

# Физика нейтрино: промежуточные итоги

М.Д.Скорухватов

Открытие нейтрино — достаточно известная история, о которой читателям «Природы» только что напомнил С.С.Герштейн [1]. Почти 25 лет, от гипотезы В.Паули до знаменитых экспериментов Ф.Райнеса и К.Коузена, попытки зарегистрировать неуловимое нейтрино казались совершенно безуспешными. Характеризуя оценочное значение сечения (вероятности) взаимодействия нейтрино с веществом, Райнес писал: «Чтобы понять, насколько мало это взаимодействие, заметим, что средний путь нейтрино в жидком водороде составляет 1000 световых лет» [2]. И все же нейтрино было обнаружено; более того, и по сей день эксперименты, в которых детектируются нейтрино, чрезвычайно востребованы в исследованиях — в астрофизике, астрономии, космологии, геофизике, а в физике частиц изучение свойств и взаимодействий нейтрино занимает одно из центральных направлений.



**Михаил Дмитриевич Скорухватов**, доктор физико-математических наук, заместитель директора Центра фундаментальных исследований, директор Отделения физики частиц НИЦ КИ, заведующий кафедрой физики элементарных частиц Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Область научных интересов — ядерная физика и физика частиц, в том числе физика нейтрино и астрочастиц.

нов и кварков. Массы частиц в СМ генерируются с помощью гипотетического поля Хиггса; поиски скалярного бозона, кванта этого поля, недавно завершили успехом на ускорителе в ЦЕРНе [3].

## Нейтрино в Стандартной модели

По современным представлениям, окружающий нас материальный мир состоит из фермионов — лептонов и кварков — элементарных частиц со спином 1/2, взаимодействующих посредством полей, квантами которых являются фотоны (электромагнитное взаимодействие), W- и Z-бозоны (слабое взаимодействие), а также глюоны (сильное взаимодействие). Данные о наиболее элементарной структуре материи обобщены в так называемой Стандартной модели (далее СМ, рис.1), с высокой точностью описывающей совокупность свойств и взаимодействий известных нам лепто-



Рис.1. Структура Стандартной модели.

Надежно установлено, что нейтрино и его античастица (антинейтрино) — это нейтральные лептоны, принимающие участие только в слабом взаимодействии. В научной литературе состояние, в котором нейтрино рождается или аннигилирует, называется флэйворным (flavour — аромат). В результате исследований были обнаружены три разных флэйворных состояния — электронное ( $\nu_e$ ), мюонное ( $\nu_\mu$ ) и тау- ( $\nu_\tau$ ) нейтрино и соответствующие им антинейтрино. Вместе с другими фермионами они образуют три семейства, или поколения. Заряженные частицы в каждом поколении обладают одинаковыми характеристиками, за исключением масс: частицы младших поколений легче. Это делает возможным распады частиц старших поколений, а стабильная материя во Вселенной практически полностью состоит из лептонов и кварков первого поколения.

После открытия нейтрино много усилий было потрачено на измерение их масс, но проведенные эксперименты показали, что масса нейтрино либо чрезвычайно мала, либо даже равна нулю. Задача прямого измерения массы у нейтрино оказалась настолько сложной, что по сей день мы имеем только ограничения на искомые величины:  $m(\nu_e) < 2.1$  эВ,  $m(\nu_\mu) < 170$  кэВ,  $m(\nu_\tau) < 15.5$  МэВ. Сегодня из косвенных данных известно, что масса у нейтрино все-таки есть (см. далее). Соотношение массы (в энергетических единицах) и энергии нейтрино  $E$ , с которыми мы имеем дело в текущих экспериментах, всегда соответствует условию  $E \gg m(\nu)$ , т.е. наблюдаемые нами нейтрино — частицы релятивистские.

Частицы и взаимодействия в СМ описываются с учетом их наблюдаемой инвариантности по отношению к фундаментальным симметриям — пространственной четности  $P$  (инверсии пространственных координат  $r \rightarrow -r$ ), зарядовой четности  $C$  (переходу от частицы к античастице) и инверсии времени  $T$  ( $t \rightarrow -t$ ). В середине прошлого века было обнаружено, что в процессах слабого взаимодействия пространственная и зарядовая четности в максимальной степени нарушены. Несохранение четности приводит к продольной поляризации частиц. В релятивистском случае это означает, что флэйворные состояния нейтрино должны описываться «левыми» спинорами —  $\psi_L(\nu)$ , со спиральностью  $-1/2$  (спин частицы ориентирован против направления ее движения), а антинейтрино — «правыми» —  $\psi_R(\bar{\nu})$ , со спиральностью  $+1/2$  (спин направлен по движению частицы). С учетом этих свойств была развита теория слабого взаимодействия [4], которая затем, в 70-х годах, была обобщена в теории Вайнберга—Салама—Глэшоу. Последняя в формализме СМ стала основой для описания слабых и электромагнитных взаимодействий лептонов и кварков. В рамках этой теории левые компоненты полей частиц (правые компоненты античастиц) объеди-

нены в дублеты группы  $SU(2)$ , образующие лептонный и кварковый сектора (рис.1):

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_{eL} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_{\mu L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_{\tau L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$$

В настоящее время нет убедительных доказательств существования «правого» нейтрино и «левого» антинейтрино. Примесь «неправильной» спиральности для релятивистских нейтрино, обусловленной массой, сильно подавлена и определяется фактором  $m(\nu)/E \ll 1$ , что недоступно экспериментальной проверке. Однако сохранение СРТ-комбинации фундаментальных симметрий, которое служит базисным принципом теории, дает основание полагать, что правые нейтрино и левые антинейтрино существуют. Но тогда их взаимодействие с веществом должно быть ничтожным, даже в сравнении с проявлением слабых сил, и такие нейтрино должны быть, как отмечал Б.М.Понтекорво, «стерильными» [5]. В СМ стерильные состояния нейтрино могут быть введены в виде  $SU(2)$ -синглетов:  $(\nu_e)_R$ ,  $(\nu_\mu)_R$  и  $(\nu_\tau)_R$ , которые не связаны с  $W$ - и  $Z$ -бозонами и поэтому не участвуют в слабом взаимодействии.

После обнаружения несохранения  $P$ - и  $C$ -четности в  $\beta$ -распаде была разработана теория двухкомпонентного нейтрино, допускающая описание безмассового нейтрино с помощью двухкомпонентных спиноров. Правые нейтрино и левые антинейтрино в этом случае вообще не использовались. Сегодня эта теория не столь актуальна, но связанная с ней история повлияла на развитие физики нейтрино в Курчатовском институте. Старшие коллеги рассказывали, что Л.Д.Ландау, один из разработчиков этой модели, выступая на семинаре, заинтересовал И.В.Курчатова возможностями проверки теории. Для этого предполагалось измерить продольную поляризацию электронов в  $\beta$ -распаде ядер. Разработка эксперимента была поручена П.Е.Спиваку, который привлек к работам своего ученика Л.А.Микаэляна. Этот случай дал старт развитию в Курчатовском институте целого направления исследований: в конце 60-х годов была разработана программа работ по физике реакторных нейтрино под руководством Микаэляна и созданы две нейтринных лаборатории (одна на атомной станции в Ровно, другая в Красноярске), где на ядерных ректорах учеными Курчатовского института были выполнены уникальные исследования свойств и взаимодействий электронного антинейтрино, поставлены эксперименты по поиску нейтринных осцилляций, намечены пути практического использования нейтринного излучения. Сам же Петр Ефимович Спивак до конца жизни интересовался проблемой масс нейтрино и был одним из авторов уникального проекта, завершившегося измерением указанного выше рекордного предела на массу  $\bar{\nu}_e$ , излучаемого в  $\beta$ -распаде трития.

