

Рождение нейтринной астрофизики

М. Кошиба

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2002 г.)

PACS numbers: 14.60.Lm, 14.60.Pq, 29.40.Ka, 95.55.Vj, 96.40.Tv

Предыдущая лекция сильно помогла мне в изложении своей, и я могу опустить некоторые детали. Более подробная информация содержится в моей статье "Наблюдательная нейтринная астрофизика" [1].

Я собираюсь рассказать о рождении нейтринной астрофизики, но еще до ее появления произошло одно очень важное событие, которое только что описал профессор Дэвис [2]. Речь идет о радиохимическом исследовании с использованием реакции с превращением $\nu_e + {}^{37}\text{Cl}$ в $e + {}^{37}\text{Ar}$. Он обнаружил, что наблюдаемый поток нейтрино от Солнца составлял всего 1/3 от теоретически ожидаемого значения. Это был первый настоящий результат из области нейтринной астрофизики, который стимулировал начало серьезных исследований солнечных нейтрино.

Я буду говорить о двух экспериментальных установках. Во-первых, это первоначальный детектор КамиокаНДЕ, который можно было бы назвать водным черенковским детектором изображения. 20 % поверхности этого детектора занимают фотоумножители (ФЭУ), а полная масса воды внутри него составляет 3000 т. Его строительство обошлось в 3 млн долларов США. Этот эксперимент, напомним, был задуман для возможного астрофизического обнаружения солнечных нейтрино. Вторая установка называется Супер-КамиокаНДЕ и представляет собой по существу такой же детектор, но с лучшей чувствительностью к черенковскому излучению. В нем ФЭУ занимают уже 40 % поверхности, а полная масса воды составляет 50000 т. Он обошелся в 100 млн долларов США. Эта экспериментальная установка рассматривалась уже как полномасштабная обсерватория для регистрации солнечных нейтрино.

Обе установки располагаются на 1000-метровой глубине под землей в шахте Камиока. Суффикс НДЕ в названии обоих экспериментов первоначально происходил от сокращения "эксперимент по распаду нуклонов" (*англ.* nucleon decay experiment). Однако поскольку эти детекторы могли регистрировать различные сорта нейтрино, их стали называть "эксперименты по детектирова-

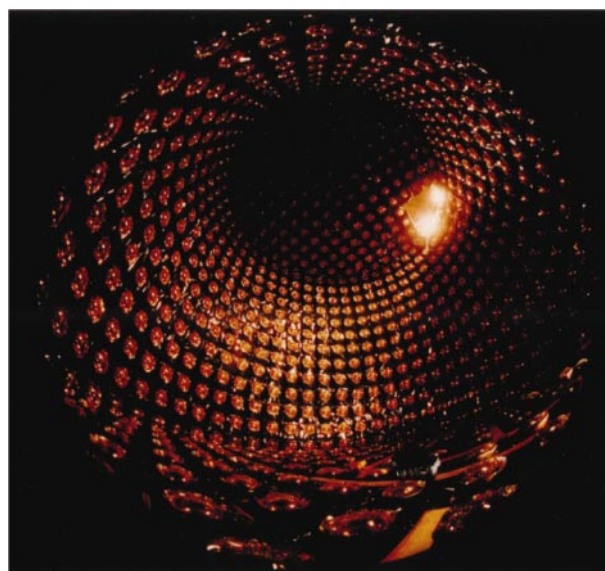


Рис. 1. Установка КамиокаНДЕ. Вид изнутри.

нию нейтрино" (*англ.* neutrino detection experiment). На рисунке 1 показан вид детектора КамиокаНДЕ изнутри. Вдоль боковых стен, сверху и снизу видны ряды ФЭУ. На стадии подготовки этого эксперимента в Камиоке стало известно, что гораздо большая установка такого же типа планируется в Соединенных Штатах Америки [3]. Мы вынуждены были очень серьезно подумать о конкуренции с этим большим детектором. Оба эксперимента ставят целью регистрацию определенного типа распада протонов, а именно, моды $e^+ + \pi^0$. Если бы мы нацеливались исключительно на детектирование этого конкретного вида распада протонов, то, конечно, гораздо большая установка в США быстрее зарегистрировала бы такие распады. Тогда что бы мы делали с меньшим детектором? Мы очень серьезно обдумали перспективу такого соревнования и пришли к выводу, что единственный способ конкурировать с детектором больших размеров состоял в достижении значительно лучшей чувствительности по сравнению с американским детектором для того, чтобы имелась возможность регистрации не только наиболее вероятной моды распада протонов, но и других

М. Кошиба (M. Koshiba) International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo,
7-3-1-Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo 113-0033, Japan



Рис. 2. Впервые изготовленный большой фотоэлектронный умножитель.

типов распадов. Тогда в конечном счете мы смогли бы сказать, что протон распадается по одному каналу с такой-то вероятностью, а по другому с такой-то и т.д. В этом случае наш эксперимент стал бы интересен с точки зрения проверки возможной будущей теории, называемой Теорией Великого Объединения, которая описывает одновременно сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия.

В сотрудничестве с корпорацией "Хамамацу фотоникс" нами были разработаны ФЭУ большого диаметра [4]. Моя нескрываемая радость в связи с успешным изготовлением таких ФЭУ видна на рис. 2.

На рисунке 3 представлен панорамный вид изнутри детектора Супер-КамиокаНДЕ, сделанный камерой "рыбий глаз". Видно гораздо больше ФЭУ — в этой установке их полное число достигает 11000.

Как я полагаю, не очень много людей знакомо с подобными детекторами, так что я хочу показать, как работает Супер-КамиокаНДЕ. В качестве первого примера рассмотрим замедленную съемку частицы космических лучей, проходящей сквозь детектор.

Как хорошо известно, специальная теория относительности запрещает частицам двигаться со скоростью больше скорости света в вакууме. Однако в среде, например в воде, сама скорость света составляет три четверти от скорости света в вакууме. Следовательно, если энергия частицы очень велика, ее скорость может превысить скорость света в воде. Тогда такие высокоэнергетические, быстро движущиеся частицы будут генерировать в воде, так сказать, ударную волну света — черенковское излучение. Оно излучается в форме конуса,



Рис. 3. Фотография Супер-КамиокаНДЕ, сделанная камерой "рыбий глаз". Вид изнутри.

ось которого расположена вдоль траектории движения электрически заряженной частицы.

