



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА



ФОНД
ВОЛЬНОЕ ДЕЛО

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ФИЗИКА НЕЙТРИНО

ШИРОКОВ
ЕВГЕНИЙ ВАДИМОВИЧ

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

Содержание

1. Лекция 1. Введение в физику нейтрино.	5
1.1. Возникновение гипотезы о нейтрино.	5
1.2. Методы регистрации нейтрино.	10
1.3. Солнечные нейтрино.	11
1.4. Реакторные нейтрино.	13
1.5. Ускорительные нейтрино.	13
1.6. Астрофизические нейтрино.	13
1.7. Геонейтрино.	14
1.8. Нейтринные осцилляции.	14
2. Лекция 2. Взаимодействие нейтрино с веществом.	16
2.1. Обратный бета-распад.	19
2.2. Рассеяние нейтрино на электронах.	19
2.3. Пороги реакций.	19
2.4. Другие ароматы нейтрино.	20
2.5. Обратный мюонный распад.	20
2.6. Изменение сечения реакций.	22
3. Лекция 3. Слабое взаимодействие.	25
3.1. Слабое взаимодействие.	25
3.2. Частицы, участвующие в слабом взаимодействии.	25
3.3. Проявления и особенности слабого взаимодействия.	25
3.4. Лептонные числа.	26
3.5. Классификация процессов слабого взаимодействия.	27
3.6. Константа слабого взаимодействия.	27
3.7. Создание теории электрослабого взаимодействия.	28
3.8. Открытие промежуточных бозонов.	29
4. Лекция 4. Спектр солнечных нейтрино.	32
4.1. Методы регистрации нейтрино.	32
4.2. Радиохимический метод.	33
4.3. Сцинтилляционный метод.	34
4.4. Черенковский метод.	34
4.5. Радиохимический метод. Галлиевый детектор	35
4.6. Акустический метод.	36
5. Лекция 5. Методы регистрации нейтрино.	39
5.1. Солнечные нейтрино.	39
5.2. Homestake.	40
5.3. Kamiokande.	42
5.4. SAGE.	48
5.5. Баксанская нейтринная обсерватория (эксперимент SAGE).	48
5.6. SNO.	49

5.7. Borexino.	53
5.7.1. Общая схема детектора	54
5.7.2. Основные принципы детектирования	55
5.7.3. Преимущества детектора	56
5.8. JUNO.	56
6. Лекция 6. Ускорительные нейтрино.	58
6.1. Основные характеристики.	58
6.2. JPARC.	59
6.3. Эксперимент NOvA.	60
6.4. Эксперимент OPERA.	60
6.5. Эксперимент DUNE (LBNE).	61
7. Лекция 7. Нейтринные телескопы.	63
7.1. Баксанский сцинтилляционный телескоп	63
7.2. Super-Kamiokande	63
7.3. Детектор SNO (Sudbury Neutrino Observatory)	64
7.4. Детектор KamLAND	64
7.5. Нейтринные телескопы в естественных средах	64
7.6. Нейтринный телескоп AMANDA	64
8. Лекция 8. Нейтринные осцилляции.	66
8.1. Нейтринные осцилляции.	66
8.2. Проект KATRIN.	69
9. Лекция 9. Реакторные нейтрино	72
9.1. Эксперименты.	74
9.2. KamLAND.	74
9.3. Daya Bay.	77
9.4. iDREAM.	77
9.5. Эксперимент K2K.	78
9.6. Ускорительные эксперименты по детектированию нейтрино	79
10. Лекция 10. Осцилляционная индустрия	81
10.1. Основные направления в экспериментальной физике нейтрино.	81
10.2. Эксперимент KATRIN.	82
10.3. Эксперимент OPERA.	83
10.4. Детектирование атмосферных нейтрино.	83
10.5. Эксперимент MACRO.	83
10.6. Детекторы высокоэнергетичных нейтрино (нейтринные телескопы)	84
10.7. Источники нейтрино.	85
10.8. Акустические детекторы.	85
10.8.1. Brookhaven National Laboratory и Harvard University (1978).	86
10.8.2. Study of Acoustic Ultrahigh-energy Neutrino Detection (SAUND).	86
10.8.3. Acoustic COsmic Ray Neutrino Experiment (ACORNE).	86

10.8.4. ANTARES Modules for Acoustic Detection Under the Sea (AMADEUS) в Средиземном море.	87
10.8.5. Acoustic Positioning System (APS)	87
10.8.6. Deep Underwater Muon And Neutrino Detection (DUMAND).	88
10.8.7. Geological Exploration Neutrino Induced Underwater Sound (GENIUS)	88
10.8.8. South Pole Acoustic Test Setup (SPATS).	88
10.8.9. Sea Acoustic Detector of Cosmic Objects (SADCO)	88
10.8.10. Ocean Noise Detection Experiment (NEMO-OvDE).	89
10.8.11. NEMO Phase II – Acoustic Positioning and Acoustic Physics.	89
10.9. О тёмной материи.	89
10.10. Майорановы нейтрино (проект GERDA).	90

1. Лекция 1. Введение в физику нейтрино.

1.1. Возникновение гипотезы о нейтрино.

Сама гипотеза нейтрино возникает после того, как был детально изучен бета-распад. Формула на нуклонном уровне: $n \rightarrow p + e^- + ?$, и в 1930 году первоначально шла речь о том, что частица распадается на две частицы, т. е. на протон и электрон. Ядро превращается остаётся дочернее ядро и вылетает электрон. Около 1928-1929 годов возникла спектроскопия бета-распадов, то есть выяснилось, что все спектры электронов выглядят так (см. рис. 1). По этой причине возникает естественный вопрос: куда пропадает энергия?

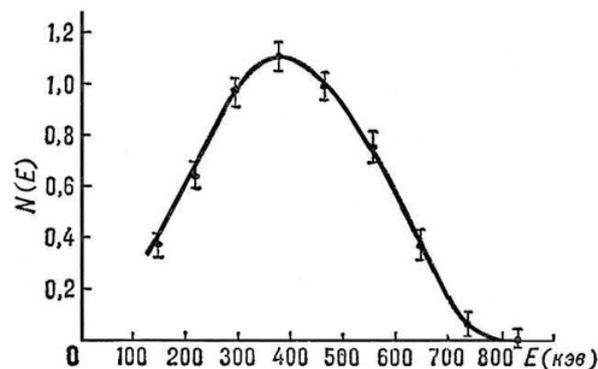
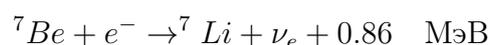


Рис. 1. Спектр бета-распада

На самом деле, уже тогда граничные энергии были рассчитаны. Когда были записаны первые энергетические соотношения, то эксперимент показал полное несоответствие наблюдаемого тому, что мы предполагали. То есть вместо монохроматического спектра, мы наблюдаем, что каждый вылет электрона сопровождался вылетом с разной энергией. И в декабре 1930 года была высказана гипотеза, когда Паули пишет свое знаменитое письмо немецкому научному сообществу, где он поздравляет с Рождеством и с Новым годом и между прочим говорит: "кажется, я нашёл причину проблемы потери энергии в бета-распаде - это ещё одна частица, но эту частицу мы по каким-то причинам не регистрируем, оно ускользает от нашего взгляда и в результате получается классическая задача с тремя телами, когда вы не можете точно сказать, как энергетическое распределение связано друг с другом и вы получаете непрерывный спектр."