## Тожественны ли нейтрино и антинейтрино?

За исключением нейтрино, все фермионы в СМ — это заряженные частицы, которые в свободном состоянии описываются уравнениями Дирака. Благодаря отсутствию электрического заряда нейтрино может быть истинно нейтральным лептоном, т.е. частицей, тождественно совпадающей со своей античастицей. В этом случае описание нейтрино возможно с помощью уравнений Майораны, которые применимы для тождественных фермионов. Однако выяснить этот вопрос оказалось непросто из-за спиральности нейтрино. Например, предпринимались попытки поглотить антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  в процессе обратного  $\beta^-$ -распада. Однако даже в случае  $\bar{\nu}_e \equiv \nu_e$  такая реакция запрещена из-за правой спиральности налетающего антинейтрино.

Вопрос о тождественности нейтрино и антинейтрино до настоящего времени остается открытым. Способом решения проблемы считается поиск процессов безнейтринного двойного  $\beta$ -распада некоторых ядер ( $0\nu 2\beta$ ), т.е. реакций спонтанного распада ядер, в которых, например, заряд ядра увеличивается на две единицы и испускаются только два электрона (рис.2). Как видно из рисунка, в этом процессе на первом этапе излучаются электрон и виртуальное антинейтрино, которое в случае  $\bar{\nu} \equiv \nu$  поглощается промежуточным ядром и вызывает обратный  $\beta$ -распад с испусканием еще одного электрона. Обнаружить процесс ( $0\nu 2\beta$ ) пока не удалось, хотя интенсивные поиски ведутся во многих научных центрах мира [6]. Установленный предел на период полураспада ( $0\nu 2\beta$ ) ряда ядер ( $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{130}\text{Te}$  и др.) составляет  $10^{24}$ – $10^{25}$  лет. Поиски продолжаются в нескольких международных проектах (GERDA, SUPERNEMO, EXO и др.) с участием российских ученых.

Работы по изучению двойного  $\beta$ -распада тесно связаны с разработкой технологий и производством изотопно-обогащенных материалов. В Курча-

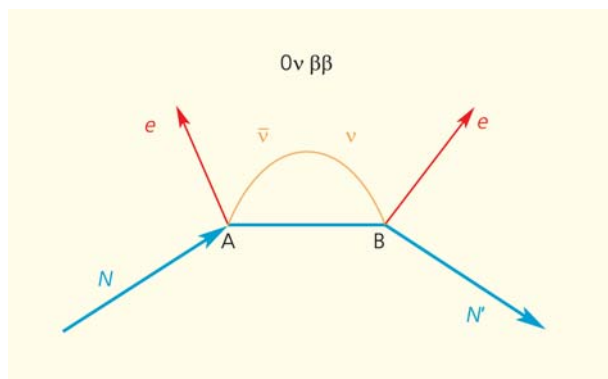


Рис.2. Двойной бета-распад ( $0\nu\beta\beta$ ) без излучения антинейтрино, который становится возможным для нейтрино Майораны.

товском институте были созданы и действуют экспериментальные установки, использующие самые современные методики разделения изотопов. В частности, с помощью этих методов были получены наиболее интересные для экспериментов обогащенные мишени, среди которых  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{130}\text{Xe}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ .

## За пределами Стандартной модели

Расширение СМ тесно связано с проблемой нейтринных масс. В рамках модели существует два способа построения массового члена. Во-первых, все заряженные дираковские фермионы приобретают массу путем взаимодействия с полем Хиггса левыми и правыми компонентами. Поэтому по аналогии существует возможность построения «дираковской» массы нейтрино ( $\bar{\nu} \neq \nu$ ) путем введения в СМ правых нейтрино и левых антинейтрино. Другой способ допускает для истинно нейтральных фермионов построение «майорановской» массы ( $\bar{\nu} \equiv \nu$ ), когда используются только левые компоненты нейтрино и правые компоненты антинейтрино. Однако оба способа выглядят неубедительно из-за несоответствия масштаба масс нейтрино и заряженных лептонов (например,  $m(\nu_e)/M(e^-) < 4 \cdot 10^{-6}$ ), что трудно объяснить. Теоретики находят несколько вариантов решения проблемы, которые, однако, связаны с изменением СМ и введением новых частиц. Наиболее популярная гипотеза опирается на так называемый механизм see-saw (качелей), в котором вводятся правые нейтрино (левые антинейтрино), обладающие гигантской майорановской массой  $M \sim 10^{14}$ – $10^{16}$  ГэВ. В этой модели массы наблюдаемых нейтрино обратно пропорциональны  $M$ , что обеспечивает их очень маленькую величину. Добавление нейтрино с новым масштабом масс означает построение новой физики за рамками СМ.

Другая задача связана с поисками электромагнитных свойств нейтрино, так как оно хотя и не имеет заряда, но может обладать магнитным моментом. Теоретические оценки допускают такую возможность, но величина магнитного момента оказывается пропорциональной массе нейтрино, что приводит к слишком ничтожному значению для обнаружения в экспериментах. Однако существуют теории, расширяющие СМ, в которых магнитный момент нейтрино зависит уже от массы заряженного лептона. В этом случае он достигает величин, близких к чувствительности измерений:  $\mu_{\text{экс}} < 3 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (реакторные антинейтрино) и  $\mu_{\text{экс}} < 5 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (солнечные нейтрино), где  $\mu_B$  — магнетон Бора. Поэтому продолжение поисковых работ в этом направлении представляет большой интерес, в том числе как тест вариантов расширения СМ.

Одной из центральных проблем остается нарушение в слабых взаимодействиях CP-инвари-

антности, т.е. симметрии при комбинированной операции зарядовой и пространственной инверсии. Дело в том, что на основании экспериментов по изучению распадов нейтральных каонов, проведенных еще в 1964 г., было доказано, что в кварковом секторе комбинированная CP-четность не сохраняется. Этот вывод был подтвержден в современных экспериментах, в которых исследовались распады  $B^0$ -мезонов [7]. Открытие CP-нарушения имеет принципиальное значение, так как впервые указывает нам, что в природе все-таки существует различие между частицами и античастицами. Попытки объяснения CP-нарушения привели к гипотезе, что в слабом взаимодействии флэйворные состояния кварков в дублетах (1) представляют собой суперпозицию состояний, соответствующих свободным частицам:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}, \quad V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix},$$

где  $V_{\text{CKM}}$  называется матрицей Каббиво—Кабаяши—Маскава и определяет смешивание кварков. Японские физики показали [8], что, если матрица смешивания  $3 \times 3$  содержит комплексные элементы, CP-симметрия в слабых процессах с участием кварков будет нарушена. Существует ли смешивание у лептонов и нарушена ли CP-симметрия в лептонном секторе? Далее мы обсудим эти проблемы, но отметим, что пока эффектов CP-нарушения у лептонов не наблюдалось.