На рисунке 4а показано, как реагирует детектор Супер-КамиокаНДЕ при попадании в него мюона. На рисунке детектор "развернут". Боковая стенка вертикально разрезана в некоторой точке и развернута горизонтально, верхний торец раскрыт наверх, нижний — вниз. Каждая точка изображает один ФЭУ. Красный цвет означает, что ФЭУ произвел большое количество фотоэлектронов. Различные цвета изображают различное количество полученных фотоэлектронов. Внизу справа воспроизведен временной профиль полного количества зарегистрированных черенковских фотонов. На рисунке 4б показана картина процесса через 50 нс. Можно видеть, что частица движется быстрее волнового фронта черенковского излучения. Еще через 50 нс (рис. 4в) видно, что мюон уже достиг дна детектора, а черенковский свет все еще распространяется. Видно, что частица движется быстрее света в воде. На рисунках 4г–е показано дальнейшее развитие событий. Эти рисунки показывают, что в этом детекторе можно подробно проследить путь электрически заряженной частицы. На следующем рис. 5 показаны два события: сверху е-событие, внизу μ -событие. Глядя на эти два события, электронное и мюонное, можно заметить разницу в распределении принятых фотонов (особенно в радиальном распределении). Электроны и мюоны очень похожи, лишь их массы различаются примерно в 200 раз. Это

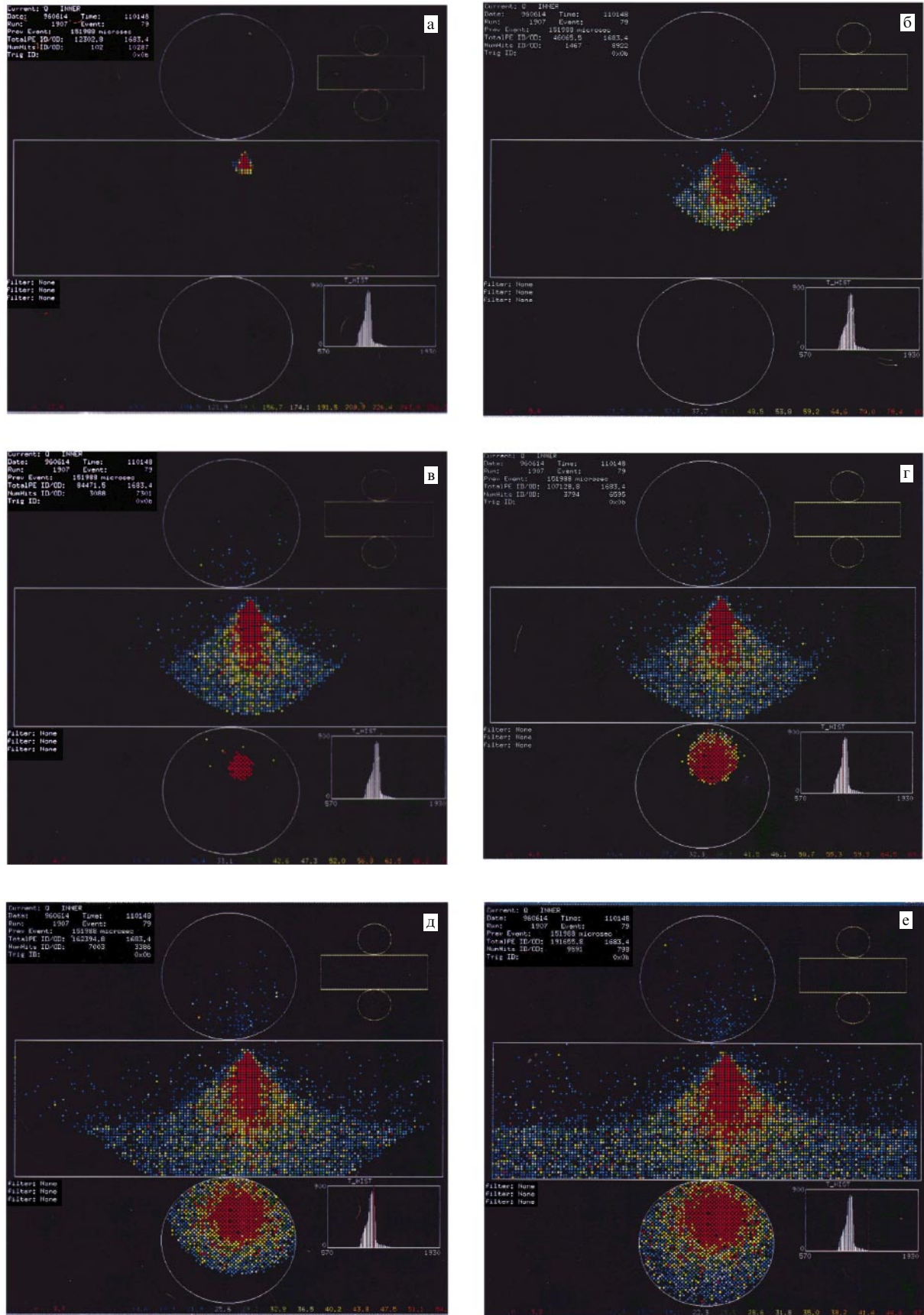


Рис. 4. Движение мюона через детектор Супер-КамиокаНДЕ (в оригинале рисунок цветной). (а) Мюон только что вошел в Супер-КамиокаНДЕ. (б) Тот же мюон спустя 50 нс. (в) Мюон достиг дна. (г–е) Дальнейшее развитие событий.

