

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт ядерных исследований  
Российской академии наук (ИЯИ РАН)

На правах рукописи

СИНЁВ Валерий Витальевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО В  
РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований российской Академии наук (ИЯИ РАН) и РНЦ «Курчатовский институт»

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук

А. С. Барабаш (ИГЭФ)

доктор физико-математических наук

А. И. Студеникин (МГУ)

доктор физико-математических наук

В. А. Рябов (ФИАН)

**Ведущая организация** – Объединенный институт ядерных исследований, ЛЯП, г. Дубна.

Защита состоится "20" июня 2014 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 в ИЯИ РАН по адресу: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия октября, 7а, тел. 499-135-7760.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН

Автореферат разослан "   " \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.119.01  
кандидат физико-математических наук

Б. А. Тулупов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

Проблема нейтринных осцилляций является актуальной на протяжении нескольких десятилетий. Наблюдение осцилляций косвенно указывает на наличие ненулевой массы покоя нейтрино. Впервые эффект нейтринных осцилляций был замечен в потоке солнечных нейтрино в виде нехватки наблюдаемого количества нейтрино по сравнению с предсказываемым Стандартной солнечной моделью (ССМ). Тогда осцилляции рассматривались, как одна из гипотез. Позднее эксперимент KamLAND подтвердил существование осцилляций электронных нейтрино, измеряя спектр реакторных антинейтрино на таком расстоянии от ядерного реактора, на котором должны проявляться осцилляции с теми параметрами, которые следовали из экспериментов с солнечными нейтрино. Одновременно эксперимент SNO показал соответствие потока нейтрино от Солнца предсказываемому по ССМ в нейтральном канале и нехватку нейтрино в заряженном, что подтвердило гипотезу об осцилляции солнечных нейтрино. Наряду с этим были экспериментально получены доказательства осцилляций мюонных нейтрино в таонные. Сначала в потоке атмосферных нейтрино (детектор Super Kamikande), затем в потоках мюонных нейтрино от ускорителя (эксперименты MINOS, K2K, T2K). Оставался необнаруженным канал осцилляций электронных нейтрино в таонные. Обнаружение осцилляций в последнем осцилляционном канале позволит получить полную матрицу смешивания активных типов нейтрино и подтвердить, таким образом, феноменологическую теорию осцилляций. В настоящей работе рассматривается первый результат измерения угла смешивания  $\theta_{13}$  в коллаборации Double Chooz, который был подтвержден измерением с высокой точностью в эксперименте Daya Bay и в третьем эксперименте RENO.

Наряду с осцилляциями трех активных типов нейтрино рассматривается вероятность осцилляций активных типов нейтрино в стерильное состояние. Имеются косвенные указание на это из экспериментов с различными источниками нейтрино. В данной работе рассматриваются эксперименты по поиску стерильных нейтрино. Один из экспериментов по поиску таких осцилляций использует новый тип детектора, который может позволить с высокой достоверностью обнаружить переходы в стерильное состояние.

Наряду с изучением свойств нейтрино и антинейтрино в экспериментах актуальным является создание метрологической базы для проведения надежного анализа полученных данных. Особенно это касается экспериментов с реакторными антинейтрино. По мере совершенствования приборов для регистрации нейтрино требуется большая точность в знании констант, посредством которых производится моделирование эксперимента, расчета искомых эффектов. Так для экспериментов с реакторными антинейтрино на сегодня самым слабым звеном в таких расчетах являются спектры основных делящихся в реакторе изотопов.

Уникальные свойства нейтрино делают его незаменимым при исследованиях явлений недоступных другим методам исследования (оптические, радиоволновые, рентгеновские и пр.). Нейтрино обладает столь малым сечением взаимодействия, что проходит через любые толщии вещества. Очень перспективным представляется использовать нейтринные детекторы для исследования внутренних слоев Земли. Нейтрино, производимые радиоактивными изотопами, находящимися в недрах Земли могут быть зарегистрированы детектором, расположенным на поверхности. Таким образом, можно определить количество радиоак-

тивных элементов в Земле и сопоставить производимое ими тепло с полным тепловым потоком Земли. Опыт первых экспериментов (KamLAND и BOREXINO), уже зарегистрировавших нейтринное излучение Земли показывает, что для определения точного потока геонейтрино требуется сцинтилляционный детектор с массой мишени не менее 10 кт. Такого же типа детекторы могут регистрировать и нейтринные вспышки при коллапсах ядер массивных звезд и обнаружить реликтовое нейтринное излучение, накопившееся за всю историю существования Вселенной. При регистрации вспышки сверхновой на расстоянии до 10 кпс детектором с массой более 10 кт статистическая точность позволит провести анализ антинейтринного спектра от сверхновой и по его форме определить иерархию нейтринных масс.

### **Цель работы.**

1. Обнаружение ранее не наблюдавшегося угла смешивания нейтрино  $\theta_{13}$  в эксперименте с антинейтрино от ядерного реактора. Учитывая, что массовый параметр  $\Delta m^2_{13}$ , примерно равен  $\Delta m^2_{23}$ , то максимальный эффект осцилляций должен проявляться на расстояниях 1-2 км от ядерного реактора, учитывая энергетический спектр реакторных нейтрино. Измерение последнего элемента матрицы смешивания стало возможным после предложенного автором нового метода проведения эксперимента с использованием двух идентичных детекторов, расположенных на разных расстояниях от ядерного реактора. Был представлен проект эксперимента, который должен был десятикратно увеличить чувствительность к амплитуде осцилляций. Предполагалось, что искомый параметр осцилляций может быть менее 0.03, что предъявляет соответствующие требования к чувствительности.

2. Поиск осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние. Разработка методов, позволяющих анализировать совместно данные разнородных экспериментов. Анализ ранее сделанных измерений спектров антинейтрино от реактора разными группами исследователей.

3. Улучшение метрологической базы реакторных экспериментов. Разработка метода получения спектров антинейтрино парциальных делящихся изотопов из экспериментально измеренного спектра антинейтрино. Метод применяется к спектру антинейтрино, измеренного для стандартного состава топлива реактора на ровенской АЭС в 1988-1990.

4. Разработка научного обоснования для постройки большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН для измерения природных нейтринных потоков.

### **Научная новизна и практическая ценность работы.**

Предложен новый метод проведения эксперимента с реакторными нейтрино с использованием двух идентичных детекторов, расположенных на разных расстояниях от реактора.

Впервые обнаружены осцилляции антинейтрино в канале, не наблюдавшемся ранее. Эффект осцилляций был обнаружен на предсказанном расстоянии от источника антинейтрино. Такое же значение величины угла смешивания  $\theta_{13}$  было получено в сходных реакторных экспериментах Daya Bay и RENO.

Предложен оригинальный метод анализа реакторных экспериментов, выполненных ранее в разных странах по поиску нейтринных осцилляций на близких расстояниях. Метод основывается на анализе отношений энергетических спектров, изме-

ренных на разных расстояниях вместо анализа абсолютных спектров.

Совместный анализ отношений спектров антинейтрино, полученных в экспериментах на разных расстояниях от реактора, выявил области возможных параметров осцилляций, которые перекрывается с областями, следующими из экспериментов с не реакторными нейтрино.

При анализе данных экспериментов с реакторными антинейтрино требуется точное знание энергии, выделяемой при делении основных делящихся изотопов. Получены новые значения энергий деления для четырех изотопов:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ . Удалось вдвое улучшить точность значений энергий деления. В настоящее время эти значения используются как эталонные во всех реакторных экспериментах.