### Нейтринные осцилляции

Важнейшим открытием в области физики частиц стало открытие нейтринных осцилляций. Это явление, наблюдаемое как с природными, так и с искусственными источниками нейтрино, заключа-

ется в том, что при распространении нейтрино в вакууме или в среде его флэйворное состояние с определенной вероятностью может изменяться. Например, в пучке мюонных нейтрино, рожденных на ускорителе, по мере удаления от источника наблюдаются переходы  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  и  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ .

Оказалось, что феноменологическое описание эффекта осцилляций можно дать, используя, как и в случае кварков, идею представления флэйворного состояния нейтрино в виде суперпозиции состояний, обладающих определенными массами:

$$\begin{aligned} \nu_e &= \cos\theta \times \nu_1 + \sin\theta \times \nu_2, \\ \nu_\mu &= -\sin\theta \times \nu_1 + \cos\theta \times \nu_2, \end{aligned}$$

где для наглядности представлена упрощенная модель с двумя флэйворными состояниями и нейтрино  $\nu_1, \nu_2$  с массами  $m_1, m_2$ . Следует отметить, что на возможность смешивания состояний нейтрино, обладающих малой (но ненулевой) массой, впервые обратил внимание Понтекорво более полувека назад [5]. На расстоянии  $L$  вероятность перехода  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  и вероятность  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$  остаться в исходном состоянии, которая называется вероятностью выживания, будут равны:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E},$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}.$$

Угол  $\theta$  называется углом смешивания, он определяет амплитуду осцилляций, а  $\Delta m_{21}^2 = (m_2^2 - m_1^2)$  — это разность квадратов масс нейтрино. Длину осцилляций можно найти с помощью выражения  $L_{\text{осц}} = 4\pi E / \Delta m_{21}^2$ . Поведение вероятностей  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  и  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$  в зависимости от расстояния  $L$  (источник-детектор) приведены на рис.3 для некоторого набора параметров. Схематически эффект осцилляций проиллюстрирован на рис.4.

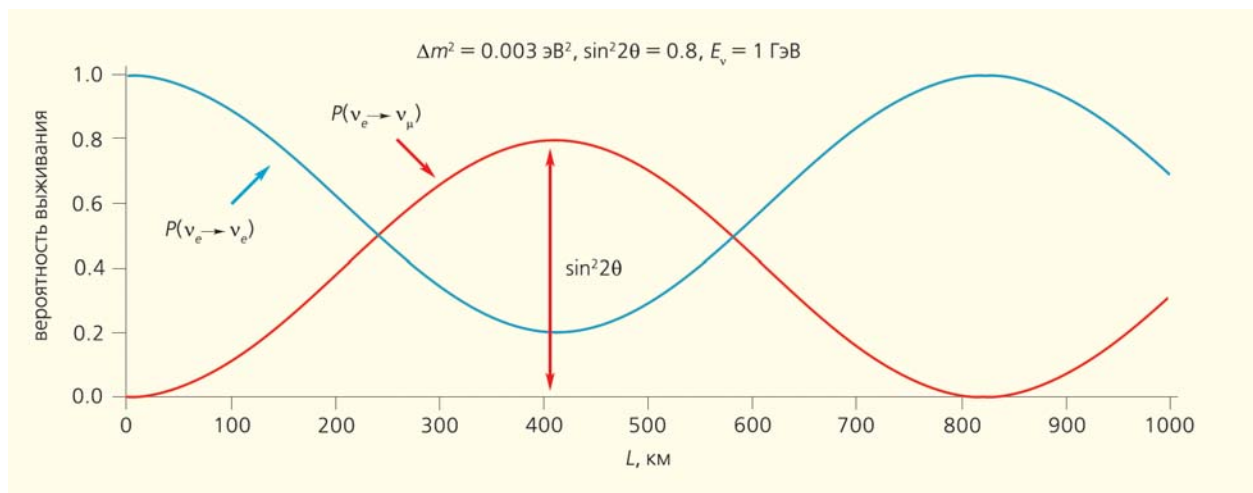


Рис.3. Пример зависимости вероятности выживания  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$  и вероятности переходов  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  от расстояния источник-детектор.



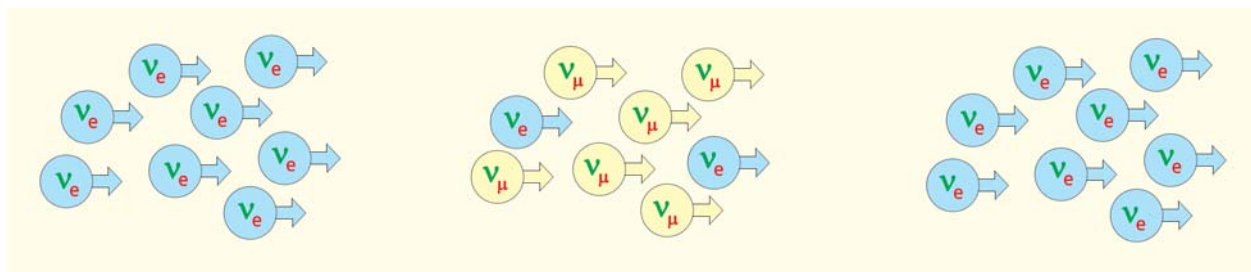


Рис.4. Иллюстрация переходов флейворных состояний нейтрино.

В модели смешивания трех флейворных состояний выражения для вероятностей переходов становятся несколько сложнее. Предполагается, что свободные нейтрино существуют в трех основных состояниях, обладающих массами  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , и флейворные состояния выражаются через матрицу смешивания  $U_{\text{PMNS}}$  размерностью  $3 \times 3$ , которая получила название матрицы Понтекорво—Маки—Накагава—Сакаты (ПМНС):

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}.$$

При распространении нейтрино, например из начального состояния  $\nu_\alpha$ , возникают периодические переходы  $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$  ( $\nu_\beta = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), вероятность которых зависит от расстояния  $L$ , от энергии нейтрино, от элементов матрицы смешивания  $U_{\alpha i}$  и от разности квадратов масс  $\Delta m_{21}^2 = (m_2^2 - m_1^2)$ ,  $\Delta m_{32}^2 = (m_3^2 - m_2^2)$  и  $\Delta m_{13}^2 = (m_1^2 - m_3^2)$ . Учитывая, что всегда справедливо соотношение  $\Delta m_{21}^2 + \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{13}^2 = 0$ , среди  $\Delta m_{ij}^2$  есть только две независимые величины.

Подчеркнем, что наблюдение осцилляций однозначно свидетельствует о массивности нейтрино, хотя и косвенным образом, так как абсолютные значения масс в осцилляционных экспериментах найти невозможно. Нейтринные осцилляции указывают также на смешивание состояний в лептонном секторе, а вот вопрос о нарушении CP-симметрии пока остается открытым.