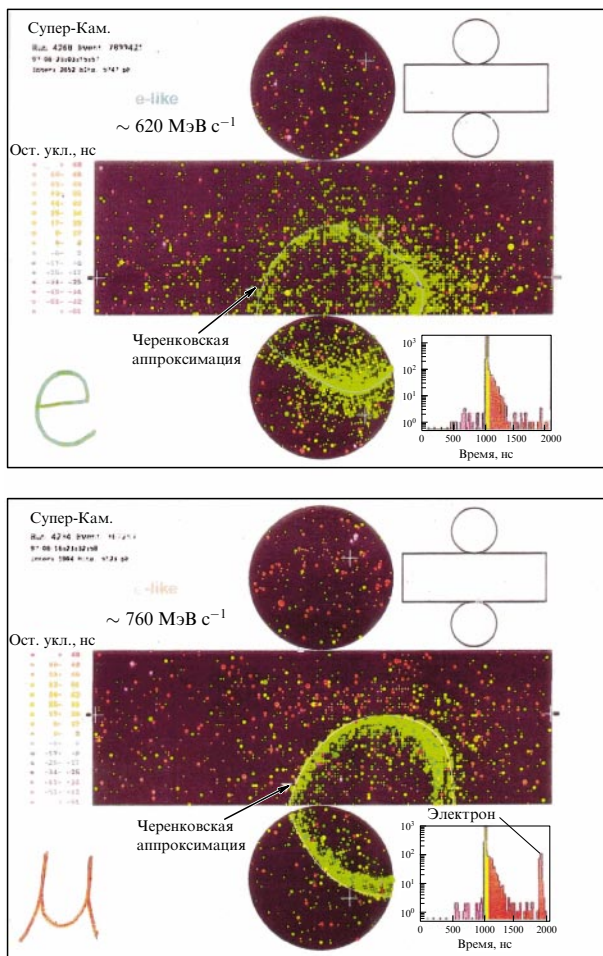


Рис. 5. Вверху: e-событие; внизу: μ-событие.

означает, что при распространении в воде более тяжелые мюоны рассеиваются меньше, чем более легкие электроны. Но различия на этом не заканчиваются: электрон излучает гамма-квант, который в свою очередь превращается в электрон-позитронную пару. Эти низкоэнергетические электроны и позитроны сильно рассеиваются, а значит, их черенковское излучение распределено в пределах более широкого конуса, как видно на примере e-события в верхней части рис. 5. Тщательно измеряя радиальное распределение таких фотонов, можно надежно отличать μ- и e-события с вероятностью ошибки менее 1%. Это замечательное свойство детектора и привело нас в конце концов к открытию явления, которое называют "атмосферной нейтринной аномалией".

С помощью старого детектора КамиокаНДЕ были получены следующие четыре значительных результата.

Первый результат — астрофизическое наблюдение солнечных нейтрино при ν_e –e-рассеянии на электронах в воде [5]. Под "астрофизическим наблюдением" мы понимаем то, что в эксперименте извлекается вся необходимая информация о нейтрино: направление его прихода, время прихода, а также спектральное распределение. Так как масса покоя электрона всего 0,5 МэВ, в случае ν_e –e-рассеяния нейтрино с энергией, скажем, 10 МэВ выбитый электрон движется практически точно в направлении прихода нейтрино. Наблюдая такой

электрон отдачи, можно примерно восстановить направление прихода нейтрино. Таким образом, имеется взаимно-однозначное соответствие между энергетическим спектром электронов отдачи и спектром рассеивающихся нейтрино. Точность регистрации времени в эксперименте лучше десяти наносекунд.

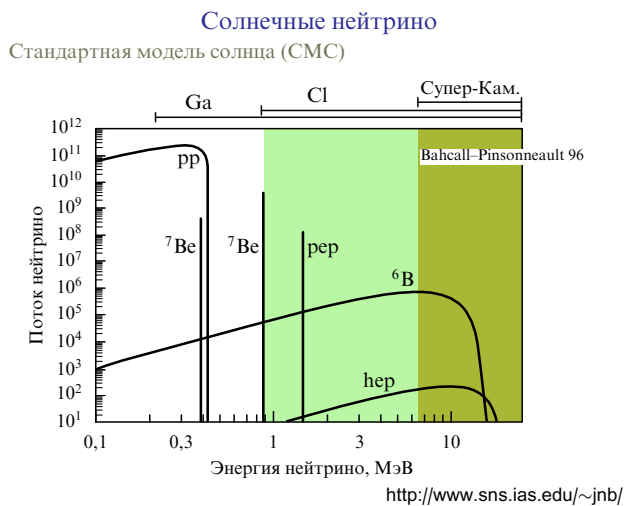
Второй результат — наблюдение нейтрино от сверхновой [6] при рассеянии анти- ν_e на протонах воды. В этой реакции рождаются e^+ и нейтрон. Позитрон наблюдается по излучаемому им черенковскому излучению.

Третий результат состоит в открытии явления, получившего название атмосферной нейтринной аномалии [7]. Поскольку, как было показано выше, мы определенно можем отличать μ- и e-события, то имеется возможность очень точно измерить отношение числа ν_μ к числу ν_e , наблюдая μ- и e-события по отдельности. Это открытие было сделано на уровне, слегка превышающем 4σ , но впоследствии этот результат был подтвержден на уровне 9σ при анализе данных Супер-КамиокаНДЕ.

Немногие сейчас интересуются распадом протона, однако факт отсутствия зарегистрированных распадов протона детектором КамиокаНДЕ закрыл вариант Теории Великого Объединения, основанный на SU(5)-симметрии [5].

Предыдущий докладчик уже показывал диаграмму, изображенную на рис. 6, и я не хочу здесь вдаваться в подробности, я только прошу обратить внимание на пороговые энергии различных экспериментов. Рисунок 7 иллюстрирует способность КамиокаНДЕ наблюдать направление прихода солнечных нейтрино. Видно, что избыток событий над изотропным фоном приходится в направлении на Солнце.

Следующий рис. 8 показывает энергетический спектр нейтрино, нормированный на теоретические значения. Из рисунка видно, что наблюдаемый спектр по виду не



Эксперименты по солнечным нейтрино

Эксперимент	Мишень	Данные/СМС (BP98)
• Хоумстейк	^{37}Cl	$0,33 \pm 0,03$
• Камиоканде	e^- (вода)	$0,54 \pm 0,07$
• SAGE	^{71}Ga	$0,52 \pm 0,06$
• GALLEX	^{71}Ga	$0,59 \pm 0,06$
• Супер-Кам.	e^- (вода)	$0,475 \pm 0,015$

Рис. 6. Стандартная модель Солнца и эксперименты с солнечными нейтрино.

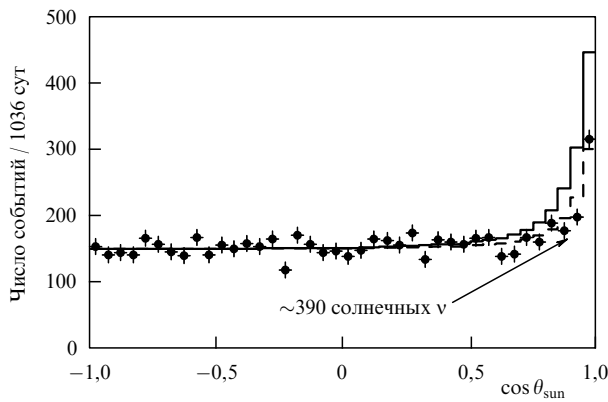


Рис. 7. Наблюдение направления прихода солнечных нейтрино.