Предложен метод выделения спектров антинейтрино отдельных изотопов из экспериментального спектра антинейтрино. Впервые получен спектр  $^{238}\text{U}$ , который ранее получался только расчетным путем.

Предложен проект сцинтилляционного детектора с большой массой мишени (больше 10 кт) для регистрации нейтринных и антинейтринных потоков природного происхождения. Проведены расчеты спектров антинейтрино, которые могут регистрироваться таким детектором. Показана возможность создания такого детектора на базе Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

### **На защиту выносятся следующие научные результаты:**

1. Метод использования двух идентичных детекторов для проведения экспериментов в потоке реакторных антинейтрино. Он позволяет избавиться от систематической ошибки, связанной с реакторными спектрами и параметрами детектора.

2. Экспериментальное измерение последнего угла смешивания нейтрино из матрицы Маки-Накагавы-Сакааты-Понтекорво  $\theta_{13}$  при осцилляциях реакторных электронных антинейтрино в таонные минуя мюонное состояние.

3. Предлагается метод анализа разнородных экспериментов на основе отношений спектров, не зависящий от функции отклика детектора.

4. Исследование реакторных экспериментов на предмет существования стерильных нейтрино. Обнаружен новый массовый параметр, который может быть индикатором осцилляций в это состояние  $\Delta m_{14}^2 = 0.9 \text{ эВ}^2$  при амплитуде  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.04-0.05$ .

5. Предлагается метод разделения экспериментального спектра антинейтрино на компоненты. За основу взяты результаты из полученные в ровенском эксперименте при стандартном составе топлива активной зоны ядерного реактора. Компоненты спектра происходят от четырех основных делящихся изотопов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ).

6. Результаты экспериментального измерения спектра  $^{238}\text{U}$  на базе экспериментов в Ровно.

7. Научное обоснование использование большого сцинтилляционного детектора для регистрации природных нейтринных потоков. Расчеты эффекта в детекторе от различных природных потоков, которые показывают, что необходимая статистика от геонейтрино может быть набрана детектором с мишенью 5-10 кт за 10 лет измерений. При этом вспышка сверхновой в центре нашей Галактики будет уверенно зарегистрирована со статистикой в несколько тысяч событий.

### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались автором на научных семинарах Курчатовского Института, Дубны и ИЯИ РАН; на международной школе по физике слабых взаимодействий при низ-



ких энергиях в 1990 г. (LEWI-90); на Международной конференции в Японии (Conference on Neutrino Science, Сендаи, Япония) 2002; Международных конференциях NANP (1999-2005, Дубна); Международной конференции Neutrino Geoscience 2010 (Италия); рабочих совещаниях Коллаборации Double Chooz.

### Личный вклад

1. В соавторстве с Л.А. Микаэляном предложен метод использования двух идентичных детекторов для проведения экспериментов в потоке реакторных антинейтрино. Метод позволяет избавиться от систематической ошибки, связанной с реакторными спектрами и параметрами детектора.

2. Автор принимал участие в подготовке эксперимента в Красноярске, организовывал международное рабочее совещание в Красноярске. Идея этого проекта была перенесена в реализованный эксперимент Double Chooz во Франции.

3. При личном участии автора проводилась подготовка эксперимента Double Chooz. Автором принимал активное участие на всех стадиях подготовки эксперимента: предварительные расчеты эффектов, участие в заливке детектора жидким сцинтиллятором, участие в проведении измерений, предварительный анализ измеренного спектра.

3. Автором был разработан метод анализа разнородных экспериментов на основе отношений спектров, не зависящий от функции отклика детектора. Метод позволяет проводить анализ разнородных экспериментов на реакторах.

4. Автор лично проводил анализ реакторных экспериментов, в котором получено указание на возможное существование четвертого типа нейтрино (возможно стерильного). Массовый параметр осцилляций в это состояние  $\Delta m_{14}^2 = 0.9 \text{ эВ}^2$  при амплитуде  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.04-0.05$ .

5. Автором предложен метод разделения экспериментального спектра антинейтрино, измеренного в ровенском эксперименте

при стандартном составе топлива активной зоны ядерного реактора на составляющие его компоненты от четырех основных делящихся изотопов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ).

6. Впервые автором получен из экспериментально измеренного спектра антинейтрино от ядерного реактора в Ровно спектр антинейтрино, испускаемый  $^{238}\text{U}$ , который ранее учитывался только расчетным путем.

7. Автором проведены расчеты эффекта от различных природных потоков и показано, что использование большого сцинтилляционного детектора с массой более 10 кт позволит измерить часть из них с большой точностью: поток и спектр геонейтрино, спектр от сверхновой на расстоянии до 10 кпс.

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в 32 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она содержит 160 страниц текста, 65 рисунков, 18 таблиц и список цитируемой литературы из 145 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

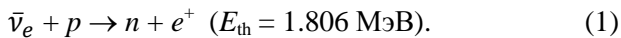
Во **Введении** описывается история открытия нейтринных осцилляций. Рассматриваются предпосылки проведения новых экспериментов на ядерных реакторах. Обосновывается актуальность задачи по измерению последнего угла смешивания нейтрино и завершению исследования матрицы Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты. Изложены цели и методы исследований, представлены положения, выносимые на защиту.

## Глава I. ПОИСКИ И ОТКРЫТИЕ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

*В первой главе рассматриваются эксперименты с солнечными, атмосферными и реакторными нейтрино, в которых были открыты нейтринные осцилляции.*

В конце двадцатого века были проведены два радиохимических эксперимента с солнечными нейтрино: хлор-аргоновый и галлий-германиевый. Результат оказался существенно меньше, предсказываемого стандартной солнечной моделью. В результате возродилась гипотеза осцилляций нейтрино, предложенная Б. Понтекорво.

Нехватка солнечных нейтрино стимулировала поиски нейтринных осцилляций на ядерных реакторах. Было несколько сообщений об обнаружении осцилляций, но позднее они были опровергнуты другими реакторными экспериментами. Во всех реакторных экспериментах используется реакция обратного бета распада на протоне для регистрации нейтринного потока.



На близких расстояниях (до 1 км) осцилляции не были обнаружены. Этот результат показан на рис. 1.

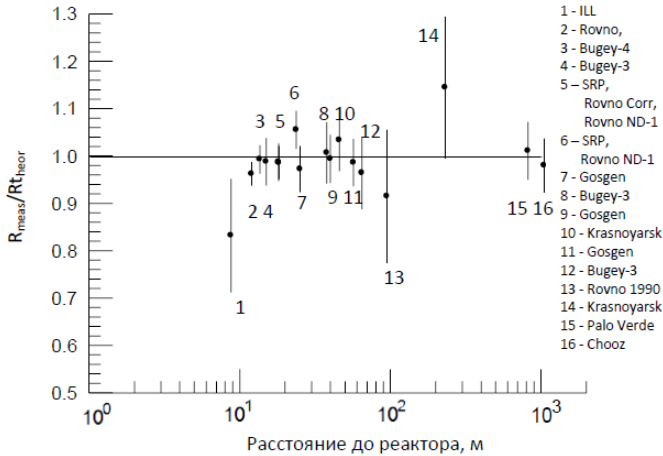


Рис. 1. Отношение эффектов измеренного и ожидаемого в реакторных экспериментах на близких расстояниях.

В специальном реакторном эксперименте KamLAND были обнаружены осцилляции, которые соответствовали по параметрам солнечным нейтрино. При энергиях реакторных нейтрино они должны были эффективно проявляться расстоянии 160-180 км от реактора. Эксперимент был проведен в Японии и обнаружил предсказанные осцилляции.