Остановимся на этом более подробно. По аналогии с кварками мы полагаем, что в случае CP-нарушения матрица  $U_{\text{PMNS}}$  должна содержать комплексные параметры. В наиболее популярной параметризации элементы  $U_{\text{PMNS}}$  зависят от трех углов  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$  и комплексной величины в виде фазового параметра  $e^{i\delta}$  (если нейтрино являются майорановскими фермионами, матрица содержит дополнительные фазы). Допустимые значения углов смешивания и фазы следующие:  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$  и  $0 \leq \delta \leq 180^\circ$ . Нарушение CP-четности означает, что вероятности переходов, например  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  и  $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)$ , отличаются, и это различие зависит от фазы  $\delta$ , а в случае инвариантности  $\delta = 0$ . Анализ показывает, что CP-нечетные эффекты возникают только в переходах между флейворными состоя-

ниями  $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$  и не проявляются в выражении для вероятности выживания  $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha$ . Поэтому измерение  $\delta$  возможно только в экспериментах «на появление», например в переходах  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ .

Короткая справка об экспериментах, в которых были получены доказательства осцилляций нейтрино, будет дана ниже. Перечислим последние результаты.

— В экспериментах по изучению осцилляций нейтрино подтверждена модель смешивания с тремя нейтрино  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ , для которых были измерены значения разности квадратов масс:

$$\Delta m_{21}^2 = (7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \text{эВ}^2, \\ |\Delta m_{32}^2| \approx |\Delta m_{13}^2| = (2.43 \pm 0.13) \cdot 10^{-3} \text{эВ}^2.$$

Значение  $\Delta m_{21}^2 > 0$  и меньше  $|\Delta m_{32}^2|$  более чем в 30 раз, а знак в разности  $(m_3^2 - m_2^2)$  не определен. Тогда имеются две возможности для последовательности значений нейтринных масс или, как ее называют в литературе, иерархии масс нейтрино: либо  $m_1 < m_2 < m_3$  (нормальная иерархия), либо  $m_3 < m_1 < m_2$  (обратная иерархия). На выяснение этого вопроса направлены новые проекты, которые будут реализованы в ближайшие годы.

— Установлена связь электронного, мюонного и тау-нейтрино ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) с массовыми состояниями ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) через матрицу ПМНС. Измерены углы смешивания:  $\theta_{12} = (34 \pm 1)^\circ$ ,  $\theta_{23} = (45 \pm 7)^\circ$ ,  $\theta_{13} = (9 \pm 1)^\circ$ . Значение фазы  $\delta$  пока остается неизвестным. Самый маленький угол  $\theta_{13}$  был измерен недавно [9], но его значение оказалось больше ожидаемого, что было воспринято с большим энтузиазмом. Дело в том, что от величины  $\theta_{13}$  зависит вероятность осцилляций между флейворными состояниями  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ . Поэтому подтвердились реальные перспективы для измерения CP нарушающей фазы,  $\delta$ , в ускорительных экспериментах.

### Экспериментальные свидетельства осцилляций

Гипотеза, предсказывающая осцилляции нейтрино, вызвала небывалую активность среди физиков-экспериментаторов. Поиски осцилляций начались на ядерных реакторах, ускорителях, в космических лучах. Но убедительные доказательства, снис-

кавшие широкое признание, были получены только через 30 лет. Ключевую роль здесь играли эксперименты с солнечными нейтрино [10], в которых измерялись потоки электронных нейтрино, рожденных в термоядерных процессах в недрах Солнца. Энергия солнечных нейтрино лежит в диапазоне 0—20 МэВ, а расстояние (база экспериментов)  $L \sim 1.5 \cdot 10^8$  км. Данные, полученные в проектах Homestake, Gallex/GNO и SAGE, Kamiokande, и в особенности прецизионные измерения последних лет в проектах SuperKamiokande, SNO, Borexino дали убедительные доказательства в пользу нейтринных осцилляций и позволили измерить массовый параметр  $\Delta m_{21}^2$  и угол смешивания  $\theta_{12}$ .

Решающим моментом в понимании и согласовании данных стало выяснение влияния среды, в которой происходит распространение нейтрино, на осцилляции. Дело в том, что, когда нейтрино двигаются в веществе, амплитуда их распространения изменяется вследствие когерентного рассеяния вперед на электронах и нуклонах. Теория этого явления была разработана Л.Вольфенштейном, С.П.Михеевым и А.Ю.Смирновым для различных сред. Михеев и Смирнов показали, что при прохождении слоев солнечного вещества с изменяющейся плотностью (от  $\sim 150$  г/см<sup>3</sup> до 0) переходы электронного нейтрино в другие флейворные состояния могут усиливаться. Эффект зависит от энергии солнечных нейтрино: в области менее 1—2 МэВ работает механизм осцилляций в вакууме, а при увеличении энергии вероятность переходов возрастает. Эта модель была подтверждена (рис.5) в международном эксперименте Borexino [10], который проводится с участием российских ученых из НИЦ «Курчатовский институт», Объединенного института ядерных исследо-

ваний, Петербургского института ядерной физики и Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ.

Электронные и мюонные нейтрино образуются также в атмосфере в результате ядерных взаимодействий первичных космических лучей, рождения и распадов  $K$ -,  $\pi$ -мезонов и мюонов ( $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$  и  $\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \nu_e$ ). Атмосферные нейтрино с энергиями от нескольких сотен мегаэлектронвольт до  $10^3$  ГэВ в зависимости от направления падения (в том числе сквозь Землю) проходят расстояния от  $10$  до  $10^4$  км. Их потоки рассчитываются с погрешностью 10—20%, но более точные предсказания возможны для отношения потоков мюонных и электронных нейтрино. Поэтому проблема возникла, когда в нескольких экспериментах Kamiokande, IMB, Soudan и Macro было получено аномально низкое (по сравнению с ожидаемым) значение отношения. В 1998 г. в эксперименте SuperKamiokande анализ регистрируемых мюонных и электронных событий с разными энергиями в зависимости от зенитного угла падения нейтрино позволил объяснить результаты наблюдаемой аномалии с помощью осцилляций нейтрино по каналу  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  и определить параметры  $|\Delta m_{31}^2|$  и  $\theta_{23}$ .

Атомные реакторы остаются самыми мощными источниками электронных антинейтрино, которые рождаются в процессе цепной ядерной реакции в активной зоне. Для типичных реакторов на АЭС с тепловой мощностью 3 ГВт полный поток антинейтрино достигает  $\sim 6 \cdot 10^{20}$  с<sup>-1</sup>, а энергия простирается до 8—10 МэВ. Поиск нейтринных осцилляций на реакторах продолжается не одно десятилетие. Их история была наполнена драматическими моментами, когда казалось, что осцилляции уже обнаружены. Но первый успех пришел к физикам коллаборации KamLand, измерившим потоки антинейтрино от АЭС в Японии, среднее расстояние до которых составляло 180 км. В измерениях было обнаружено исчезновение  $\bar{\nu}_e$  с вероятностью, которая соответствовала параметрам осцилляций солнечных нейтрино, т.е.  $\Delta m_{21}^2$  и  $\theta_{12}$ . Экспериментальные данные представлены на рис.6, прекрасно иллюстрирующем эффект изменения вероятности выживания антинейтрино.