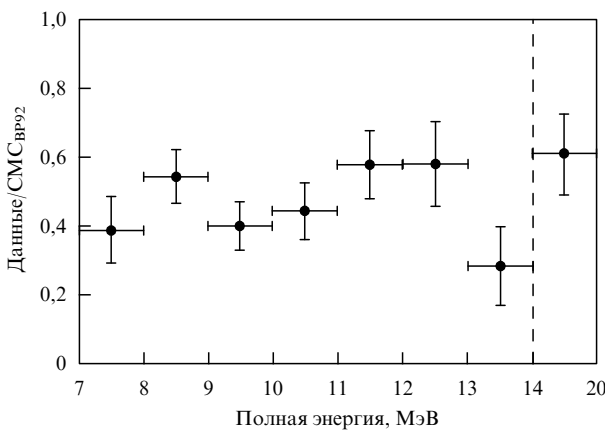


Рис. 8. Нормированный энергетический спектр.

очень сильно отличается от теоретического, однако его интенсивность составляет примерно половину от ожидаемой величины.

Теперь я перехожу к наблюдениям нейтрино от сверхновой. Благодаря сотрудничеству с группой, возглавляемой проф. А.К. Манном из Пенсильванского университета, мы смогли сильно улучшить чувствительность нашего детектора путем уменьшения фона, очистки воды и т.д. В самом начале 1987 г. наш детектор был достаточно подготовлен для начала регистрации потока солнечных нейтрино. Через два месяца нам стало известно о близкой сверхновой, вспыхнувшей на южном небе. Мы немедленно проанализировали наши данные и легко обнаружили нейтринный сигнал от сверхновой, так как наш детектор уже мог регистрировать солнечные нейтрино, которые гораздо труднее обнаружить. Нейтрино от сверхновой имеют значительно большие энергии, чем солнечные нейтрино, и кроме того приходят пачкой в течение достаточно малого промежутка времени. Полученные данные показаны на рис. 9. Нейтринный сигнал от сверхновой наблюдается как избыток примерно в 17 фотоэлектронов над фоновыми событиями. Эти наблюдения подтвердили теоретические идеи об инициировании вспышки сверхновой гравитационным коллапсом железного ядра. Так, не только средняя энергия и полное число излученных нейтрино были в согласии с теоретическими ожиданиями, но также и длительность нейтринного импульса порядка 10 с

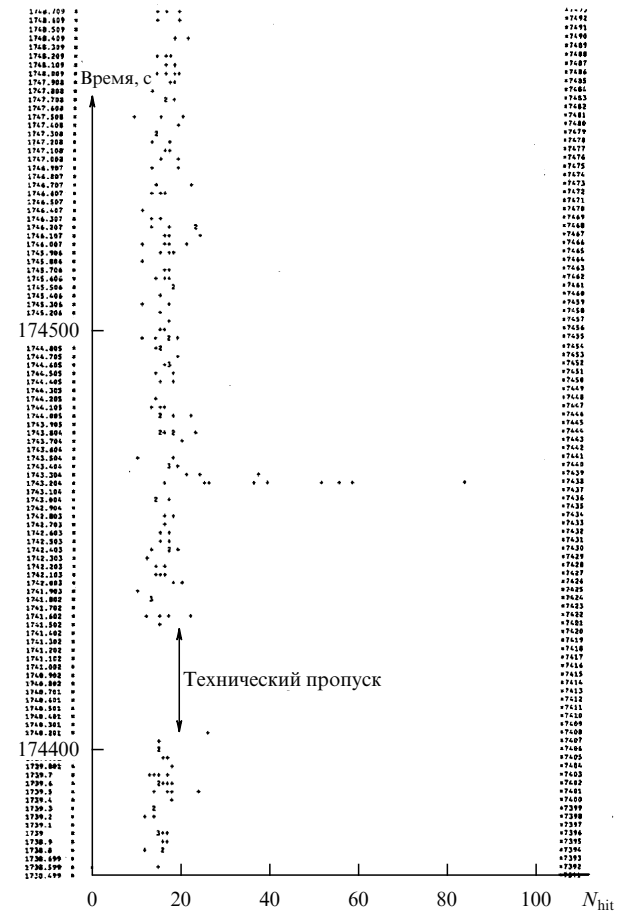


Рис. 9. Нейтринный "сигнал" от сверхновой SN1987A на компьютерной распечатке. N_{hit} — число событий.

указывала, что эти нейтрино излучаются из сверхплотного вещества (порядка плотности атомного ядра). Если бы нейтрино излучались разреженным газом звезды, длительность сигнала была бы менее 1 мс. Однако при вспышке сверхновой нейтрино диффундируют из очень плотной (как атомное ядро) материи и им требуется около 10 с, чтобы достичь поверхности, по-видимому, нейтронной звезды.

Теперь я перехожу к обсуждению атмосферной нейтринной аномалии. Попадающая в атмосферу частица космических лучей взаимодействует с ядрами N и O с образованием π -мезонов и K-мезонов. В разреженном воздухе эти мезоны распадаются на μ и ν_μ . Так что в результате образуется один мюон и одно нейтрино ν_μ . Если вторичный мюон также распадается, то образуется e и дополнительные ν_μ и ν_e . Поэтому, если все происходит таким образом, то на одно ν_e приходится два ν_μ . Отношение числа этих частиц $N(\nu_\mu)/N(\nu_e)$, таким образом, равно 2. При более высоких энергиях мюон может иметь большее время жизни, чем π -мезон и не успевает распасться до достижения детектора. Действительно, как было показано выше, некоторые мюоны все же попадают в детектор. В этом случае не образуется дополнительного ν_μ или ν_e . Поэтому при высоких энергиях отношение числа мюонных нейтрино к числу электронных больше двух. На рисунке 10 показано это отношение по данным эксперимента КамиокаНДЕ и других экспериментов.