Таким образом, были подтверждены осцилляции солнечных нейтрино в независимом эксперименте. По данным эксперимента KamLAND параметры осцилляций:

$$\Delta m^2 = 7.58_{-0.13}^{+0.14} \text{ (stat.) } {}_{-0.15}^{+0.15} \text{ (syst.) } \times 10^{-5} \text{ эВ}^2.,$$

$$\text{tg}^2\theta = 0.56_{-0.07}^{+0.10} \text{ (stat.) } {}_{-0.06}^{+0.10} \text{ (syst.)}.$$

Параллельно с солнечными и реакторными экспериментами проводились эксперименты с атмосферными нейтрино. Первый

детектор, обнаруживший аномалию в потоках атмосферных нейтрино, был черенковский детектор KamiokanDE. Первоначально этот детектор был построен с целью поисков распада протона, но он регистрировал и нейтрино из атмосферы, рождаемые там за счет взаимодействия космических лучей с ядрами газов, образующих атмосферу Земли. Производимые в атмосфере нейтрино состоят из двух типов: мюонных и электронных, причем на каждое электронное нейтрино приходится два мюонных (нейтрино и антинейтрино).

Однако в эксперименте детектора KamiokanDE обнаружилась аномалия в числе мюонных нейтрино.

Для более точных измерений был построен новый детектор с массой мишени 50 тысяч тонн воды и назван Super-Kamiokande. Этот эксперимент подтвердил данные Kamiokande и получил доказательства осцилляций атмосферных нейтрино. Массовой параметр осцилляций атмосферных нейтрино оказались другими, чем у солнечных нейтрино. Это потребовало введение третьего типа нейтрино – таонного.

Для проверки результатов Super-Kamiokande были проведены эксперименты на ускорителях, которые полностью подтвердили данные об осцилляциях атмосферных нейтрино. Полученные массовые параметры осцилляций почти в 30 раз превосходят данные, следующие из солнечных экспериментов.

По результатам всех экспериментов с мюонными нейтрино на исчезновение (Super-Kamiokande, K2K, MINOS и T2K) Particle Data Group в 2012 году сообщает следующие параметры для осцилляций мюонных нейтрино в таонные:  $\sin^2 2\theta_{23} > 0.95$  (90 % C.L.),  $\Delta m_{23}^2 = (2.32_{-0.08}^{+0.12}) 10^{-3} \text{ эВ}^2$ .

## **Глава II. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО**

*Вторая глава посвящена феноменологии нейтринных осцилляций. Обсуждается матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты. До 2012 г. еще не была известна величина угла смешивания  $\theta_{13}$ . Приводятся данные эксперимента SNO, подтвердившего осцилляции в спектре борных нейтрино от Солнца и измерившего полный поток борных нейтрино.*

На основании экспериментов с нейтрино, обнаруживших осцилляции была построена феноменологическая теория, описывающая осцилляции нейтрино, то есть переходы одного типа в другой и обратно. В основе теории лежит утверждение, что нейтрино, рождаемое в слабых процессах, представляет собой суперпозицию трех состояний с определенной массой, которые являются решениями уравнения Дирака. Переходы одного типа в другой определяются матрицей смешивания, которая носит имя Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты.

Однако для потока солнечных нейтрино такого описания оказалось недостаточно, поэтому был предложен усовершенствованный механизм осцилляций с учетом вещества, в котором происходит распространение нейтринного пучка. Этот механизм основан на резонансном усилении эффекта осцилляций.

Феноменологическая теория нашла замечательное подтверждение в эксперименте SNO с солнечными нейтрино. В этом эксперименте был измерен спектр борных нейтрино и показано, что полное количество нейтрино соответствует Стандартной солнечной модели. В эксперименте использовались тяжелая воды в качестве мишени массой 1000 т для исследования взаимодействия нейтрино с дейтроном в нейтральном и заряженном каналах.

### Глава III. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОИСКУ УГЛА СМЕШИВАНИЯ $\theta_{13}$ НА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ.

#### ОТКРЫТИЕ УГЛА СМЕШИВАНИЯ $\theta_{13}$

Обсуждаются проекты и эксперименты по измерению угла смешивания  $\theta_{13}$ , который до настоящего времени считался нулевым или очень малым. Приводятся результаты измерения  $\theta_{13}$  коллаборацией *Double Chooz*.

В начале XXI века стартовали сразу три реакторных эксперимента по измерению угла смешивания  $\theta_{13}$ . Они все используют относительный метод измерения, который позволяет многократно подавить систематическую погрешность. Впервые такая постановка эксперимента была предложена в [1], где было отмечено, что использование идентичных детекторов позволяет избавиться от систематической погрешности, а статистическая может быть сделана сколь угодно малой.

Первый проект эксперимента по измерению угла смешивания  $\theta_{13}$  был предложен в нашей стране для реализации на Красноярском промышленном ядерном реакторе [2, 3]. Проект расположения идентичных детекторов показан на рис. 2.

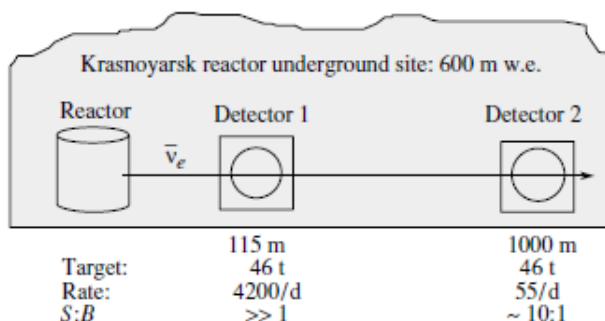


Рис. 2. Схема эксперимента с двумя идентичными детекторами на примере предлагаемого проекта в Красноярске.

Было показано, что отношение спектров антинейтрино зависит только от параметров осцилляций и, в случае расположения ближнего детектора в месте, где осцилляции еще не работают, может быть просто равно вероятности осцилляций.

$$\frac{s_f}{s_n} = C \frac{(1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \Delta f)}{(1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \Delta n)}, \quad (2)$$

где  $\Delta_f = (1.267 \cdot \Delta m_{atm}^2 \cdot L_f / E)$  и  $\Delta_n = (1.267 \cdot \Delta m_{atm}^2 \cdot L_n / E)$ .

На рис. 3 показана чувствительность предлагаемого эксперимента.

По ряду причин, одной из которых оказалось закрытие реактора, этот проект был остановлен.

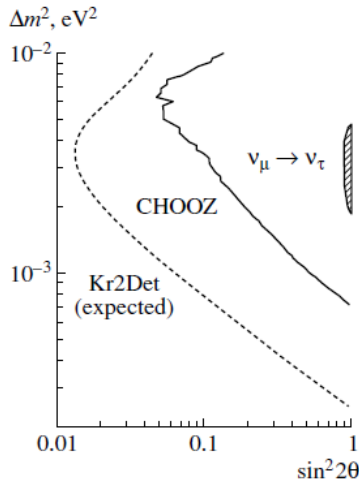


Рис. 3. Ожидаемые ограничения эксперимента Kr2Det на параметры осцилляций. Показана чувствительность детектора по сравнению с ограничением эксперимента CHOOZ [M. Apollonio et al. Phys. Lett., B420, 397, 1998]. Показана также область параметров атмосферных нейтрино.



Реализация проекта по измерению  $\theta_{13}$  началась в эксперименте Double Chooz [4]. В нем впервые было показано, что значение угла  $\theta_{13}$  ненулевое [5-9].

В коллаборации Double Chooz измерения пока ведутся с одним детектором на дальнем расстоянии (1 км). Ближний детектор, как ожидается, вступит в строй в 2014 году.