Курчатовский институт — один из пионеров исследований реакторных антинейтрино. В 80-х годах на Ровенской АЭС [11] и в Красноярске были проведены поиски осцилляций нейтрино на расстояниях до нескольких десятков метров от

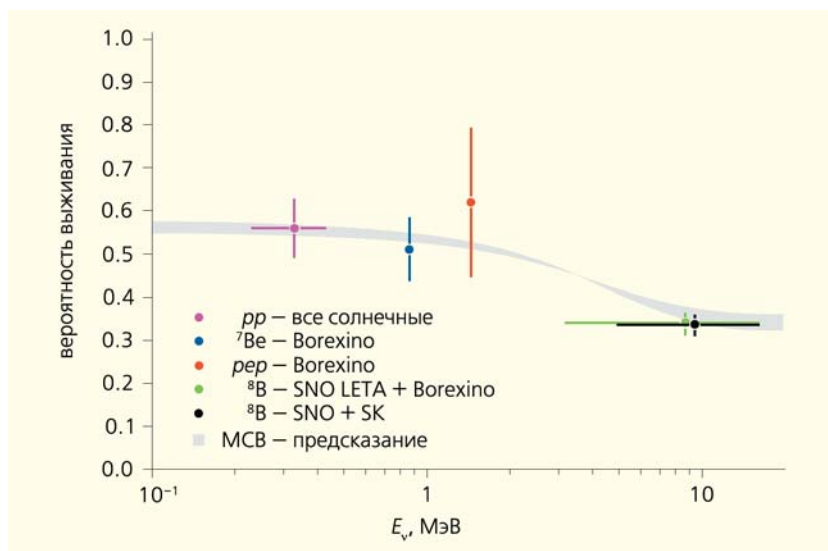


Рис.5. Вероятность выживания  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$  солнечных нейтрино в зависимости от энергии. В области энергий более 1—2 МэВ наблюдается эффект усиления осцилляций в согласии с предсказанием модели MSW-LMA (серая полка).

реакторов. В частности, измерения в Красноярске на расстоянии 90 м в свое время были рекордными по чувствительности. Сегодня, конечно, ясно, что эффект осцилляций проявляется лишь на расстоянии  $\sim 1-2$  км по каналу ( $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ ) с «атмосферным» массовым параметром  $|\Delta m_{31}^2| \sim 2.4 \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> и углом смешивания  $\theta_{13}$ . Но в 80-х годах отсутствие каких-либо указаний инициировало работы вблизи реакторов в России, Германии, Франции и США. После открытия осцилляций атмосферных нейтрино начались более осмысленные поиски, так как в реакторных экспериментах предполагалось измерить последний неизвестный угол  $\theta_{13}$  матрицы смешивания ПМНС. Первая попытка была предпринята на АЭС CHOOZ (Франция)

в кооперации ученых Курчатовского института с группами из Италии, США и Франции. Детектор был установлен на расстоянии  $\approx 1$  км от реакторов. Однако угол смешивания оказался маленьким, и было получено лишь ограничение на его величину:  $\theta_{13} < 10^\circ$ . Этот результат до последнего времени оставался лучшим в мире. Метод увеличения чувствительности измерений был предложен Микаэляном, и в 2012 г. сразу в трех экспериментах (DoubleCHOOZ, Daya Bay и RENO) было измерено значение угла  $\theta_{13}$ .

Искусственный источник мюонных нейтрино — ускорители. Ускоренные протоны направляются на мишень, в которой в результате ядерных взаимодействий рождаются пионы и каоны. Образованные мезоны отбираются по знаку заряда и импульсу, фокусируются и поступают в специальный вакуумный туннель, двигаясь в котором, они распадаются на легу на мюоны и мюонное нейтрино. Энергии нейтрино лежат в области  $\sim (1+10)$  ГэВ, поэтому при расположении детекторов на расстояниях в сотни километров ускорительные эксперименты обладают чувствительностью к осцилляциям атмосферных нейтрино. Регистрация нейтрино осуществляется крупномасштабными детекторами, размещенными в подземных лабораториях. Такие исследования, которые принято называть экспериментами с длинной базой, были поставлены и показали свою состоятельность (K2K, CNGS, T2K, MINOS). География этих экспериментов (ускорительный центр — подземная лаборатория) была следующей: KEK—Kamioka (Япония,  $L = 235$  км), Fermilab—Судан (США,  $L = 730$  км), ЦЕРН—Гран-Сассо (Европа,  $L = 730$  км). В них были не только подтверждены значения параметров осцилляций  $\Delta m_{32}^2$  и  $\theta_{23}$  при измерении вероятности выживания

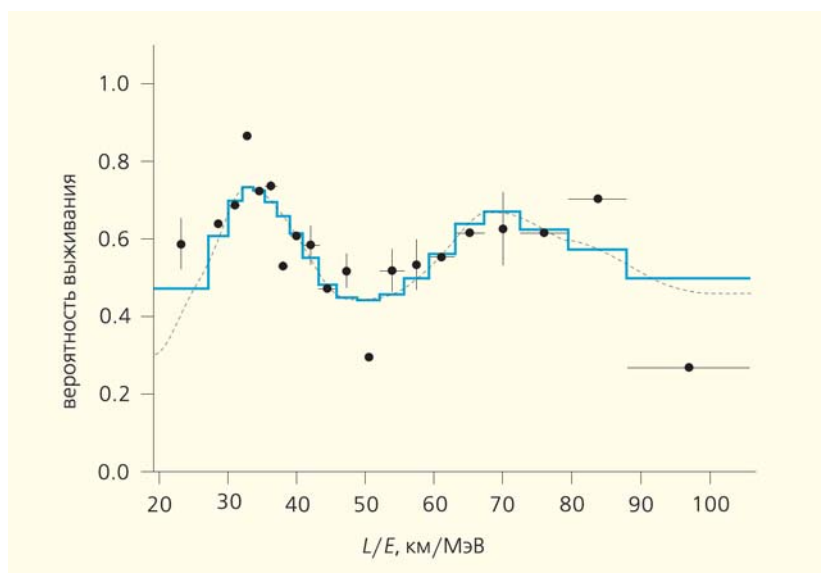


Рис.6. Осцилляции реакторных антинейтрино, обнаруженные в эксперименте KamLand.

$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ , но также появились первые результаты по наблюдению моды  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  и измерению  $\theta_{13}$ . Сегодня в литературе обсуждается широкий спектр новых проектов, среди которых наиболее значимы эксперименты с суперпучками нейтрино высокой интенсивности (500–700 кВт): LBNE (Fermilab—Хоумстейк,  $L = 1300$  км, США), HyperKamiokande (JPARC—Kamiokande,  $L = 295$  км, Япония) и LAGUNA—LBNO (ЦЕРН—Пихасалми, Финляндия,  $L = 2300$  км). Эти проекты имеют долгосрочный характер и рассчитаны на период до 2025 г. Ключевой задачей считается измерение фазы  $\delta$ , определяющей нарушение CP-инвариантности лептонов.