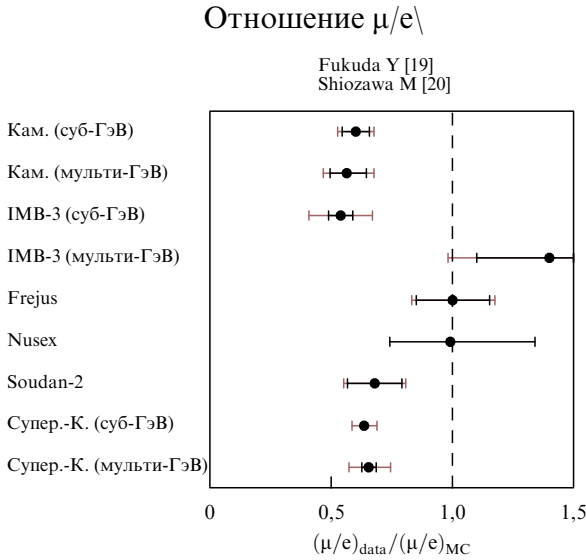


Рис. 10. Отношение числа мюонных и электронных нейтрино $N(\nu_\mu)/N(\nu_e)$.

Теперь я перехожу к обсуждению нейтринных осцилляций [9]. Возможно, это самая трудная часть моей лекции. Я постараюсь сделать ее понятной студентам первого курса. Для простоты предположим, что в природе есть только два сорта нейтрино. Тогда, например, волновая функция, описывающая состояние нейтрино, может быть записана как линейная комбинация двух независимых базисных функций. Например, можно взять диагональную матрицу масс и затем выбрать в качестве двух базисных векторов массы m_1 и m_2 . Тогда любое состояние нейтрино может быть описано комбинацией Ψ_{m_1} и Ψ_{m_2} : $\Psi_{\nu_\mu} = \cos \phi \Psi_{m_1} + \sin \phi \Psi_{m_2}$. Это похоже на двумерную геометрию, когда любой вектор может быть описан своими x - и y -компонентами. Поэтому состояние ν_μ есть линейная комбинация состояний m_1 и m_2 с учетом углового параметра ϕ . Состояния Ψ_{m_1} и Ψ_{m_2} осциллируют со своими характерными частотами. Эта частота пропорциональна полной энергии состояния. Если масса m мала, то для данного импульса можно использовать следующее приближение: $E \sim p + m^2/2p$. Следовательно, разность $E_1 - E_2$, которая пропорциональна разности частот этих двух состояний, в этом приближении пропорциональна $m_1^2 - m_2^2$. Эта квадратичная по массе разница между двумя состояниями обозначается как Δm^2 . Известно, что если в системе есть два колебания с почти равными частотами, то наблюдается явление, называемое "биениями", в результате которого амплитуды двух колебаний медленно изменяются в зависимости от разности частот. Это изменение амплитуд компонент Ψ_{m_1} и Ψ_{m_2} индуцирует появление ν_τ -состояния в первоначальном чистом ν_μ -состоянии.

Используя два параметра Δm^2 и ϕ , можно описать осцилляции нейтрино одного типа в другой. На рисунке 11 представлен результат, полученный на КамиокаНДЕ [10] для осцилляций атмосферных нейтрино.

Теперь перейдем к обсуждению эксперимента Супер-КамиокаНДЕ. К настоящему времени на Супер-КамиокаНДЕ было получено три значительных результата.

Первый результат относится к астрофизическому наблюдению солнечных нейтрино на достаточном

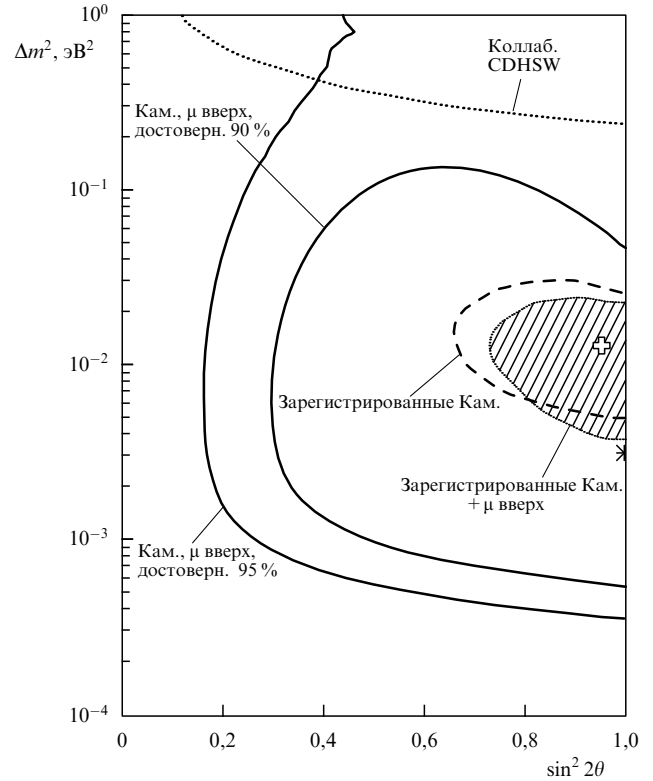


Рис. 11. Область допустимых параметров.

уровне статистической значимости. На рисунке 12 виден пик потока нейтрино в направлении на Солнце над уровнем изотропного фона. Когда у вас сломана рука, вы идете к доктору и делаете рентгеновский снимок. Это позволяет заглянуть внутрь руки и определить, какая кость сломана. С помощью нейтрино, обладающих гораздо большей проникающей способностью, можно заглянуть внутрь Солнца. На рисунке 13 показана первая "нейтринография" (а не фотография) Солнца. В нижней части рисунка представлен годичный путь нейтринного изображения Солнца на небе в галактических координатах.

Это выглядит замечательно, однако если внимательно присмотреться к этой нейтринографии, то обнаружится, что размер Солнца больше, чем размер Солнца, который вы видите своими глазами в видимом свете. Причина этого, конечно, в том, что направление прихода

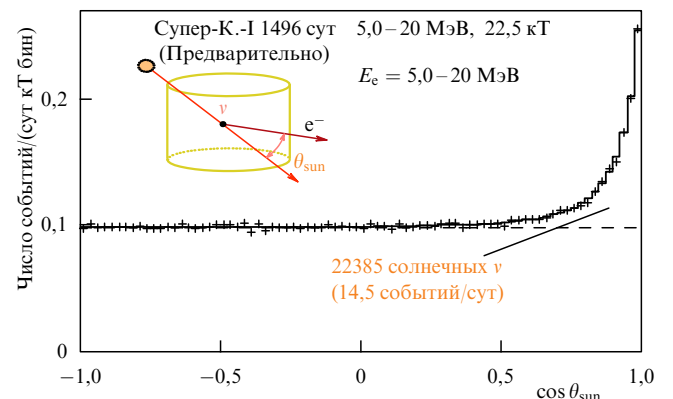


Рис. 12. Наблюдения направления прихода нейтрино.

