collab.) "Review of Particle Physics" *Phys. Rev. D* **86** 010001 (2012)
- Abe K et al. (T2K Collab.), arXiv:1311.4750
- Abe K et al. (T2K Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **659** 106 (2011)
- Куденко Ю Г *УФН* **181** 997 (2011) [Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **54** 961 (2011)]
- Karlen D (The ND280 Group of the T2K Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **159** 91 (2006)
- Kudenko Yu (Representing the T2K Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **598** 289 (2009)
- Fukuda S et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **501** 418 (2003)
- Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. D* **88** 032002 (2013)
- Куденко Ю Г *УФН* **183** 1225 (2013) [Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **56** 1120 (2013)]
- Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **110** 181802 (2013)
- Pastore A, in *Proc. of the European Physical Society Conf. on High Energy Physics, EPS-HEP 2013, Stockholm, Sweden, 18–24 July 2013*, p. 525; <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=180>
- Jarlskog C *Phys. Rev. Lett.* **55** 1039 (1985)
- Ayres D et al. (NOvA Collab.), hep-ex/0503053
- Bian J, arXiv:1309.7898
- Adams C et al. (LBNE Collab.), arXiv:1307.7335
- Stahl A et al. "Expression of interest for a very long baseline neutrino oscillation experiment (LBNO)", CERN-SPSC-2012-021 (2012); SPSC-EOI-007
- Abe K et al. (Hyper-Kamiokande working group), arXiv:1109.3262
- Baussen E et al., arXiv:1309.7022
- Seo S-H, in *Talk at the RENO-50 Workshop, Seoul, Korea, 13–14 June 2013*
- Li Y-F et al. *Phys. Rev. D* **88** 013008 (2013); arXiv:1303.6733
- Aartsen M G et al., arXiv:1306.5846
- Agarwalla S, in *Talk at the 14th Intern. Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, NNN13, Kavli IPMU, Kashiwa, Japan, 11–13 November 2013*

Long baseline neutrino accelerator experiments: results and 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,
per. Institutskii 9, 141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation;
National Research Nuclear University (MEPhI),
Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation
Tel. +7 (495) 851 01 84
E-mail: kudenko@inr.ru*

Recent results from long baseline neutrino experiments are presented. Prospects for determining the mass hierarchy and observing CP violation in neutrino oscillations are discussed.

PACS numbers: 14.60.Pq, 25.30.Pt

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201405d.0502

Bibliography — 38 references

Received 18 February 2014

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (5) 502–509 (2014)

Physics – Uspekhi **57** (5) (2014)