Схема детектора показана на рис. 4, в его основе лежит четырех-зонная геометрия. Первая внутренняя зона представляет из себя мишень для нейтрино. Она состоит из жидкого сцинтиллятора с добавкой Gd (8.5 т) для более быстрого захвата нейтронов реакции (1) и уменьшения фонов. Мишень окружена детектором из жидкого сцинтиллятора без Gd. Он предназначен для увеличения эффективности регистрации гамма-квантов, выходящих из мишени наружу. Корпуса мишени и поглотителя гамма-квантов прозрачные.

Далее следует зона буфера для защиты центральных детекторов от внешних гамма-квантов. Эта зона содержит чистое минеральное масло и служит также световодом. На корпусе буфера закреплены фотоумножители, просматривающие мишень и гамма-поглотитель. Снаружи находится зона, также заполненная сцинтиллятором, служащая детектором антисовпадений от космических мюонов. Весь детектор расположен в стальном корпусе толщиной 17 см.

Хорошая защита позволила измерить с большой точностью различные фоны детектора [7]. Их различают три типа: фон случайных совпадений, фон быстрых нейтронов и остановившихся мюонов и фон от радиоактивных изотопов космогенного происхождения ( $^8\text{He}$  /  $^9\text{Li}$ ). Кроме того имеется световой фон от делителей напряжения ФЭУ, который подавляется анализом формы импульса при анализе.

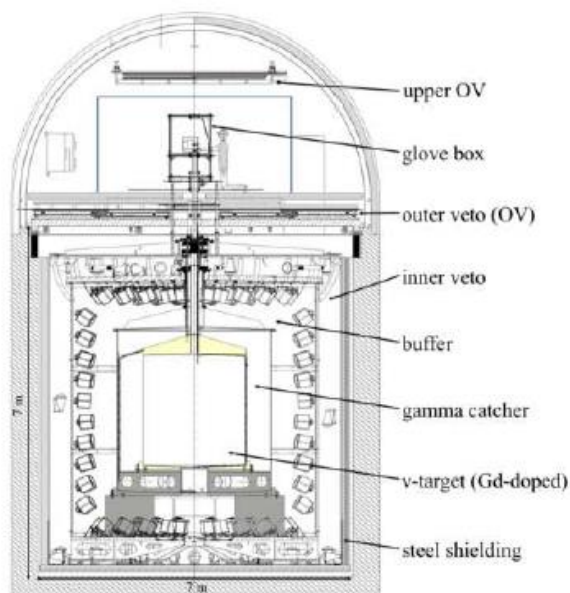


Рис. 4. Схема детектора Double Chooz.

На рис. 5 показаны эти фоны, полученные за время измерения, когда оба реактора станции не работали.

За время измерения была набрана статистика около 9000 событий при работе в стандартном режиме, то есть при регистрации нейтрона только по захвату на Gd. При этом в качестве мишени используется только объем мишени. Данные измерения за год приведены в табл. 1.

В то же время был сделан анализ событий во всем детекторе, включая поглотитель гамма-квантов (Gamma-catcher), при этом использовались данные только по поглощению нейтрона только водородом. Таким образом, чувствительный объем был увеличен втрое [9]. Результат анализа оказался таким же, как и при анализе событий с поглощением нейтрона гадолинием.

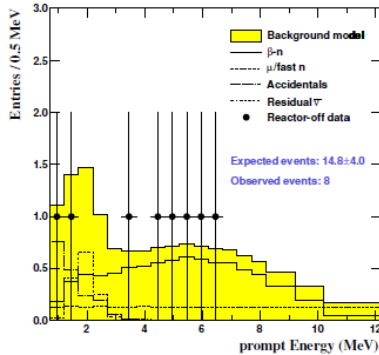


Рис. 5. Суммарный спектр фонов, измеренный детектором Double Chooz во время остановки двух реакторов. Черные точки – экспериментальные данные, Желтая область – модельный спектр всех фонов: сплошной линией показан спектр  $^8\text{He} / ^9\text{Li}$ , мелкая штриховая линия – быстрые нейтроны от мюонов, крупная штриховая – случайный фон, пунктир – остаточное антинейтринное излучение реактора.

Таблица 1. Данные измерений и предсказания сигналов и фонов за время измерений.

	Оба реактора ON	Один из реак- торов $P_{th} <$ 20%	Всего
Время (дни)	139.27	88.66	227.93
События ОБР	6088	2161	8249
Реактор В1	2910.9	774.6	3685.5
Реактор В2	3422.4	1331.7	4754.1
Космогенный фон	174.1	110.8	284.9
Коррелированный фон	93.3	59.4	152.7
Случайный фон	36.4	23.1	59.5
Суммарно	6637.1	2299.7	8936.8

При анализе событий использовались следующие критерии отбора:

1. Время между первым и вторым импульсами  $\Delta T = t_{\text{neutron}} - t_{\text{positron}}$  должно находиться в интервале времен 2 – 100 мкс.

2. Амплитуда первого события должна лежать в интервале энергий 0.7 – 12.2 МэВ.

3. Амплитуда второго события должна лежать в интервале энергий 6.0 – 12.0 МэВ.

4. Кратность второго события должна быть равна одному. После первого события не должно быть событий в интервале времен 100 – 400 мкс.

На рис. 6 показан спектр позитронов, измеренный в Double Chooz вместе с предсказанным спектром.

В 2012 г. в коллаборации Double Chooz получено следующее значение этого параметра:  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.03$  (стат.)  $\pm 0.025$  (сист.) [6]. При анализе данных по поглощению нейтрона на водороде результат оказался  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.097 \pm 0.034$  (стат.)  $\pm 0.034$  (сист.) [9]. Большие или сравнимые ошибки в результате этого анализа, несмотря на большую статистику, объясняются увеличением фонов и уменьшением эффективности регистрации.

Следующий реализованный эксперимент по измерению угла смешивания  $\theta_{13}$  был проведен в Китае вблизи атомной станции Daya Bay и получил такое же название. Недалеко также расположена еще одна станция Ling Ao. Место проведения этого эксперимента находится на юго-востоке Китая, недалеко от Гонконга.

Вместо одного детектора в этой коллаборации было решено использовать комбинированные детекторы. Несколько детекторов устанавливаются в один бассейн с водой для защиты от внешнего гамма и нейтронного излучения. Всего использова-

лось 6 детекторов: три в качестве комбинированного дальнего, два вблизи атомной станции Daya Bay и один вблизи станции Ling Ao. Масса мишени каждого детектора в два раза больше, чем в Double Chooz и составляет 20 т.

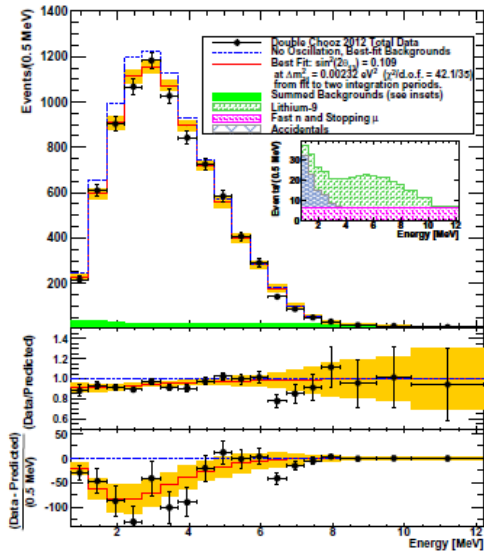


Рис. 6. Спектр позитронов, измеренный в дальнем детекторе Double Chooz (черные точки). Голубым цветом показан ожидаемый спектр в отсутствие осцилляций, красная линия наилучшее описание спектра при найденных параметрах осцилляций. На вкладке показаны фоны детектора. На верхней панели снизу – отношение измеренного спектра и предсказанного. Ниже – абсолютная разница между измеренным и предсказанным спектрами.