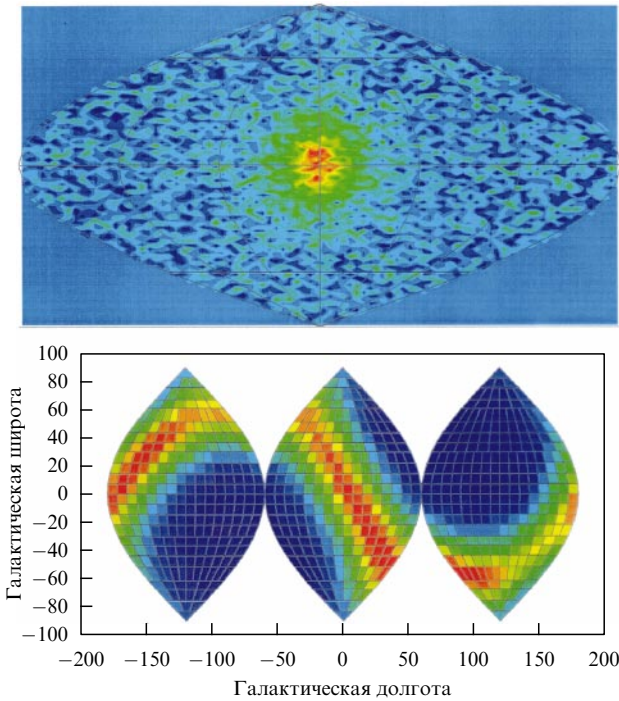
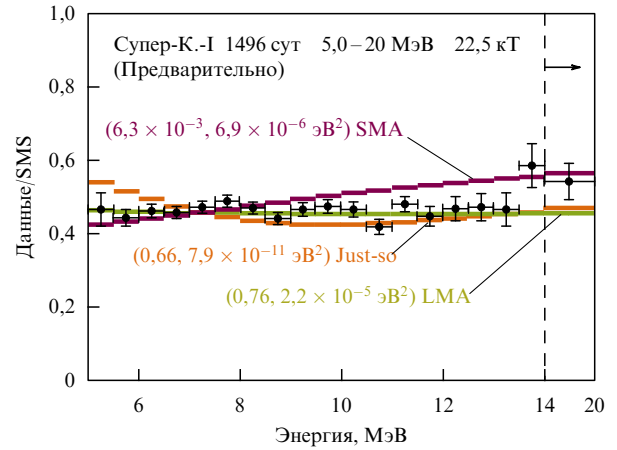


Рис. 13. Нейтринография Солнца.

нейтрино определяется гораздо менее точно, чем для фотонов. Но надо быть терпеливым. Нейтринная астрофизика зародилась совсем недавно и пока еще находится в детском возрасте.

На рисунке 14 показаны наблюдаемые спектры солнечных нейтрино по сравнению с теоретически ожидаемыми спектрами в стандартной солнечной модели. Детальное сравнение наблюдаемого и теоретического спектра энергий нейтрино дает новую информацию об осцилляциях солнечных нейтрино.



Модели SMA и Just-so не подходят.

Рис. 14. Энергетический спектр.

Если наблюдаемая аномалия в отношении $N(\nu_\mu)/N(\nu_e)$ действительно является следствием нейтринных осцилляций, степень осцилляций будет различной в зависимости от длины пути, проходимого нейтрино от места его образования до детектора. Для вертикально идущих нейтрино эта длина составляет всего 20 км. Для горизонтально идущих нейтрино путь составляет порядка 1000 км. Нейтрино, попадающие в детектор снизу из-под Земли, проходят путь около 13000 км. Так что длина пути для различных направлений значительно отличается.

Из рисунка 15 видно, что для e -событий, вызванных ν_e , отклонений от случая без осцилляций нет. Только в случае μ -событий, вызванных ν_μ , наблюдается большое уменьшение потока, идущего снизу. На рисунке 16 светлой штриховкой изображены шесть областей допустимых параметров осцилляций солнечных нейтрино (две

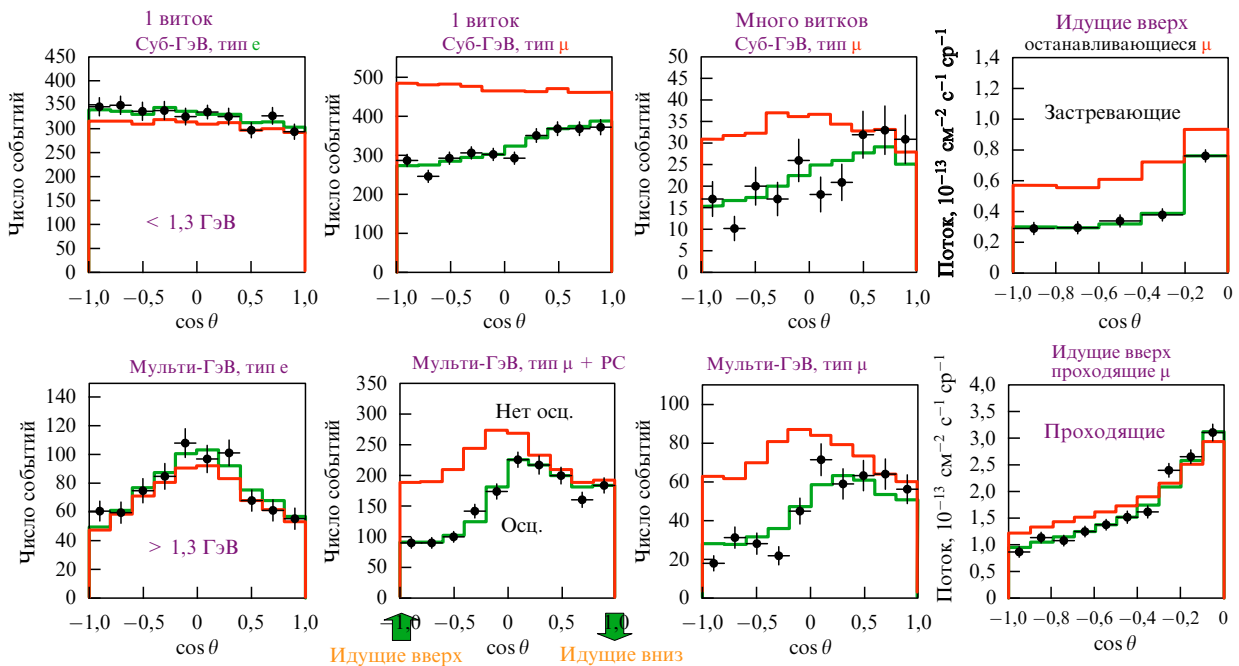


Рис. 15. Изменение осцилляций в зависимости от длины пути нейтрино.