## Стерильные нейтрино

Концепция стерильных нейтрино, как уже упоминалось, была введена Понткорво много лет назад (см. [5]). Но некоторые «аномальные» результаты последних лет заставляют нас сегодня пристальнее взглянуть на эту проблему.

С конца 90-х годов проводятся ускорительные эксперименты с короткой базой, т.е. на небольших расстояниях, с умеренными энергиями нейтрино, для которых  $L/E \sim 0.5 + 2.0$  м/МэВ. Данные некоторых работ привели к парадоксальным заключениям. В эксперименте LSND ( $\langle E \rangle = 30$  МэВ,  $L = 30$  м), в котором анализировался поток мюонных антинейтрино от ускорителя, было зарегистрировано избыточное количество электронных антинейтрино. При интерпретации результата возникло подозрение на осцилляции по каналу ( $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ ), но найденная вероятность переходов  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = 2.6 \cdot 10^{-3}$  соответствовала значению  $\Delta m^2 \sim 0.01-1.0$  эВ<sup>2</sup>, которое значительно превосходило известные вели-

чины  $\Delta m_{21}^2$  и  $\Delta m_{32}^2$ . В поисках выхода была выдвинута гипотеза о существовании стерильного нейтрино с массой  $m_4 > m_1, m_2, m_3$ , а появление в пучке электронных антинейтрино объяснялось осцилляциями через промежуточное стерильное состояние. Этот результат, получивший название «LSND-аномалия», был недавно подтвержден в эксперименте MiniBooNe ( $\langle E \rangle = 400\text{--}600$  МэВ,  $L = 450$  м), где также наблюдались события, которые можно было истолковать как осцилляции ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ) и ( $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ ) в том же диапазоне разности квадратов масс. Следует, однако, отметить, что в других экспериментах (KARMEN, ICARUS) эта аномалия не проявлялась.

Гипотеза получила развитие при интерпретации калибровочных измерений радиохимических нейтринных галлий-германиевых детекторов (SAGE, GALLEX/GNO). Калибровка выполнялась с помощью искусственных высокоинтенсивных источников нейтрино  $\nu_e$  ( $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$  с энергией около 1 МэВ). Во всех измерениях наблюдалось более низкое число зарегистрированных событий по сравнению с ожидаемым, и дефицит можно объяснить переходами нейтрино в стерильное состояние в том же диапазоне  $\Delta m^2$ .

Совсем недавно французские физики произвели переоценку энергетического спектра реакторных антинейтрино. Ранее считалось, что счет нейтринных детекторов, установленных на расстояниях 10–100 м от атомных реакторов, согласуется с ожидаемыми значениями, рассчитанными на основании данных о спектральном составе  $\bar{\nu}_e$  ( $\langle E \rangle \sim 3\text{--}4$  МэВ). Сравнение с новыми данными указывает на дефицит в экспериментальных значениях, составляющий около 5–6%. И опять анализ данных не противоречит гипотезе о переходах реакторных антинейтрино в стерильные состояния, соответствующие массовому параметру  $\Delta m^2 \sim 1$  эВ<sup>2</sup>.

Еще в 80-х годах в Курчатковском институте под руководством Микаэляна была разработана специальная методика измерения сечения реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ , а затем были выполнены прецизионные эксперименты на реакторе АЭС в Ровно [12] и, совместно с группой французских физиков, на АЭС в Бюже во Франции. Измеренное на расстояниях 12–18 м от реакторов с лучшей в мире точностью сечение реакции  $\sigma_{\text{экс}}$  получило название «опорная точка», так как оно позволяет провести нормировку полного потока антинейтрино в месте проведения измерений и потому используется в поисковых экспериментах. Расчеты, проведенные в середине 90-х годов, подтверждали согласие измеренного сечения с его ожидаемой величиной  $\sigma_{\text{расчет}}$ . Однако значение  $\sigma_{\text{расчет}}$ , вычисленное с использованием новых данных о спектре реакторных антинейтрино, оказалось противоречащим эксперименту. Для иллюстрации величины аномального эффекта приведем отношение  $\sigma_{\text{экс}}/\sigma_{\text{расчет}}$ :  $0.942 \pm 0.030$ , т.е. разница ле-

жит на уровне около  $2\sigma$ . Такое расхождение величин в литературе часто интерпретируется как переходы реакторных антинейтрино в стерильное состояние на расстояниях  $\sim 10$  м.

Другая возможная причина «аномалии» — недостаточная полнота знаний о генерации реакторных антинейтрино. Этот процесс имеет довольно сложный механизм излучения  $\bar{\nu}_e$  в цепочках  $\beta$ -распада громадного числа осколков деления изотопов урана и плутония в активной зоне реактора. Прецизионное изучение взаимосвязанных спектров  $\bar{\nu}_e$  и электронов в  $\beta$ -распаде играет здесь важнейшую роль. Для уточнения данных планируются новые измерения  $\beta$ -спектров смесей осколков деления  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  на исследовательских реакторах, в частности в Курчатковском институте.

Заканчивая обсуждение проблемы стерильных нейтрино, следует подчеркнуть, что однозначного вывода о существовании новых состояний нейтрино пока нет. Для проверки гипотезы об осцилляциях нейтрино в стерильное состояние готовятся поисковые эксперименты на ускорителях, атомных реакторах, а также с использованием высокоинтенсивных источников нейтрино. Здесь уместно упомянуть об обсуждаемой в литературе связи стерильных нейтрино с природой так называемой темной материи, которой называют небарионную материю, не излучающую и не поглощающую свет, но участвующую в гравитационном взаимодействии. Ее существование следует из космологических данных, а претендентами на роль темной материи могут быть, например, стерильные нейтрино или другие новые слабовзаимодействующие массивные частицы.