В эксперименте Daya Bay было получено самое точное значение угла смешивания из реакторных экспериментов  $\theta_{13}$ .  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010$  (стат.)  $\pm 0.005$  (сист.).

Еще один эксперимент, подтвердивший своими измерениями результаты Daya Bay и Double Chooz, стал эксперимент RENO, выполненный в южной Корее. Он расположен на расстоянии 250 км на юго-запад от Сеула.

Детектор используется той же конструкции, что и в Double Chooz и Daya Bay, но масса мишени 16 т. Всего два детектора установлены на расстояниях 294 м и 1380 м от оси, вдоль которой выстроены шесть реакторов станции с суммарной мощностью 16.4 ГВт.

После года измерений были получены спектры позитронов реакции ОБР (1). Как и ожидалось, макушка спектра на дальнем расстоянии оказалась «выеденной» по сравнению со спектром на ближнем расстоянии.

Отношение интегралов спектров дало значение  $R = 0.920 \pm 0.009$  (stat.)  $\pm 0.014$  (syst.).

Анализ пока был сделан только для интенсивностей антинейтринного потока. Форма спектра в расчет не принималась. Однако было получено значение угла смешивания нейтрино такое же как и в экспериментах Double Chooz и Daya Bay –  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.113 \pm 0.013$  (stat.)  $\pm 0.019$  (syst.) при  $\Delta m^2 = 2.32 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ .

Гипотеза отсутствия осцилляций отвергается на уровне 4.9 стандартных отклонения.

В обзоре Particle Data Group за 2012 г. Приведено усредненное значение по трем экспериментам  $0.098 \pm 0.013$ .

## **Глава IV. ПОИСКИ СТЕРИЛЬНЫХ НЕЙТРИНО**

*В четвертой главе обсуждаются проблемы поиска стерильных нейтрино. Рассматриваются эксперименты, наблюдающие аномалии при регистрации нейтрино. Аномалии могут трактоваться, как наблюдение нового осцилляционного канала.*

В потоках солнечных нейтрино и атмосферных нейтрино найдены параметры осцилляций, отличающиеся по массовому параметру более чем 30 раз. Это дало основания утверждать, что число типов нейтрино не менее трех. Обнаружение дополнительных массовых параметров приведет к увеличению числа типов нейтрино.

За время экспериментов с нейтрино накопилось уже много данных, которые трудно объяснить наличием только трех активных нейтрино. Имеются указания на возможное существование четвертого типа нейтрино (а возможно и более). Эти новые типы нейтрино характеризуются тем, что они не взаимодействуют с веществом вообще (или гораздо слабее активных типов), что дало повод называть их стерильными.

Первым свидетельством существования аномально большого массового параметра стал ускорительный эксперимент LSND, в котором обнаружилось неестественно большое количество электронных нейтрино в потоке мюонных, которое не объяснялось существующими фонами. Эксперимент MiniBOONE подтвердил этот результат. В работах [10, 11] предлагалось проверить результаты эксперимента LSND в эксперименте на реакторе, используя идею с двумя идентичными детекторами.

Следующим свидетельством стал факт нехватки нейтрино при калибровке детекторов солнечных нейтрино SAGE и GALLEX/GNO. Результат первой калибровки в обоих детекторах с точностью в 10% совпадал с ожидаемым значением, но

вторая калибровка неожиданно дала значение 0.8 для отношения числа измеренных событий от источника к рассчитанным событиям. Попытка описать это осцилляциями дала массовый параметр, близкий к результатам LSND и MiniBOONE.

Третье свидетельство приходит из экспериментов с реакторными нейтрино. При анализе спектров позитронов, полученных на разных расстояниях от реактора, появились области параметров, сходные с LSND и MiniBOONE.

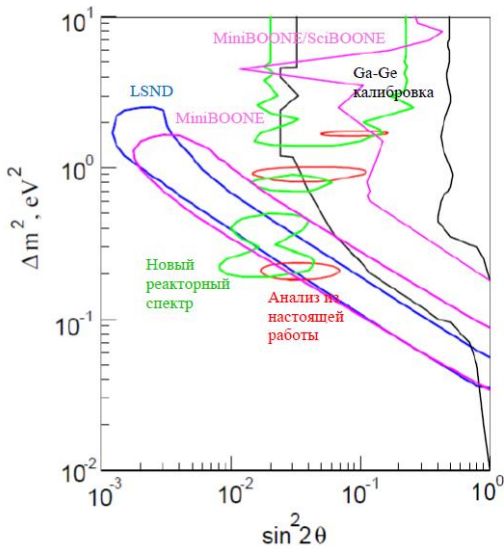


Рис. 7. Области, разрешенных параметров по данным экспериментов с нейтрино на уровне достоверности 90% C.L.. Синяя линия – LSND, сиреневая – MiniBooNE и совместный анализ MiniBooNE и SciBooNE, черная линия – данные калибровочных экспериментов с источниками нейтрино SAGE и GALLEX, красная – совместный анализ реакторных экспериментов с учетом интегрального эффекта, зеленая – данные нового расчета спектра антинейтрино.



Для анализа спектров позитронов разнородных экспериментов предложен метод анализа, не зависящий от функции отклика детектора [12, 13]. Для этого сравниваются отношения спектров, сделанные в одном эксперименте на двух расстояниях с рассчитанным отношением спектров на этих расстояниях. Результат анализа в виде контура разрешенных параметров показан на рис. 7 красным цветом.

Четвертый факт также связан со спектром реакторных антинейтрино. В коллаборации Double Chooz был получен новый спектр антинейтрино, используемый для анализа результатов измерения только дальним детектором в отсутствии ближнего. Это спектр оказался по нормировке на 3.5% больше самого точного спектра, использовавшегося ранее.

На рис. 7 показаны все области параметров осцилляций, следующие из вышеназванных экспериментов с аномалиями.

В настоящее время готовится ряд экспериментов по поиску стерильных нейтрино.

## **Глава V. МЕТРОЛОГИЯ В РЕАКТОРНОЙ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКЕ**

*Пятая глава посвящена метрологии в реакторной нейтринной физике. Для проведения количественных измерений параметров реактора или другого анализа данных нейтринных потоков требуется точное знание стандартных величин, используемых в анализе. Наименее точными до последнего времени величинами являлись энергия на акт деления и спектр антинейтрино делящихся изотопов.*

В работе приводятся результаты расчета энергии, выделяемой на акт деления для всех делящихся изотопов. Погрешность нового результата вдвое лучше погрешностей данных, используемых ранее [14]. Результат расчета показан в табл. 2.

Таблица 2. Энергия, выделяемая на акт деления

Изотоп	$E_f$ , МэВ
$^{235}\text{U}$	$201.92 \pm 0.46$
$^{239}\text{Pu}$	$209.99 \pm 0.60$
$^{238}\text{U}$	$205.52 \pm 0.96$
$^{241}\text{Pu}$	$213.60 \pm 0.65$

Спектр антинейтрино ядерного реактора измеряется уже давно. В экспериментах на Ровенской АЭС был получен стандартный за кампанию спектр реактора ВВЭР [15-19].