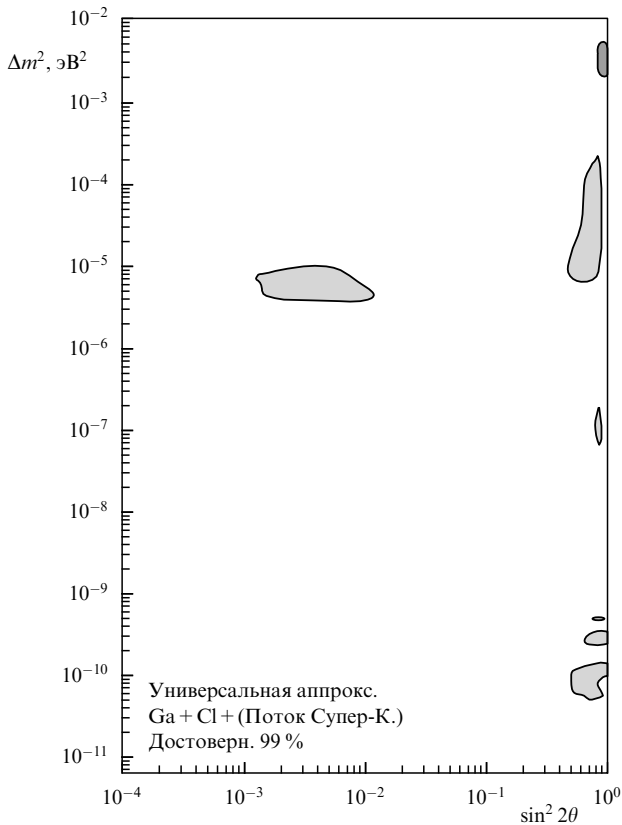


Рис. 16. Область допустимых параметров осцилляций нейтрино.

из них очень малы), а темной — одна область в верхней правой части — для осцилляций атмосферных нейтрино. Изображение построено по результатам наблюдений на Супер-КамиокаНДЕ [11].

Описанные данные по осцилляциям нейтрино, полученные на КамиокаНДЕ и Супер-КамиокаНДЕ, можно сопоставить с другими существующими данными. На следующем рис. 17 показана только одна область допустимых параметров для осцилляций солнечных нейтрино. Она была построена по результатам всех нейтринных установок, включая Супер-КамиокаНДЕ, SNO и другие радиохимические эксперименты [14–17].

Из установленного факта отличия Δm^2 от нуля с необходимостью вытекает ненулевая масса покоя нейтрино. Это означает, что стандартная теория элементарных частиц должна быть модифицирована. Чтобы отдать должное многочисленным участникам этих экспериментов, я перечислил всех авторов по регистрации нейтрино от сверхновой в работе [6] и по атмосферным нейтрино в работе [12].

Наконец, я хочу показать последние результаты, полученные в Камиоке. В настоящее время там идут нейтринные эксперименты третьего поколения. Эксперимент КамЛЕНД (KamLAND) проводится в камере, в которой первоначально находилась установка КамиокаНДЕ. В этом эксперименте используется жидкий сцинтиллятор для регистрации потока анти- ν_e , идущего от ядерного реактора, находящегося на расстоянии 200 км. Первые результаты этого эксперимента [18] были опубликованы совсем недавно, и я получил их по электронной почте. В эксперименте измеряется как поток антинейтрино, так и их энергетический спектр. Результат приведен на рис. 18. Полученные параметры осцилляций

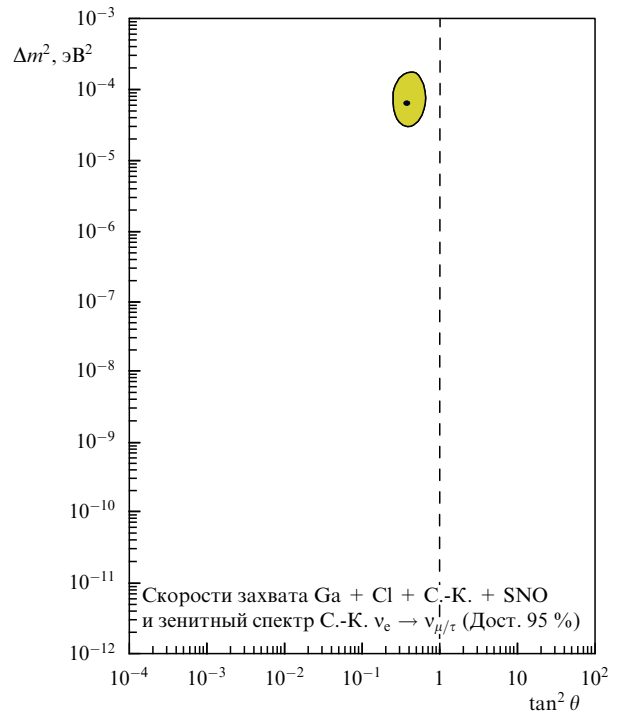


Рис. 17. Область допустимых параметров осцилляций солнечных нейтрино.

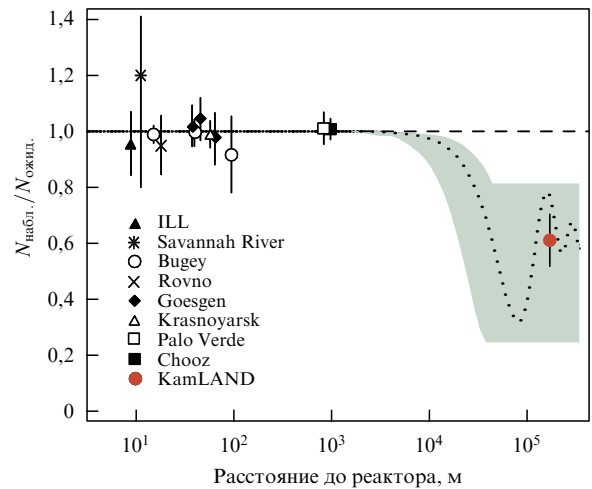


Рис. 18. Результаты эксперимента КамЛЕНД.