## Междисциплинарные исследования

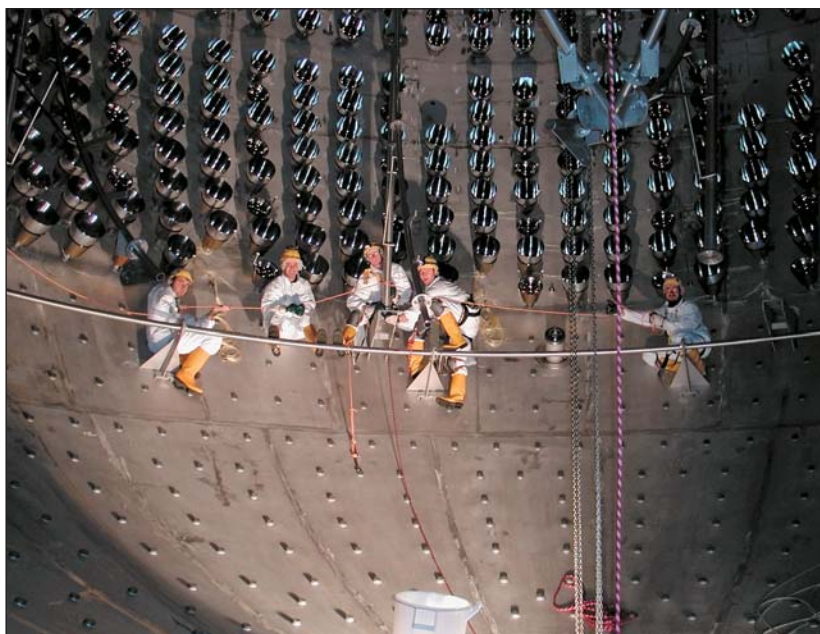
Генерация энергии Солнца происходит за счет термоядерных реакций, в результате которых водород перерабатывается в гелий. В современной Стандартной солнечной модели (ССМ) предполагается, что реализация осуществляется двумя способами — за счет последовательности процессов, начинающихся с реакции слияния ядер водорода (последовательность  $pp$ -реакций) или в результате углеродно-азотно-кислородного (CNO) цикла. ССМ предсказывает, что вклад CNO-цикла в энергетику Солнца составляет не более нескольких процентов. Проверка ССМ затруднена тем, что нам не удастся заглянуть в глубь Солнца, и ряд важных параметров (как, например, элементный состав и внутренняя температура) не известны точно. К счастью, в некоторых термоядерных процессах излучаются электронные нейтрино, которые благодаря высокой проникающей способности проходят сквозь толщу солнечного вещества и достигают Земли. Поэтому, используя данные о регистрации солнечных нейтрино, мож-



но получить информацию о самих термоядерных процессах и осуществить зондирование внутренних областей Солнца. Детектирование солнечных нейтрино имело большое значение для астрофизики как доказательство термоядерного происхождения энергии звезд.

В настоящее время исследования солнечных нейтрино проводятся в рамках крупного международного проекта Borexino [10] с участием НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, ПИЯФ, НИИЯФ МГУ. В этом эксперименте точность измеренных потоков солнечных нейтрино впервые превысила точность предсказаний (см. табл.), что позволяет проверять и корректировать параметры ССМ. Важнейшие задачи — определение вклада CNO-цикла, уточнение содержания тяжелых элементов, температуры и других характеристик Солнца на основе глобального анализа потоков солнечных нейтрино. В мире планируется создание новых мегадетекторов, которые продолжают эти исследования.

Исследования солнечных нейтрино потребовали создания крупномасштабных детекторов, которые, как оказалось, способны регистрировать нейтринное излучение и от далеких звезд. 23 февраля 1987 г. тремя нейтринными детекторами в СССР, США и Японии были зарегистрированы нейтрино от вспыхнувшей сверхновой звезды в галактике Большое Магелланово Облако. Это стало первым экспериментальным подтверждением теории звездной эволюции и ознаменовало собой рождение нового этапа развития астрофизики. Сегодня нейтринные астрофизика и астрономия находятся в начале своего



Сборка детектора Borexino.

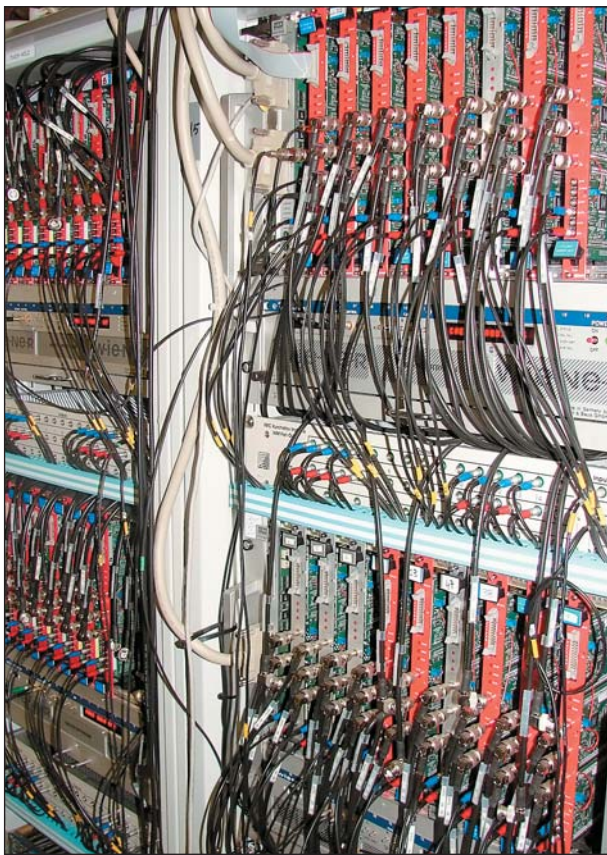
большого пути. Задачей остается исследование процессов с участием нейтрино в звездах и других космических объектах, а также изучение самих небесных тел по их нейтринному излучению. Для регистрации нейтрино от далеких неземных источников требуется создание детекторов нового поколения. В частности, подобные детекторы будут способны зарегистрировать так называемый диффузный поток нейтрино в широком диапазоне энергий, включая реликтовые нейтрино. Это постоянный во времени поток нейтрино всех типов, образованный совокупностью астрофизических источников от самых отдаленных космологических эпох.

Изучение коллапсирующих звезд базируется на организации постоянного мониторингирования нейтринного излучения, поскольку существующие детекторы способны отслеживать коллапсы

**Таблица**

**Сравнение измеренных и ожидаемых потоков солнечных нейтрино и геонейтрино**

Потоки солнечные нейтрино [нейтрино/см <sup>2</sup> · с]				
Термоядерный процесс	Предсказания моделей с разным элементным составом Солнца		Измеренное значение	Эксперимент
	$p + e^- + p \rightarrow d + \nu_e$	$1.44 \cdot 10^8 \pm 1.2\%$		
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	$5.00 \cdot 10^9 \pm 7\%$	$4.56 \cdot 10^9 \pm 7\%$	$4.87 \cdot 10^9 \pm 5\%$	Borexino
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	$5.58 \cdot 10^6 \pm 14\%$	$4.59 \cdot 10^6 \pm 14\%$	$5.20 \cdot 10^6 \pm 4\%$	SNO, SK, Borexino, KamLand
Поток геонейтрино [антинейтрино/см <sup>2</sup> · с]				
Распады с эмиссией антинейтрино		Предсказания разных моделей	Измеренное значение	Эксперимент
${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb} + 8{}^4\text{He} + 6e^- + 6\bar{\nu}_e$		$\sim(2-6) \cdot 10^6$	$(4.4 \pm 0.9) \cdot 10^6$	Borexino, KamLand
${}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{208}\text{Pb} + 6{}^4\text{He} + 4e^- + 4\bar{\nu}_e$				



Курчатовский электронный комплекс для связи с детектором Borexino.

только в нашей Галактике, а их ожидаемая частота — порядка одного события в 30–50 лет. Поэтому так важно организовать дистанционные центры управления, позволяющие осуществлять сбор, накопление и анализ данных не только в месте расположения детектора, но и в удаленных научных лабораториях. В качестве примера отметим, что такой удаленный центр был создан на площадке НИЦ «Курчатовский институт» для постоянной связи с детектирующим комплексом Borexino в подземной лаборатории Гран-Сассо в Италии. Возможности такого центра не ограничиваются только исследовательской работой, но позволяют также проводить подготовку специалистов в режиме реального участия в эксперименте.