Однако, для анализа результатов, полученных на реакторах другого типа, требуется знание спектров отдельных делящихся изотопов, чтобы смешивая их в пропорции по числу делений получить модельные спектры данных реакторов. До настоящего времени в качестве эталонных спектров использовались спектры, полученные конверсионной методикой из измеренных бета-спектров от продуктов деления основных, делящихся тепловыми нейтронами в реакторе, изотопов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  [K. Schreckenbach et al., Phys. Lett. B160, 325, 1985, Phys. Lett. B218, 365, 1989]. Для изотопа  $^{238}\text{U}$ , который делится быстрыми нейтронами, использовался расчетный спектр [P. Vogel et al., Phys. Rev. C24, 1543, 1981].

Предложен новый способ получения спектров отдельных изотопов [20, 21] из экспериментального измерения спектра антинейтрино ядерного реактора как смеси четырех спектров. Приводятся результаты нового анализа ровенского эксперимента по измерению спектра антинейтрино от ядерного реактора.

Метод [21] основывается на отношениях спектров отдельных изотопов, которые оказываются почти не зависящими от метода получения этих спектров (расчетным или конверсионным методами).

Впервые был получен экспериментальный спектр изотопа  $^{238}\text{U}$ . Спектр этого изотопа трудно измерять аналогично спектрам изотопов, которые делятся тепловыми нейтронами из-за малого сечения деления. Но в реакторе малость сечения изотопа компенсируется его большим количеством (содержание  $^{238}\text{U}$  в топливе составляет 96-97%).

Полученные спектры антинейтрино приведены в табл. 3. Сравнение их с известными спектрами антинейтрино, имеющими наименьшую погрешность, показано на рис. 8. В экспериментальных спектрах наблюдается увеличение спектра в мягкой области из-за наличия в топливе накапливающихся долгоживущих осколков, в частности  $^{90}\text{Sr}$  [22-26].

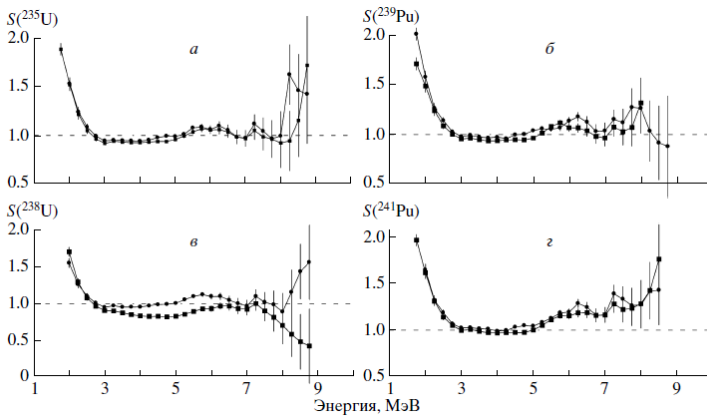


Рис. 8. Сравнение спектров Шрекенбаха и Фогеля (●) [К. Schreckenbach et al., Phys. Lett. B160, 325, 1985, Phys. Lett. B218, 365, 1989, P. Vogel et al., Phys. Rev. C24, 1543, 1981] и Мёллера (■) [Th. A. Mueller et al. Phys. Rev. C83: 054615, 2011] со спектрами, полученными в настоящей работе. *а* –  $^{235}\text{U}$ , *б* –  $^{239}\text{Pu}$ , *в* –  $^{238}\text{U}$ , *г* –  $^{241}\text{Pu}$ . Показано отношение ровенского спектра к сравниваемым спектрам.

Таблица 3. Спектры антинейтрино делящихся изотопов из спектра Ровно

Е, МэВ	<sup>235</sup> U	<sup>239</sup> Pu	<sup>238</sup> U	<sup>241</sup> Pu	δ,%(68% CL)
1.75	2.957	2.537	3.444	2.991	6.8
2.00	1.990	1.691	2.381	2.050	6.4
2.25	1.339	1.127	1.646	1.405	5.0
2.50	9.762E-01	8.097E-01	1.231	1.035	3.2
2.75	7.542E-01	6.151E-01	9.748E-01	8.030E-01	2.1
3.00	6.007E-01	4.807E-01	7.955E-01	6.390E-01	1.7
3.25	5.097E-01	3.937E-01	6.812E-01	5.350E-01	1.4
3.50	4.134E-01	3.089E-01	5.602E-01	4.274E-01	1.3
3.75	3.320E-01	2.395E-01	4.557E-01	3.386E-01	1.2
4.00	2.660E-01	1.849E-01	3.699E-01	2.676E-01	1.2
4.25	2.121E-01	1.417E-01	2.999E-01	2.099E-01	1.2
4.50	1.678E-01	1.066E-01	2.426E-01	1.625E-01	1.4
4.75	1.308E-01	7.916E-02	1.920E-01	1.240E-01	1.5
5.00	1.037E-01	5.986E-02	1.533E-01	9.623E-02	1.7
5.25	8.303E-02	4.665E-02	1.238E-01	7.562E-02	1.8
5.50	6.648E-02	3.686E-02	1.001E-01	5.933E-02	2.2
5.75	5.235E-02	2.838E-02	7.956E-02	4.538E-02	2.8
6.00	3.926E-02	2.013E-02	6.044E-02	3.302E-02	3.8
6.25	2.961E-02	1.486E-02	4.677E-02	2.440E-02	4.7
6.50	2.140E-02	1.058E-02	3.448E-02	1.735E-02	5.9
6.75	1.473E-02	7.157E-03	2.413E-02	1.175E-02	7.3
7.00	1.019E-02	4.853E-03	1.709E-02	7.970E-03	8.2
7.25	7.467E-03	3.517E-03	1.300E-02	5.731E-03	9.4
7.50	4.473E-03	2.016E-03	8.053E-03	3.398E-03	14
7.75	2.596E-03	1.121E-03	4.905E-03	2.014E-03	20
8.00	1.350E-03	6.328E-04	2.792E-03	1.136E-03	26
8.25	6.706E-04	3.624E-04	1.482E-03	6.216E-04	32
8.50	3.462E-04	2.014E-04	7.572E-04	3.367E-04	40
8.75	1.837E-04	1.011E-04	3.994E-04	1.771E-04	80
9.00	6.951E-05	3.282E-05	1.635E-04	6.503E-05	140
9.25	2.930E-05	1.267E-05	7.213E-05	2.599E-05	230

## **Глава VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ НЕЙТРИННЫХ ПОТОКОВ**

*В шестой главе рассказывается об исследовании природных нейтринных потоков. Обсуждается проект большого сцинтилляционного детектора для установки в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.*

Обосновывается возможность создания большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на основе рассчитанных потоков нейтрино от природных источников [27-32]. Для детектора такого типа мы рассматриваем следующую программу исследований:

1. Изучение потока антинейтрино, излучаемого дочерними продуктами распада урана и тория (геонейтрино), содержащимися внутри Земли, и определение, таким образом, радиогенной составляющей теплового потока Земли;

2. Проверка гипотезы о протекании в центре Земли цепной реакции деления путем поиска антинейтринного потока “геореактора”;

3. Изучение динамики взрыва сверхновых путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки;

4. Поиски изотропного потока антинейтрино, накопившихся во Вселенной за миллиарды лет при гравитационных коллапсах ядер массивных звезд и образовании нейтронных звезд и “черных дыр”;

5. Регистрация совокупного потока антинейтрино от всех имеющихся на Земле промышленных ядерных реакторов. Подтверждение параметров осцилляций электронных антинейтрино;

6. Исследование спектра солнечных нейтрино.

Детектор, расположенный в районе Кавказа выгодно отличается от других мест малым потоком антинейтрино от промышленных ядерных реакторов. Кроме того, наличие уже гото-

вой инфраструктуры: электроснабжение, вентиляция, наличие людских ресурсов существенно удешевляют строительство.