нейтрино составляют $\sin 2\phi = 0,833$ и $\Delta m^2 = 5,5 \times 10^{-5}$ эВ² и находятся в хорошем согласии с результатами по солнечным нейтрино (заштрихованная область на рис. 17).

В этом эксперименте подтверждаются осцилляции не нейтрино, а антинейтрино, и поэтому полученные одинаковые параметры осцилляций означает, что СРТ-теорема не нарушается. Дальнейшее накопление данных здесь может привести к интересным результатам по СР-нарушению в рамках СРТ-инвариантности [18]. Интересно отметить, что примерно две трети участников этого эксперимента — из США. Некоторые говорят, что Камиока стала сейчас настоящей "Меккой" для исследователей нейтрино, что мне весьма приятно слышать.

Как же дальше будет развиваться новая область астрофизики — нейтринная астрофизика? Конечно,

планы у различных исследователей разные. Есть идея построить мегатонную установку Гипер-КамиокаНДЕ. Для поиска нейтринных событий от сверхновых полезной может быть сеть из, по крайней мере, трех детекторов типа Супер-КамиокаНДЕ. Наиболее амбициозная задача состоит в обнаружении реликтового излучения космических нейтрино с температурой 1,9 К. Это излучение несет информацию о вселенной спустя 1 секунду после начала расширения. Ненулевая масса нейтрино означает, что нейтрино низких энергий могут полностью отражаться при очень низких температурах. Это чудесный подарок экспериментаторам, дающий возможность построения параболического зеркала для фокусирования нейтринного потока. Однако регистрация таких низкоэнергетических нейтрино представляет собой поистине грандиозную задачу.

Благодарности. Мне очень хотелось бы поблагодарить корпорацию "Хамамацу фотоникс" за техническое содействие в изготовлении фотоумножителей диаметром 50 см. Они были важной составляющей экспериментов в Камиоке. Эксперименты в Камиоке получали щедрую поддержку со стороны Министерства образования, культуры и науки Японии, за что мы ему сердечно благодарны.

Список литературы

1. Koshihba M *Phys. Rep.* **220** 229 (1992)
2. Davis R (Jr) "Nobel Lecture: A half-century with solar neutrinos" *Rev. Mod. Phys.* **75** 985 (2003) [Перевод на русский язык *УФН* **174** 408 (2004)]
3. Bionta R M et al. *Phys. Rev. Lett.* **51** 27 (1983)
4. Kume H et al. *Nucl. Instrum. Methods* **205** 443 (1983)
5. Hirata K S et al. *Phys. Rev. Lett.* **63** 16 (1989)
6. Hirata K, Kajita T, Koshihba M, Nakahata M, Oyama Y, Sato N, Suzuki A, Takita M, Totsuka Y, Kifune T, Suda T, Takahashi K, Tanimori T, Miyano K, Yamada M, Beier E W, Feldscher L R, Kim S B, Mann A K, Newcomer F M, Van-Berg R, Zhang W, Cortez B G *Phys. Rev. Lett.* **58** 1490 (1987)
7. Hirata K S et al. *Phys. Lett. B* **205** 416 (1988)
8. Georgi H, Glashow S L *Phys. Rev. Lett.* **32** 438 (1974)
9. Maki Z, Nakagawa N, Sakata S *Prog. Theor. Phys.* **28** 870 (1962)
10. Hatakeyama S et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 2016 (1998)
11. Fukuda S et al. *Phys. Lett. B* **539** 179 (2002)
12. Fukuda Y, Hawakawa T, Ichihara E, Inoue K, Ishino H, Itow Y, Kajita T, Kameda J, Kasuga S, Kobayashi K, Kobayashi Y, Koshio Y, Miura M, Nakahata M, Nakayama S, Okada A, Okumura K, Sakurai N, Shiozawa M, Suzuki Y, Takeuchi Y, Totsuka Y, Yamada S, Earl M, Habig A, Kearns E, Messier M D, Scholberg K, Stone J L, Sulak L R, Walter C W, Goldhaber M, Barszczak T, Casper D, Gajewski W, Halverson P G, Hsu J, Kropp W R, Price L R, Reines F, Smy M, Sobel H W, Vagins M R, Ganezer K S, Keig W E, Ellsworth R W, Tasaka S, Flanagan J W, Kibayashi A, Learned J G, Matsuno S, Stenger V J, Takemori D, Ishii T, Kanzaki J, Kobayashi T, Mine S, Nakamura K, Nishikawa K, Oyama Y, Sakai A, Sakuda M, Sasaki O, Echigo S, Kohama M, Suzuki A T, Haines T J, Blaufuss E, Kim B K, Sanford R, Svoboda R, Chen M L, Conner Z, Goodman J A, Sullivan G W, Hill J, Jung C K, Martens K, Mauger C, McGrew C, Sharkey E, Viren B, Yanagisawa C, Doki W, Miyano K, Okazawa H, Saji C, Takahata M, Nagashima Y, Takita M, Yamaguchi T, Yoshida M, Kim S B, Etoh M, Fujita K, Hasegawa A, Hasegawa T, Hatakeyama S, Iwamoto T, Koga M, Maruyama T, Ogawa H, Shirai J, Suzuki A, Tsushima F, Koshihba M, Nemoto M, Nishijima K, Futagami T, Hayato Y, Kanaya Y, Kaneyuki K, Watanabe Y, Kielczewska D, Doyle R A, George J S, Stachyra A L, Wai L L, Wilkes R J, Young K K (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562 (1998)
13. Ahmad Q R et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **89** 011301 (2002)
14. Cleveland B T et al. *Astrophys. J.* **496** 505 (1998)
15. Hampel W et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **447** 127 (1999)
16. Абдурашитов Д Н и др. *ЖЭТФ* **122** 211 (2002) [Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *JETP* **95** 181 (2002)]
17. Altmann M et al. (NO Collab.) *Phys. Lett. B* **490** 16 (2000)
18. Eguchi K et al. (KamLAND Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **90** 021802 (2003)
19. Fukuda Y et al. *Phys. Lett. B* **335** 237 (1994)
20. Shiozawa M (For the Super-Kamiokande Collab.), in *Proc. of the XXth Intern. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2002), Munich, Germany, May 25–30, 2002* (unpublished)