В 1938 году А. Алиханов предлагает очень элегантный способ проверки существования нейтрино. Дело в том, что в середине тридцатых годов началось изучение такого явления, как e-захват (третий вид бета-распада):



Эта формула это и есть e-захват в ${}^7\text{Be}$. Алиханов предположил следующее: если e-захват происходит, так как мы считаем, то из него получается ${}^7\text{Li}$, который мы можем наблюдать по характеристическим рентгеновским линиям. Но можно было

рассчитать энергию и убедиться в том, что всякий раз мы теряем одну и ту же порцию энергии, что у нас происходит процесс образования из одного ядра другого, и некая частица уносит энергию. В 1942 году Джеймс Аллен проводит эксперимент по наблюдению e -захвата в ${}^7\text{Be}$ и сделал вывод, что только в случае возникновения ещё одной частицы, которая уносит кинетическую энергию в 0.86 МэВ. А вот регистрация нейтрино произошла только в середине пятидесятых годов. Нобелевская премия по физике за регистрацию нейтрино была получена в 1956 году.

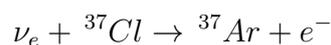
Первая попытка Фред Райнес и Клайд Коэн зарегистрировать нейтрино была проведена в Хэнфорде в 1953 году, Хэнфорд — это одна из первых АЭС в мире.

Иногда задают вопрос: если было уже известно, что сечение очень маленькое, то почему сразу не догадались, что нужны огромные массивы вещества? Потому что экспериментальная физика атома и ядра к тому моменту насчитывала полвека и люди привыкли к тому, что приборы обычно ставились на стол и считали, что этого достаточно для регистрации.

Установка Райнеса и Коэна была больше, чем на стол, вокруг неё стояло примерно 90 фотоумножителей, которые должны были регистрировать по такой схеме: взаимодействие нейтрино с веществом. нейтрино взаимодействует в данном случае с протоном - это антинейтрино, естественно, но Райнес и Коэн об этом не знали. Возникают нейтрон и позитрон, позитрон аннигилирует в веществе довольно быстро, а нейтрон идёт долгим путем из-за этого вещества вносился кадмий, чтобы захватить нейтрон и через некоторое время он захватывался, кадмий давал второй изотоп в возбуждённом состоянии и, после этого, испускались гамма-кванты. По разнице во времени между регистрациями детекторами и фотоумножителями первой пары гамма-квантов и последующей, вы могли убедиться в том, что у вас произошел тот самый процесс. Это классическая схема совпадений, которая реализуется сейчас в абсолютном большинстве экспериментов. Результат эксперимента Райнеса и Коэна был нулевой, они ничего не получили, что и следовало ожидать на их маленькой установке.

В 1955 году была сооружена установка в Саванна-Ривер, установка была высотой примерно около 10 м. Райнес и Коэн поняли, что нужен очень большой объём водородсодержащего вещества. Это были довольно сложные детекторы сцинтилляционного типа. Именно эта регистрация антинейтрино от ядерных реакторов и принесла им славу первых людей, которые впервые зарегистрировали эту частицу.

Основным триггером, который запустил все эти исследования, была статья апреля 1945 года, которую написал Бруно Понтекорво. Он предложил очень элегантный метод регистрации нейтрино, который был назван хлораргоновым.



Берётся ${}^{37}\text{Cl}$, если вы перенесете нейтрино направо, то вы получите бета минус распад ${}^{37}\text{Cl}$, с одним только исключением, что ${}^{37}\text{Cl}$ — стабильные ядра, он никуда не распадается, поэтому получаете гипотетический распад ${}^{37}\text{Cl}$, а обратную реакцию Понтекорво назвал обратным-бета распадом. То есть мы проверяем, что у нас частица должна реагировать и давать оставшиеся продукты: ${}^{37}\text{Ar}$ и электрон.

Метод обратного бета-распада лёг в основу регистрации нейтрино.

Проблема заключается в том что, ${}^{37}\text{Cl}$ - это очень дешёвый материал пригодный

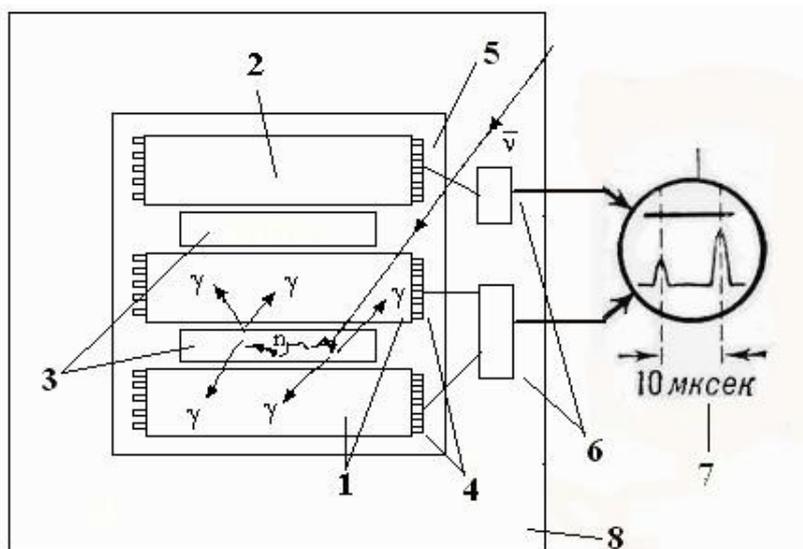


Рис. 2. Схема детектора в опыте Райнеса и Коэна

для того, чтобы сделать из него детектор большого объёма, но ^{37}Ar — это радиоактивное ядро, которое имеет небольшой период полураспада. И поэтому чтобы подобрать два таких ядра: одно из которых дешёвое и стабильное, а второе радиоактивное с нужным периодом полураспада, нужно обладать экспериментальным чутьём.