Развитие техники детектирования нейтринного излучения представляет большой интерес и для геофизики [12]. Наши знания, модели и гипотезы о структуре и формировании нашей планеты очень ограничены и базируются лишь на данных геологического изучения земной коры, сейсмических исследований и лабораторных экспериментов, изучающих строение и поведение вещества при высоких давлениях и температурах. Существенная роль отводится вопросу о природе тепла внутри Земли. Одним из источ-

ников нагрева планеты могут быть содержащиеся в породах нестабильные изотопы, которые претерпевают превращения в результате  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов с выделением энергии. Предполагается, что полная тепловая мощность Земли составляет около 44 ТВт. Какая часть этой величины имеет радиогенную природу? Основной вклад в разогрев Земли сегодня вносят ядра  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  — благодаря большим временам полураспада, исчисляющимся миллиардами лет. Уран и торий претерпевают цепочки превращений, в ходе которых излучаются электронные антинейтрино (их принято называть геонейтрино). В последние годы геонейтрино удалось зарегистрировать в экспериментах KamLAND и Borexino, хотя точность еще очень невелика (см. табл.). Из этих данных было оценено, что приблизительно половина тепла Земли имеет радиогенную природу. Уточнение информации о радиогенных элементах будет иметь первостепенное значение для определения энергетического баланса, который, в свою очередь, послужит ключом к пониманию образования и эволюции Земли. В частности, особый интерес представляет распределение тепла в мантии, так как этот фактор определяет конвективные движения, связанные с вулканической деятельностью и перемещениями тектонических плит.

Следует обратить внимание еще на одну геофизическую гипотезу о возможности существования природного атомного реактора мощностью до 30 ТВт в центре Земли. Такой геореактор может генерировать энергию для поддержания механизма геодинамо, ответственного за магнитное поле Земли. Но, как и в случае реакторов на обычных АЭС, геореактор должен быть источником антинейтрино. Поиск таких антинейтрино дал отрицательный результат, а анализ данных эксперимента Borexino показал, что если геореактор и существует, то его мощность не более 4.5 ТВт.

В будущем ожидается ввод в действие новых детекторов геонейтрино: в Канаде, в Финляндии, в США. В России Г.В.Домогацкий и Л.А.Микаэлян с сотрудниками предложили создать детектор геонейтрино в Баксанской нейтринной обсерватории РАН. Анализ показал, что расположение детектора на Баксане, вдали от действующих АЭС, имеет ряд преимуществ. Организация сети крупномасштабных установок, которые будут проводить измерения в различных точках мира, значительно расширит наши знания о прошлом, настоящем и будущем нашей планеты.

## Вопросы приложений

Фундаментальные исследования в области физики нейтрино имеют высокий инновационный потенциал. Первое предложение практического использования реакторных антинейтрино для кон-



троля атомных реакторов, разработанное в Курчатовском институте [13], уже находится на первоначальной стадии внедрения (см. ниже). К настоящему времени выдвинуто немало новых предложений практического использования нейтринного излучения, среди которых: разработка новых средств коммуникаций, использование пучков нейтрино в геологии для поисков минерального сырья, разработка осцилляционной и абсорбционной томографии Земли и др. Технология нейтринной связи уже проходит экспериментальное обоснование. Количество предложений растет. Практическая реализация таких проектов, конечно, кажется пока чрезвычайно сложной задачей. Однако стоит вспомнить, что в 30-х годах прошлого века неосуществимой казалась регистрация самих нейтрино. Решение некоторых задач может быть неожиданным, как это было с историей доказательства ненулевой массы нейтрино. Решение пришло не из прямых кинематических измерений, а из открытия «не вписывающегося» в Стандартную модель процесса нейтринных осцилляций.

Завершая этот обзор, хотелось бы подчеркнуть традицию Курчатовского института использовать результаты фундаментальных исследований на практике. Что может дать физика нейтрино для развития атомной отрасли уже сегодня? Нарращивание мирового производства атомной энергии тесно связано с проблемами нераспространения, так как реакторы потенциально могут использоваться для производства оружейного плутония. Уже сегодня проблемы доверия возникают в связи с развитием атомной энергетики ряда стран (Ирана, Северной Кореи, Индии, Пакистана, Израиля). По мнению специалистов МАГАТЭ, разработка действенного контроля, который исключал бы тайное производство плутония, весьма актуальна.



Л.А.Микаэлян.

Не раз упоминавшийся в статье Лев Александрович Микаэлян, к несчастью, ушедший из жизни в этом году, еще в 70-х годах предложил внедрить принципиально новый подход, который основан на регистрации реакторных антинейтрино. Так можно обеспечить независимый от персонала реактора дистанционный контроль, не поддающийся фальсификации. Научные основы нового метода были разработаны специалистами Курчатовского института в эксперименте на Ровенской АЭС и получили признание МАГАТЭ и ведущих мировых научных центров. Сегодня работы по нейтринному контролю, ставящие целью обеспечить безопасную эксплуатацию атомных реакторов и гарантии нераспространения ядерных материалов, широко востребованы и развиваются не только в России, но также в США, Франции, Японии и других странах. ■

## Литература

1. Герштейн С.С. Нобелевские премии, которые не получил Понтекорво // Природа. 2013. №11. С.78—87.
2. Райнес Ф. Нейтрино: от полтергейста к частице: Нобелевская лекция. Стокгольм. 1995 г. // УФН. 1996. Т.166. №12. С.1352—1359.
3. Высоцкий М.И. К открытию бозона Хиггса // Природа. 2013. №1. С.4—10.
4. Герштейн С.С. От бета-сил к универсальному взаимодействию // Природа 2010. №1. С.3—14.
5. Понтекорво Б.М. Страницы развития нейтринной физики // УФН. 1983. Т.141. №4. С.675—709.
6. Барабаш А.С. Двойной бета-распад: события и люди // Природа. 2011. №8. С.3—13.
7. Кобаяси М. CP-нарушение и смешивание ароматов // УФН. 2009. Т.179. С.1312.
8. Комар А.А. Регистрация нарушения CP-четности в распадах  $B^0$ -мезонов // Природа. 2002. №11. С.11—17.
9. Куденко Ю.Г. Нейтринная физика: год угла смешивания  $\theta_{13}$  // Природа. №11. 2012. С.3—13.
10. Скорохватов М.Д. Солнечные нейтрино и международный проект «Борексико» // Природа. 2009. №5. С.13—24.
11. Микаэлян Л.А. Нейтринная лаборатория на Ровенской АЭС // Природа. 1983. №9. С.43—45.
12. Скорохватов М.Д. Нейтринная геофизика — первые шаги // Природа. 2012. №3. С.13—17.
13. Беляев С.Т., Микаэлян Л.А. Нейтрино из реактора // Наука и человечество. М., 1990. С.185.