В табл. 4 показаны скорости счета геонейтрино для различных мест расположения детектора массой 1 кт, отношение  $R$  скорости счета фона реакторных антинейтрино  $N_{\text{реак}}$  к скорости счета событий геонейтрино  $N_{\text{geo}}$  в диапазоне энергий геонейтрино и глубина расположения детектора.

Таблица 4. Ожидаемые скорости счета  $N_{\text{geo}}$  в разных точках Земли в суммарном потоке  $\bar{\nu}_e$  от распадов U и Th (с учетом осцилляций) в единицах TNU.

Местоположение	Глубина м в.э.	Скорость счета $N_{\text{geo}}$ , TNU			$R = \frac{N_{\text{реак}}}{N_{\text{geo}}}$
		Fiorentini	Enomoto	[32]	
Hawaii	~ 4000	12.5	13.4	13.0	0.1
Kamioka	2700	34.8	36.5	33.4	6.7
Gran Sasso	3700	40.5	43.1	42.3	0.9
Sudbury	6000	49.6	50.4	52.8	1.1
Pyhäsalmi	4000	52.4	52.4	55.7	0.5
Баксан	4800	51.9	55.0	57.0	0.2

Можно ожидать, что детектор на Баксане при массе мишени 20 кт быстро превзойдет по точности современные детекторы BOREXINO и KamLAND, которые уже оценили скорость счета геонейтрино с точностью 20-30%. В пределах этой точности измеренное значение совпадает с современной моделью расположения радиоактивных источников в Земле.

Таблица 5. Ожидаемое число нейтринных событий в сцинтилляционном детекторе с массой мишени 5 кт ( $4 \times 10^{32}$  протонов,  $16 \times 10^{32}$  электронов,  $2 \times 10^{32}$  ядер  $^{12}\text{C}$ ) от вспышки “тепловых” нейтрино при коллапсе ядра Сверхновой (расстояние до Сверхновой 10 килопарсек, уносимая при коллапсе энергия нейтрино составляет  $\sim 3 \times 10^{53}$  эрг, прямая иерархия масс)

Реакция	Без осцилляций	LMA MSW ( $\sin^2 \theta_{13} > 10^{-3}$ )	LMA MSW ( $\sin^2 \theta_{13} < 10^{-5}$ )**
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	1157	1479	1479
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	14.4	35.5	35.5
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	5.8	132	93.5
$\Sigma {}^{12}\text{C}(\nu_i, \nu'_i) {}^{12}\text{C} + \gamma^*$	236	236	236
$\Sigma (\nu_i, e^-) \rightarrow (\nu'_i, e^-)$	70.6	62.2	61.4

$$* \nu_i = \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$$

\*\* Сейчас уже известно, что значение  $\sin^2 \theta_{13} = 0.09$ , то есть верна третья колонка.

В табл. 5 представлены рассчитанные нами в детекторе на Баксане с массой 5 кт скорости счета от нейтринного потока Сверхновой на расстоянии 10 кпс. Детектор с массой мишени в 20 кт сможет измерить довольно точно спектр антинейтрино и по нему определить иерархию масс.

На рис. 9 представлены все возможные спектры антинейтрино, которые будут регистрироваться детектором на Баксане. Видно, что используя амплитудный и временной анализы возможно разделить все эти спектры. Спектр от Сверхновой будет наблюдаться в течение короткого времени, а спектры реакторов и геонейтрино будут регистрироваться постоянно. Макушка спектра реликтовых нейтрино находится между спектром реакторных антинейтрино и спектром атмосферных нейтрино.

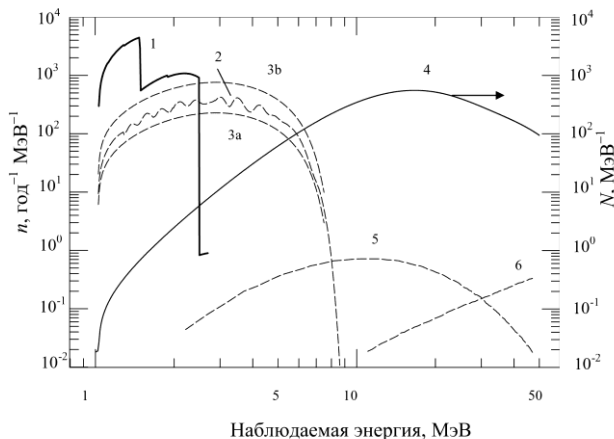


Рис. 9. Спектры позитронов реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  в детекторе на Баксане (мишень – органический сцинтиллятор 5 кт, осцилляции учтены): 1 – от геонейтрино, 2 – от  $\bar{\nu}_e$  окружающих детектор реакторов, 3а, 3б – от  $\bar{\nu}_e$  гипотетического геореактора, 4 – от  $\bar{\nu}_e$  при вспышке Сверхновой, см. текст (правая шкала), 5 – от реликтовых  $\bar{\nu}_e$  от Сверхновых, 6 – от атмосферных  $\bar{\nu}_e$ .

### Заключение

В нем представлены выводы и сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

### Основные результаты работы

1. Предложен метод использования двух идентичных детекторов для проведения экспериментов в потоке реакторных антинейтрино. Метод позволяет избавиться от систематической ошибки, связанной с реакторными спектрами и параметрами детектора.

2. Экспериментально измерен последний угол смешивания нейтрино из матрицы Маки-Накагавы-Сакаты-Понтекорво  $\theta_{13}$



при осцилляциях реакторных электронных антинейтрино в таонные минуя мюонное состояние. Измеренный в Коллаборации Double Chooz угол смешивания составил  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030$  (стат.)  $\pm 0.025$  (сист.) при значении разницы квадратов масс атмосферных нейтрино  $\Delta m_{32}^2 = 2.32 \pm 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup>.

3. Предложен метод анализа разнородных экспериментов на основе отношений спектров, не зависящий от функции отклика детектора.

4. На основе анализа реакторных экспериментов получено указание на возможное существование четвертого типа нейтрино (возможно стерильного). Массовый параметр осцилляций в это состояние  $\Delta m_{14}^2 = 0.9$  эВ<sup>2</sup> при амплитуде  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.04-0.05$ .

5. Предложен метод разделения экспериментального спектра антинейтрино, измеренного в ровенском эксперименте при стандартном составе топлива активной зоны ядерного реактора на составляющие его компоненты от четырех основных делящихся изотопов (<sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu).

6. Впервые экспериментально получен спектр <sup>238</sup>U, который ранее учитывался только расчетным путем.

7. Получено научное обоснование, показывающие возможность создания большого сцинтилляционного детектора для регистрации природных нейтринных потоков. Были проведены расчеты эффекта в детекторе от различных природных потоков и показано, что необходимая статистика от геонейтрино может быть набрана детектором с мишенью 5-10 кт за 10 лет измерений. При этом вспышка сверхновой в центре нашей Галактики будет уверенно зарегистрирована со статистикой в несколько тысяч событий.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. L.A.Mikaelyan, V.V. Sinev. Neutrino Oscillations at Reactors: What Is Next?, Ядерная физика, т. 63, № 6, с. 1077, 2000.

2. Yu.V. Kozlov, L.A. Mikaelyan, V.V. Sinev. Two-detector Reactor Neutrino oscillation experiment Kr2Det at Krasnoyarsk: status report, Ядерная физика, т. 66, № 3, с. 497, 2003.