Пример первой реализации этого метода - это, конечно, регистрация солнечных нейтрино Раймондом Дэвисом.

В 1954 году он собирает детектор в Брукхэвене объёмом 4000 л. и пытается зарегистрировать нейтрино по методу Понтекорво, но не получает никаких результатов, и он просит ещё дополнительное финансирование. Он переезжает в Саванна-Ривер и работает параллельно с Райнесом и Коэном. Они регистрируют частицы, а он - нет, отсюда следует вывод: они регистрируют разные частицы. Его нулевой результат доказал, что нейтрино имеет античастицу. И при бета минус распадах, которые происходят в ядерных реакторах, выделяется антинейтрино. А Солнце, во время термоядерных реакций, выделяется именно нейтрино.

В 1963 году в шахте Хоумстейк начинается строительство гигантского детектора (Рис. 3), объёмом 450000 л. И в августе 1967 года Дэвис регистрирует первые нейтрино от Солнца.

Расчеты показывали, что они должны были зарегистрировать в три раза больше нейтрино, а регистрировалось в 3 раза меньше и именно тогда впервые заговорили об осцилляциях, которые за 10 лет до этого были предсказаны Понтекорво.

В 1962 году был сделан второй очень важный шаг. Был дан ответ на вопрос: а какое отношение нейтрино имеют к своим заряженным партнерам. И в этом году Леон Ледерман наблюдает распад ипсилон-мезона и открывают b -кварк. Ледерман установил, что нейтрино, которые возникают при распаде пи-мезона, при реакциях дают только мюон и никогда не даёт электрон, из чего он сделал вывод, что это мюонное нейтрино. И после этого у нейтрино появились и нижние индексы.



Рис. 3. Строительство детектора в шахтах Хоумстейк

В 1975 году Мартин Перл открывает таон, и после этого автоматически был написан третий аромат: таонное нейтрино.

В 2000 году в Фермилабе в эксперименте DONUT, точно таким же методом, каким работал Ледерман, регистрируется таонное нейтрино. Это был очень сложный эксперимент. Дело в том, что мюон, который у вас получается в конце, живёт две микросекунды. Для частицы это очень много, а таон, с его маленьким временем жизни, создает очень сложные условия, чтобы успели его отделить от массы всего, что происходит в таких экспериментах.

С момента первых экспериментов, общее число различных нейтринных проектов превысило 200 штук. Реальное количество осуществлённых экспериментов осуществляется несколькими десятками.

Далее будем говорить о самой большой проблеме нейтринной физики: $\sigma = 10^{-20}$ барн — это стандартное сечение взаимодействия нейтрино с ядрами. Мы видим, что когда вы переходите к нуклонам и кваркам, это сечение начинает увеличиваться, и это очень хорошо, потому что если бы, например, нейтрино с кварками взаимодействовали бы с этим сечением, то никакой астрофизики бы не было вообще. Потому что при тех потоках, которые там есть, мы просто не могли бы ничего регистрировать и говорили бы, что до 100 ГэВ регистрировали нейтрино, а дальше пока наука до этого не дошла. А так можем, именно потому что сечение немного меняется. Но для наших стандартных МэВ-ных энергии это действительно $\sigma = 10^{-20}$ барн.

Из такого сечения вытекает высокая проникающая способность нейтрино.

Например, регистрация частиц в детекторе ATLAS (Рис. 5). Мы видим слои этого детектора: электромагнитный калориметр, адронный калориметр, мюонный спектрометр, и каждая частица занимает свое почетное место.

Если посмотреть на крайнюю белую пунктирную линию, которая вылетает за пределы, мы видим никакого шанса зарегистрировать нейтрино в 22-х метровом объеме ATLAS при таком сечении.

Оценки масс нейтрино:

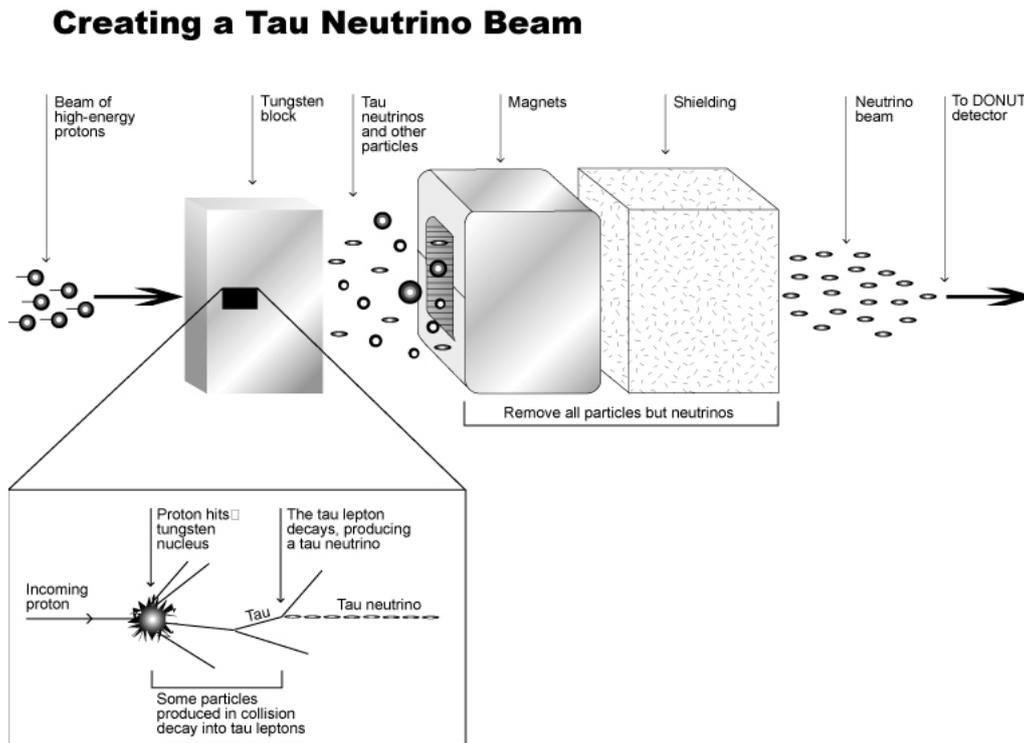


Рис. 4. Открытие таонного нейтрино

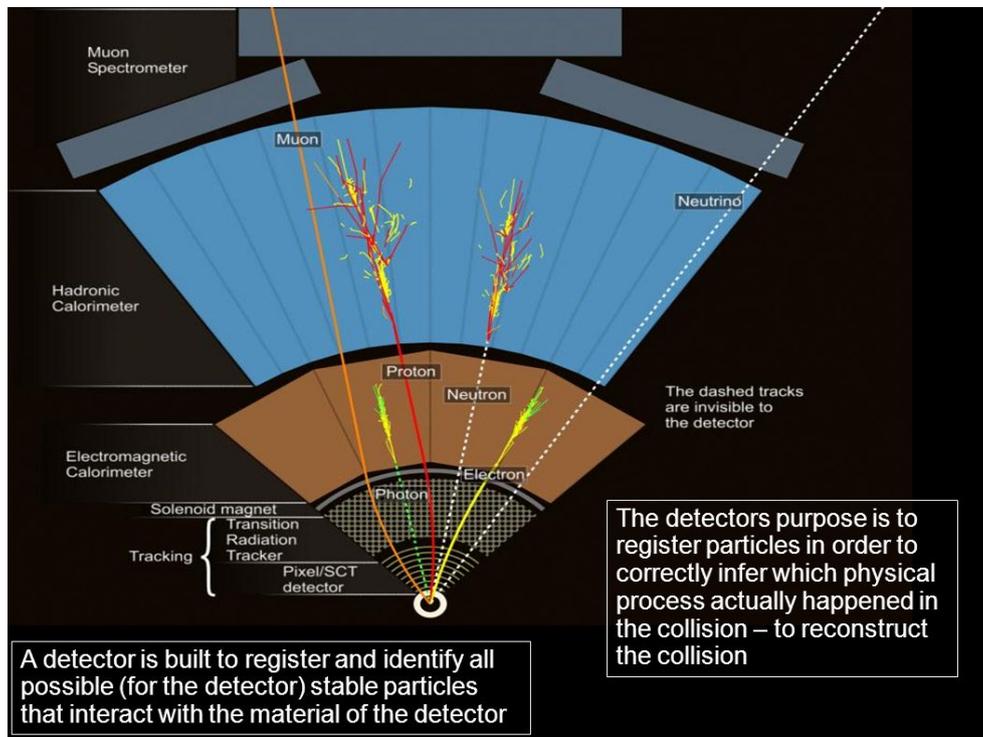


Рис. 5. Регистрация частиц в детекторе ATLAS

- 1) $\nu_e < 1.5$ эВ
- 2) $\nu_\mu < 170$ кэВ
- 3) $\nu_\tau < 15.5$ МэВ

Нейтрино — это единственная частица, у которой не только точно неизвестны массы, а до сих пор неизвестно есть ли они вообще.

1.2. Методы регистрации нейтрино.

С восьмидесятых годов — это эпоха нейтринной физики. Мы регистрируем разные типы разными способами.

Во-первых, поговорим о том, какие источники у нас имеются. Например, реликтовые нейтрино, далее от Солнца мы имеем солнечные нейтрино, от Земли — гео-нейтрино, и далее идут астрофизические нейтрино. Мы можем сказать, что кроме Солнца, источниками нейтрино являются сверхновые и скорее всего активные ядра Галактик.

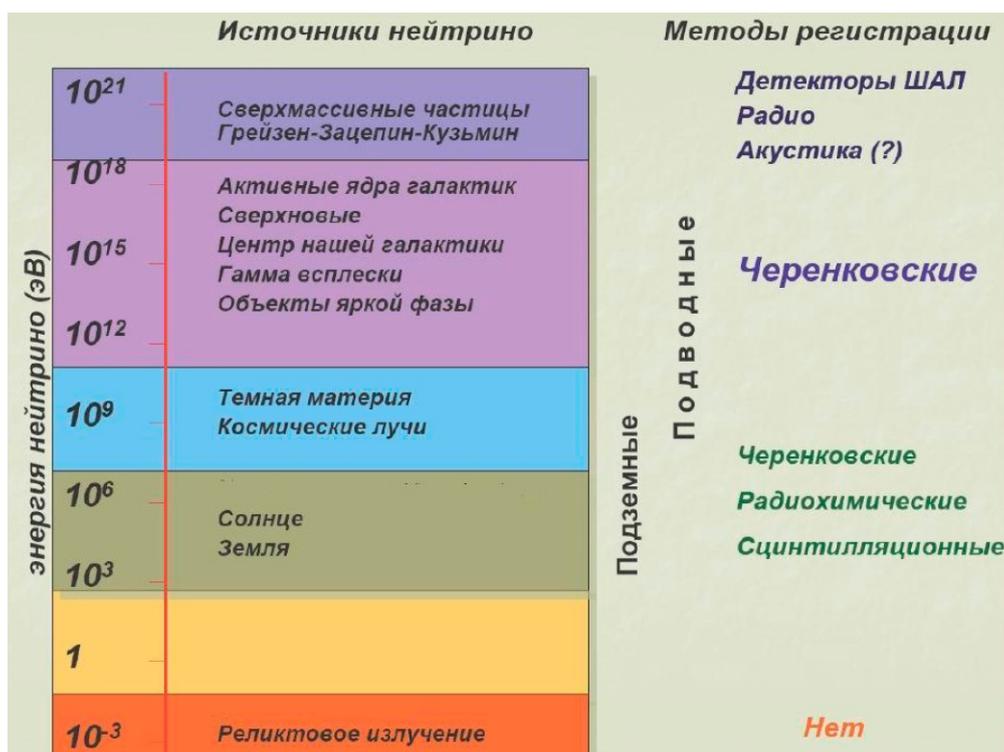


Рис. 6. Методы регистрации нейтрино

На рисунке 6 не изображены искусственные источники (реакторы, ускорители).

Методы, которым мы можем пользоваться для регистрации нейтрино: радиохимия — это метод Понтекорво, сцинтилляционный, черенковский и другие.

Реликтовые нейтрино — это модельная вещь. Если мы знаем о том, что у нас имеются реликтовые фотоны и наше представление о космологии верно, но проблема в том, что энергия этого излучения находится в диапазоне миллиэВов.

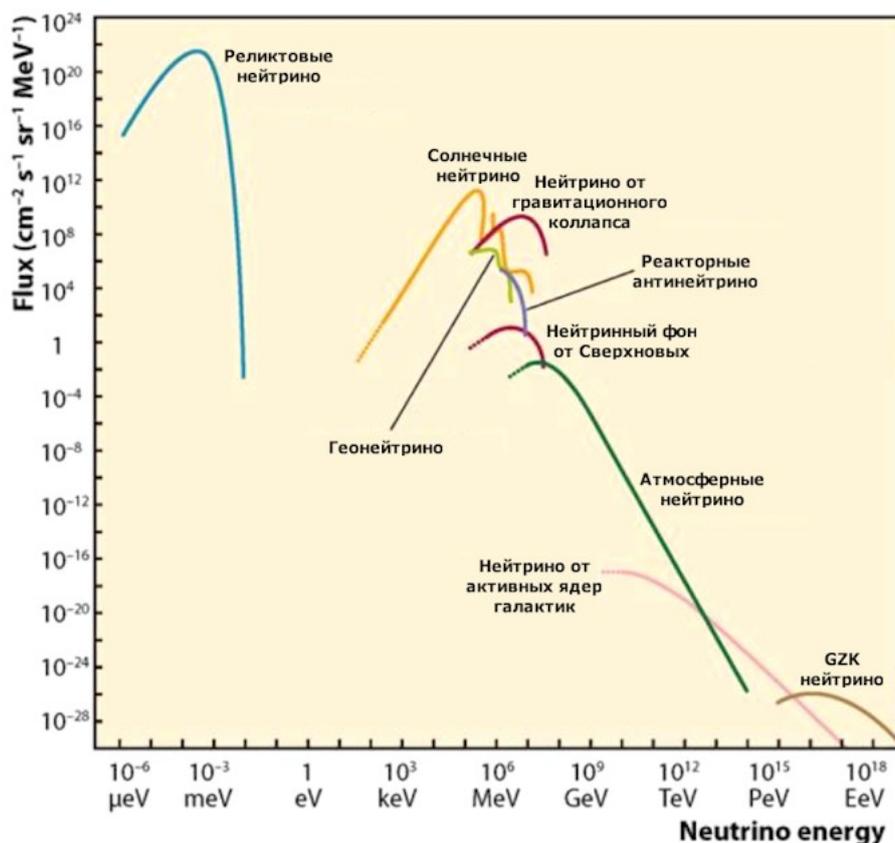


Рис. 7. Спектр нейтрино

Если бы мы нашли метод регистрации реликтовых нейтрино (Рис. 7), то даже с учетом низкого сечения, их настолько много, что мы должны были бы их довольно неплохо регистрировать как-то, но как, когда энергия в 1 эВ и всё будет забиваться фоном. Как от него избавиться мы пока не знаем.

На рисунке 7 мы видим, что если мы уходим чуть-чуть по энергии вперед, то происходит резкое падение интенсивности. Но так как сечение начинает подниматься в зависимости от энергии и поэтому есть возможность регистрировать и солнечные нейтрино, и антинейтрино от других физических процессов, и одновременно нейтрино от сверхвысоких энергий.

1.3. Солнечные нейтрино.

На рисунке 8 мы видим спектр солнечных нейтрино.

Здесь тоже есть свои особенности, например, лучше всего спектр виден отбора 8. Это самый высокоэнергетичный бета-распадный источник, он уходит в диапазон за 13 МэВ. Но у него не очень высокая интенсивность. А самая высокая интенсивность у первичного *pp* цикла. Но хлорным методом этой компоненты не видно.

Однако энергетический спектр излучаемых нейтрино, особенно высокоэнергетическая его часть, самым существенным образом зависит от таких деталей солнечных моделей, как температура в центре Солнца и концентрация гелия, т.к. от этих

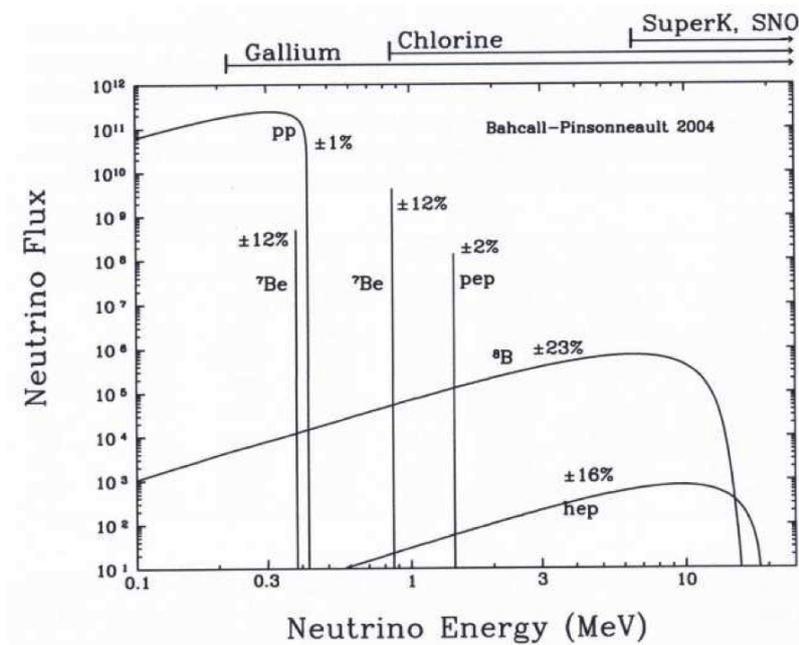


Рис. 8. Спектр солнечных нейтрино

параметров зависит конкуренция между различными ответвлениями реакций водородного цикла.

Энергетический спектр р-р-нейтрино непрерывен от нуля до энергии 0,420 МэВ, рер-нейтрино и бериллиевые Н имеют точно фиксированные энергии 1,44 МэВ для рер и 0,861 и МэВ для Ве-нейтрино соответственно. Борные нейтрино имеют наибольшие энергии: их спектр находится в диапазоне от нулевых энергий до 14,06 МэВ.

Сравнивая вычисленные величины нейтринного потока для стандартной солнечной модели, выполненные Дж. Бакаллом и экспериментальные данные о потоке борных, бериллиевых и р-р нейтрино, мы получим что экспериментальное значение значительно меньше теоретического. Расхождение предсказываемого и измеренного значений может объясняться двумя причинами:

1. более сложными процессами в Солнце, не отраженными в принятых моделях Солнца; эти процессы могут уменьшать поток нейтрино в высокоэнергетической части спектра

2. свойствами нейтрино

1.4. Реакторные нейтрино.

Реакторные нейтрино - это нейтрино искусственного происхождения.

Сейчас интерес к развитию физики реакторных нейтрино очень высок, не только из-за того, что тут фундаментальные причины, но он высок из-за того, что здесь есть практические причины: мониторинг аварийных реакторов (Рис 9).