3. V.P. Martemianov, L.A. Mikaelyan, V.I. Kopeikin, Yu.V. Kozlov, V.V. Sinev. The Kr2Det Project: Search for Mass-3 State Contribution  $|Ue3|^2$  to the Electron Neutrino Using a One-Reacto–Two-Detector Oscillation Experiment at the Krasnoyarsk Underground Site, Ядерная физика, т. 66, № 10, с. 1982, 2003.

4. В.И.Копейкин, И.Н. Мачулин, Л.А. Микаэлян, М.Д. Скорохватов, В.В. Синева, С.В. Сухотин, А.В.Этенко. Проект Шооз-2 поиск угла смешивания нейтрино, Ядерная физика, т. 72, № 2, с. 307, 2009.

5. Y. Abe, C. Aberle, T. Akiri, ...V. Sinev, et al. (DC Collaboration), Indication of reactor electron antineutrinos disappearance in the Double Chooz experiment, Phys. Rev. Lett. 108, 131801, 2012; arXiv:1112.6353 [hep-ex], 2011.

6. Y. Abe, C. Aberle, J.C. dos Anjos, ...V. Sinev et al. (Double Chooz Collaboration), Reactor electron antineutrino disappearance in the Double Chooz experiment, Phys. Rev. D 86, 052008, 2012; arXiv:1207.6632 [hep-ex].

7. Y. Abe, C. Aberle, J.C. dos Anjos, ...V. Sinev et al. (Double Chooz Collaboration), Direct Measurement of Backgrounds Using Reactor-Off Data In Double Chooz, Phys. Rev. D 87, 011102, 2013; arXiv:1210.3748 [hep-ex].

8. Y. Abe, C. Aberle, J.C. dos Anjos, ...V. Sinev et al. (Double Chooz Collaboration), First Test of Lorentz Violation with a Reac-

tor-based Antineutrino Experiment, Phys. Rev. D 86, 112009, 2012; arXiv:1209.5810 [hep-ex].

9. Y. Abe, C. Aberle, J.C. dos Anjos, ...V. Sinev et al. (Double Chooz Collaboration), First Measurement of  $\theta_{13}$  From Delayed Neutron Capture on Hydrogen in the Double Chooz Experiment, Phys. Rev. Lett., 2013; arXiv:1301.2948 [hep-ex].

10. V.V. Sinev. Is it possible to test the LSND parameters at reactors?, Письма в ЭЧАЯ, № 5 [108], с.37, 2001.

11. Л.А. Микаэлян, В.В. Синеv. О поиске стерильных нейтрино в эксперименте на ядерном реакторе, Ядерная физика, т. 62, № 12, с. 2177, 1999.

12. В.В. Синеv. Совместный анализ спектральных реакторных нейтринных экспериментов, Препринт ИЯИ РАН 1278/2011; ArXiv: 1103.2452 [hep-ex].

13. В.В. Синеv. Поиски стерильных нейтрино, Препринт ИЯИ РАН 1342/2013.

14. В.И. Копейкин, Л.А. Микаэлян, В.В. Синеv. Реактор как источник антинейтрино: Тепловая энергия деления, Ядерная физика, т. 67, № 10, с. 1916, 2004.

15. Ю.В. Климов, В.И. Копейкин, А.А. Лабзов, И.Н. Мачулин, Л.А. Микаэлян, С.В. Николаев, К.В. Озеров, В.В. Синеv, М.Д. Скорохватов, А.В. Этенко Измерение вариаций сечения реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  в потоке  $\bar{\nu}_e$  от реактора, Ядерная физика, т. 51, вып. 2, с. 401-406, 1990.

16. Ю.В. Климов, В.И. Копейкин, А.А. Лабзов, Л.А. Микаэлян, К.В. Озеров, В.В. Синеv, С.В. Толоконников. Измерение спектра электронных антинейтрино ядерного реактора, Ядерная физика, т. 52, вып. 6, с. 1574-1582, 1990.

17. Климов Ю.В., Копейкин В.И., Микаэлян Л.А., Озеров К.В, Синеv В.В. Дистанционное измерение мощности и энерго-

выработки реактора нейтринным методом, Атомная энергия, т. 76, вып. 2, с. 130-134, 1994.

18. А.Б. Доброцветов, Ю.В. Климов, В.И. Копейкин, Л.А. Микаэлян, К.В. Озеров, В.В. Синев, С.В. Толоконников. Измерение спектра антинейтрино ядерного реактора, Препринт ИАЭ-5796/2, 1994.

19. В.И. Копейкин, Л.А. Микаэлян, В.В. Синев. Спектр антинейтрино ядерного реактора, Ядерная физика, т. 60 № 2, с. 230-234, 1997.

20. В.В. Синев. Определение спектров антинейтрино отдельных делящихся изотопов в прямом эксперименте на ядерном реакторе, Ядерная физика, т. 72, № 11, с. 1906, 2009.

21. В.В. Синев. Экспериментальный спектр антинейтрино от ядерного реактора и спектры основных делящихся изотопов, Препринт ИЯИ РАН 1318/2012; Ядерная физика, т. 76, № 5, с. 578-584, 2013.

22. V.I. Kopeykin, L.A.Mikaelyan, V.V. Sinev. Antineutrino Background from Spent-Fuel Storage in Sensitive Searches for  $\theta_{13}$  at Reactors, Ядерная физика, т. 69, № 2, с. 185, 2006.

23. В.И. Копейкин, Л.А. Микаэлян, В.В. Синев. Поиски магнитного момента нейтрино в нестационарных потоках антинейтрино ядерного реактора, Ядерная физика, т. 61, с. 2222, 1998.

24. V.I. Kopeykin, L.A.Mikaelyan, V.V. Sinev. Search for the Neutrino Magnetic Moment in the Nonequilibrium reactor antineutrino energy spectrum, Ядерная физика, т. 63, № 6, с. 1087, 2000.

25. V.I. Kopeykin, V.V. Sinev. Energy spectrum of reactor antineutrinos and searches for new physics (recent developments), Письма в ЭЧАЯ, № 5 [108], с.41, 2001.

26. V.I. Kopeykin, L.A.Mikaelyan, V.V. Sinev. Components of antineutrino emission in nuclear reactor, Ядерная физика, т. 67, № 11, с. 1987, 2004.

27. G. V. Domogatsky, V. I. Kopeikin, L. A. Mikaelyan, , V.V. Sinev. Neutrino Geophysics at Baksan I: Possible Detection of Georeactor Antineutrinos, Ядерная физика, т. 68, № 1, с. 70, 2005.

28. G. V. Domogatsky, V. I. Kopeikin, L. A. Mikaelyan, , V.V. Sinev. Neutrino Geophysics at Baksan: On Searches for Antineutrinos and Radiogenic-Heat Sources in the Interior of the Earth, Ядерная физика, т. 69, № 1, с. 46, 2006.

29. G. V. Domogatsky, V. I. Kopeikin, L. A. Mikaelyan, V.V. Sinev. Can Radiogenic Heat Sources in the Earth be located by their Antineutrino incoming directions?, Ядерная физика, т. 69, № 11, с. 1894, 2006.

30. Г.В. Домогацкий, В.И. Копейкин, Л.А. Микаэлян, В.В. Синеv. О возможности изучения на Баксане нейтрино от сверхновой, Ядерная физика, т. 70, № 6, с. 1116, 2007.

31. И.Р. Барабанов, Г.Я. Новикова, В.В. Синеv, Е.А. Янович. Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане, Препринт ИЯИ РАН 1228/2009.

32. В.В. Синеv. Геонейтрино и внутреннее строение Земли, Препринт ИЯИ РАН 1257/2010.