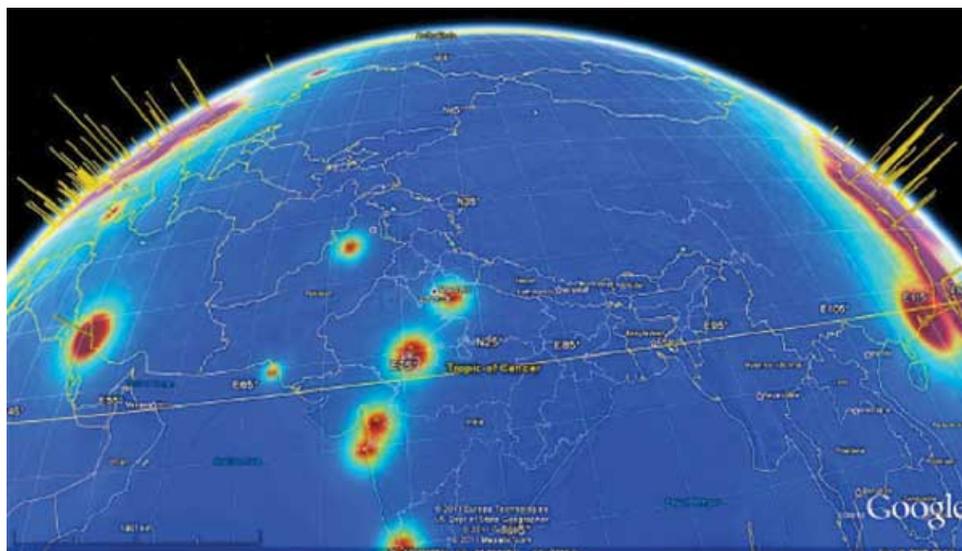


Рис. 9. Нейтрино - инструмент ядерного мониторинга

1.5. Ускорительные нейтрино.

Речь идет о мюонных нейтрино, потому что это связано с энергией, с методиками получения, с первичным пучками. Первичный пучок всегда протонный и благодаря очистки распаду частиц, которые возникают при ядерных реакциях, и очистки их от всех примесей, в конце возникает чистый нейтральный пучок.

Когда говорят об ускорительных нейтрино, всегда имеется в виду нейтрино, целенаправленно получаемые для целей определенного нейтринного эксперимента. В проводимых в настоящее время подобных экспериментах для производства нейтрино используются протонные синхротроны: KEK PS (proton synchrotron) (Япония), FNAL Main Injector, CERN PSP. Как правило, в таких экспериментах происходит образование мюонных нейтрино по следующей схеме: пучок протонов циклически инжектируется в ускорительное кольцо за малый промежуток времени, ускоряется в нем, после чего выводится из кольца и направляется на мишень, а в результате распада образованных адронов, получают мюонные нейтрино.

1.6. Астрофизические нейтрино.

Астрофизические нейтрино — это самая молодая часть нейтринной физики. Это универсальный источник информации.

Нейтринное излучение высокой энергии (50-1000 ГэВ) генерируется в космических объектах и результате столкновений ускоренных частиц из космических лучей с атомными ядрами (p-p-нейтрино) или с низкоэнергетическими фотонами в цепочке распадов заряженных пионов. Идея о возможности регистрации космических нейтрино высоких энергий была впервые выдвинута М.А. Марковым в 1959 году.

Число нейтрино, генерированных в pp-взаимодействии, возрастает с уменьшением энергии, однако основной вклад в сигнал от источника при детектировании дают нейтрино с энергией выше 50 ГэВ. Таким образом, p-p-нейтрино с энергией 50-1000 ГэВ определяют нейтринную астрономию высоких энергий.

Нейтринная астрономия высоких энергий может использовать лишь оптические методы регистрации, при которых максимальный объём детектора ограничен, по видимому, величиной 10^9 м³. При таком объёме возможно детектирование галактических источников и лишь единичных событий от внегалактических источников. К наиболее интересным галактическим источникам нейтрино относятся молодые (до 1 года) оболочки сверхновых и "скрытые источники" — пульсары или чёрные дыры, окружённые большой толщей вещества.

В результате взрыва сверхновой происходит выброс внешней оболочки звезды и в большом числе случаев образование пульсара в центре. Молодые плотные оболочки сверхновых могут содержать частицы высоких энергий, ускоренные в различных пределах.

Нейтринная астрономия высоких и сверхвысоких энергий имеет ряд уникальных возможностей по сравнению с гамма-астрономией, в частности она позволяет исследовать плотные объекты и отдалённые космологические эпохи, недоступные средствам гамма-астрономии.

1.7. Геонейтрино.

Сейчас появился очень большой интерес к тому, что всё-таки у нас под ногами. Изучение геонейтрино может дать нам ответ на вопросы о том, как всё-таки на самом деле устроена наша планета изнутри.

Геонейтрино — это нейтрино или антинейтрино, испускаемые при распаде радионуклидов внутри Земли. Одной из главных задач новой области физики, нейтринной геофизики, является извлечение геологически полезной информации (например, численности отдельных геонейтрино-производящих элементов и их пространственное распределение в земных недрах).

1.8. Нейтринные осцилляции.

В этой теме очень много вопросов и пока она носит религиозный характер, т. е. верю или не верю.

Здесь большая надежда на длиннобазный ускорительный эксперимент (NOVA). Это Фермилабовский эксперимент длиной в 810 км, пропускается через земную кору и дальний детектор находится на границе с Канадой. За полтора года работы (результаты 2014 — 2015 гг.) количество частиц-кандидатов в осцилляции нейтрин-

ных двумя разными методами: одним методом равно 6, а вторым — 11. То есть статистика настолько низкая, что однозначно утверждать ничего нельзя.

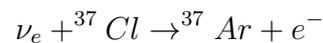
В 2012 году в Рочестере в Соединённых Штатах был проведён эксперимент по передачи информации с помощью нейтрино. В двоичную систему кодируем слово, дальше протонный ускоритель, и формируется нейтринный пучок, и дальше было 2 км скальной породы, здесь ничего не пройдет, кроме нейтрино. Далее нейтринный детектор, раскодировка и читаем сообщение. На передачу одного слова ушло 2.5 часа. Как средство связи, это, конечно, пока нереализуемо, потому что упирается в то самое $\sigma = 10^{-20}$, но перспектива блестящая.

2. Лекция 2. Взаимодействие нейтрино с веществом.

В рамках этой лекции мы поговорим о взаимодействии нейтрино с веществом, а именно на каком уровне оно начинается. Заметим, что речь пойдет о слабо взаимодействующих частицах.

Вопрос, как взаимодействует частица с веществом, поднимался достаточно давно. Первая оценка сечения взаимодействия была выполнена в 1935 году. Майоран получил оценку в 10^{-18} барн.

С формулы обратного бета распада

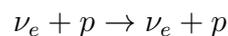


и начинается взаимодействие нейтрино с веществом.

Первый и самый нижний уровень - это взаимодействие с ядрами. И возникает вопрос: "а можно ли рассмотреть еще более низкий уровень взаимодействия? Например, с атомами". Здесь проблема заключается в следующем: наблюдение множественных процессов, когда нейтрино постепенно отдавала свою энергию и уменьшала бы свою энергию, крайне сложно. Мы понимаем, что если сечение маленькое, то даже один акт взаимодействия дорогого стоит. Эти неупругие процессы являются делом только теоретиков, в эксперименте ничего подобного никто не наблюдал.

Нижние уровни (ниже взаимодействия с ядрами) нам просто недоступны: мы, во-первых, не можем их видеть, а, во-вторых, если исходить из тех процессов, которые происходят, то единственный вариант взаимодействия нейтрино с атомом - это взаимодействие с электронными оболочками. Как мы увидим, взаимодействие с электронном возможно, но проблема заключается в том, что оно идет на уровне других энергии, и говорить об атоме, когда энергии частицы сотни ГэВ, крайне тяжело, поэтому первый реальный процесс - это взаимодействие с ядрами.

Здесь можно выделить три процесса. Первый из них, довольно хитрый, заключается в упругом рассеянии нейтрино на ядрах и нуклонах, и этот процесс безусловно идет.



По косвенным факторам вы можете его наблюдать, но, во-первых, очевидно его сечение гораздо ниже, чем сечение остальных процессов, и, во-вторых, его наблюдения крайне затруднено для эксперимента. Это может произойти только в том случае, если у вас возникающая после этого частица каким-то образом внесет изменения в систему и вы это сможете заметить.

Если вы хотите наблюдать процесс, когда нейтрино столкнулось с одиночным протоном, то вероятность того, что при этом действительно было упругое рассеяние, то вероятность того, что вы что-то заметите очень мала.

Второй процесс более интересный — это обратный бета-распад (английская аббревиатура IBD - inverse beta-decay). Он существует в двух вариантах. Мы знаем, что у нейтрино есть античастица, поэтому возможны оба варианта обратного бета-распада: с участием антинейтрино и с участием нейтрино.

Здесь сечение — это не постоянная величина, она очень сильно зависит от энергии и при увеличении энергии частицы, мы видим возрастание сечения. На самом деле, это очень хорошо, потому что если бы такого эффекта не было, то часть частиц, например астрофизического происхождения, была бы для нас недоступна. В такой ситуации мы бы просто бы ничего не измеряли. Мы работали бы с низкоэнергетичными нейтрино, пытались что-то как-то измерить, но с учётом низкого сечения, и на этом всё бы заканчивалось.

Следующее замечание относится к разным разделам физики. Понятия высокие и низкие энергии очень условные. Дело в том, что у нас есть четкое распределение, которым мы обычно пользуемся относящиеся к гамма-квантам и электронам чаще всего. Существует порог в 200 МэВ, после которого мы начинаем говорить, что у нас высокоэнергетические частицы. Но иногда мы говорим о высокоэнергетических частицах с порога рождения пиона. Например, на ускорителе энергия превышает 140 МэВ, то на неподвижных тяжелых мишенях будут рождаться уже нейтральнозаряженные пионы, и после этого можно говорить, что мы в физике высоких энергий.

Если вы говорите о нейтрино, то 200 МэВ - это низкие энергии, более того МэВ-ные нейтрино очень часто называются сверхнизкими.

Начнем мы с реакторных антинейтрино.

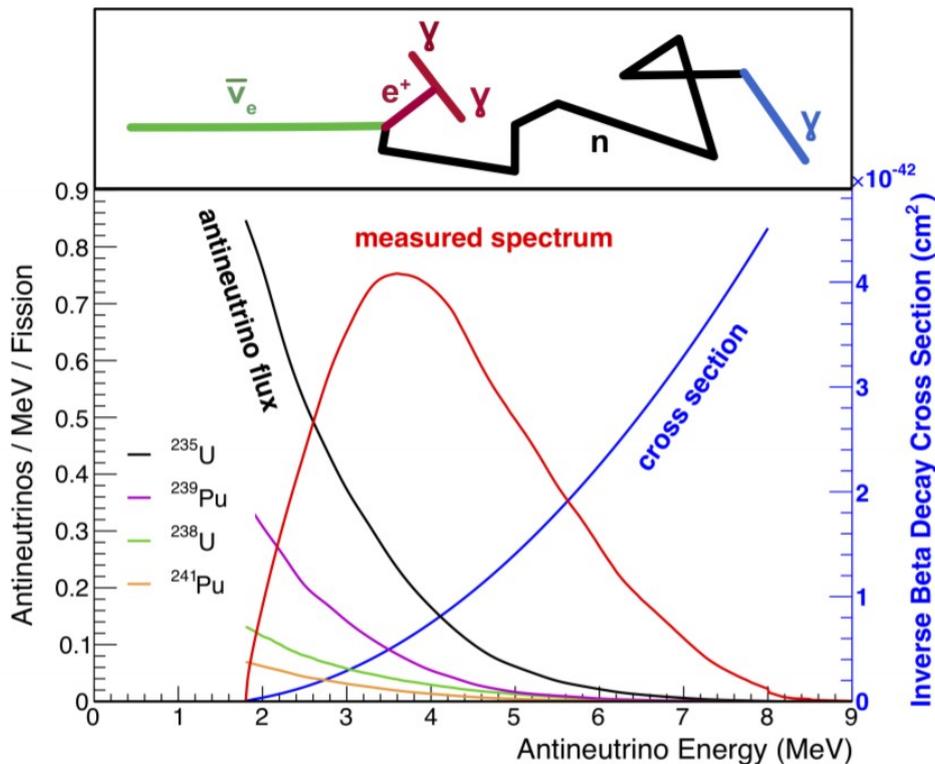


Рис. 11. Спектры частиц

На рисунке 11 черная линия — это сечение и здесь мы впервые наблюдаем за по-

ведением сечения взаимодействия антинейтрино с веществом при низких энергиях.

Сечение всё время возрастает.

На рисунке показано традиционное для нейтрино поведение соотношения потоков и сечений. Видно, что спектр начинает обрываться, а сечение начинает возрастать. То есть ваша задача фактически находить некие кресты, то есть диапазон энергий, где удобнее всего работать, где сечение уже достаточно большое, а потоки ещё достаточно велики.

2.1. Обратный бета-распад.

$$\begin{cases} n + \nu_e \rightarrow e^- + p \\ p + \bar{\nu}_e \rightarrow e^+ + n \end{cases} \quad \sigma = 9 \cdot 10^{-44} e_\nu^2 \text{cm}^2 \text{MeV}^{-2}$$

2.2. Рассеяние нейтрино на электронах.

$$\begin{cases} e^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_e \\ e^+ + \nu_e \rightarrow e^+ + \nu_e \end{cases} \quad \sigma = 8 \cdot 10^{-44} T_{e\nu} \text{cm}^2 \text{MeV}^{-2}$$

Это сложный для наблюдения процесс. Вы можете это видеть через заряженные токи.

2.3. Пороги реакций.

Практически все реакции с нейтрино являются реакциями с порогами, то есть всё что у вас происходит, любые процессы у вас обязательно идут с порогами. На рисунке 12 приведены примеры порогов для взаимодействия электронного нейтрино и любого типа, и редкий процесс упругого взаимодействия с лептонами (это низкий порог).

CC Charged Current Reaction	$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$	$E_{\text{threshold}} = 1.4 \text{MeV}$
NC Neutral Current Reaction	$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$	$E_{\text{threshold}} = 2.2 \text{MeV}$
ES Elastic Scattering Reaction	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	$E_{\text{threshold}} \approx 0$

x denotes that this reaction will take place with any neutrino.

Рис. 12. Пороги реакций

Если мы движемся чуть дальше, то мы можем видеть, что у вас возникают всевозможные процессы связанные с взаимодействием с нуклонами.

2.4. Другие ароматы нейтрино.

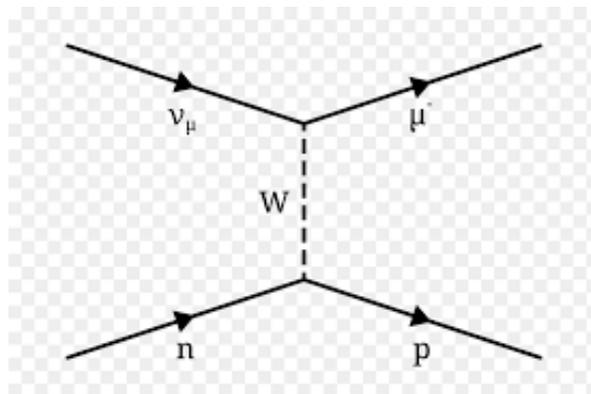


Рис. 13. Мюонное нейтрино

Если мы перейдем к мюонному нейтрино, то по сути ничего не изменится именно в плане диаграмм, в плане характера взаимодействия. Самое же главное, что изменится — это, конечно, изменятся энергетические соотношения.

Обратите внимание, если бы мы сейчас заменили значок μ на e , то у нас образовался бы обычный, совершенно нормальный обратный бета-распад, который, естественно, тоже имеет свой небольшой порог.

Но здесь все сильно меняется, в плане энергетических соотношений, потому что эта частица имеет массу 105 МэВ и у вас сразу становится понятно, что энергия нейтрино для такого взаимодействия должна прыгать далеко за сотню МэВ, чтобы у вас этот процесс шел.

То есть эти процессы благополучно идут, но пороги, конечно, совсем другие.

2.5. Обратный мюонный распад.

На рисунке 14 пример очень хитрого обратного, так называемого, мюонного распада.

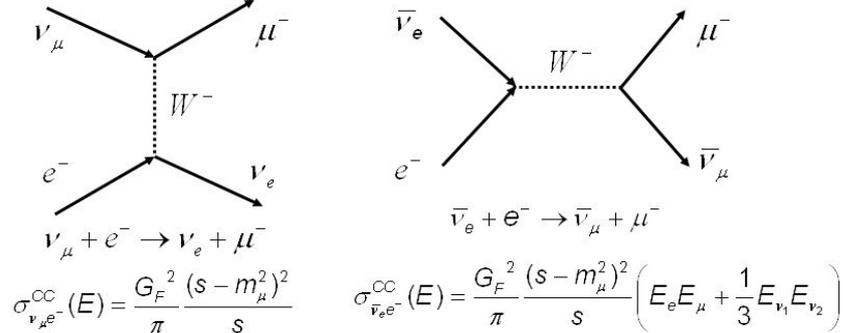
Происходит конвертация частиц: мюонное нейтрино превращается в электронное, электрон превращается в мюон. Тут порог будет достаточно большой, причём он будет значительно больше, чем масса мюона.

На рисунке 15 мы видим моделирование и на рисунке 16 описание к нему, которое описывает процесс взаимодействия мюонного нейтрино с ядром C^{12} , и образование мюона и ядра N^{12} .

То есть у вас идёт ядерный процесс, фактически трансмутация за счёт взаимодействия с нейтрино другого совершенно типа. Энергия нейтрино имеет в данном случае чёткий порог, порог заезжает за 127 МэВ, то есть ниже такой процесс естественно не пойдёт. Сечение очень быстро растёт, и при энергии где-то порядка 150-160 МэВ, выходит ходит на постоянное значение $7 \cdot 10^{-17}$ барн. То есть если ли

Inverse Muon Decay

- Charged current processes:



- Cross-section $\sim 1.7 \times 10^{-41} E(\text{GeV}) \text{ cm}^2$, threshold = 11 GeV
- We cannot distinguish between the two channels so we measure $N_1(E) + N_2(E)$:

$$N_1(E) = \phi_{\nu_\mu e^-}(E) \sigma_{\nu_\mu e^-}^{CC}(E) \quad N_2(E) = \phi_{\bar{\nu}_e e^-}(E) \sigma_{\bar{\nu}_e e^-}^{CC}(E)$$

Near Detector workshop,
CERN, 30 July 2011

5

Рис. 14. Обратный мюонный распад

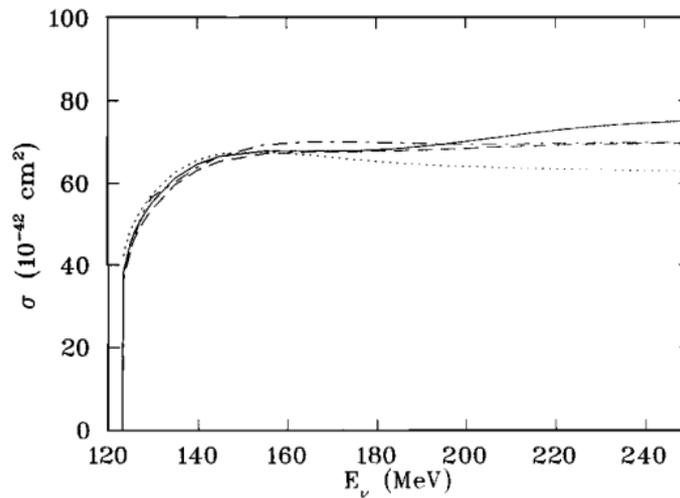


FIG. 2. Cross section for $^{12}\text{C}(\nu_\mu, \mu) ^{12}\text{N}_{\text{g.s.}}$ as a function of the ν_μ energy, in units of 10^{-42} cm^2 . The notation is as in Fig. 1.

Рис. 15.

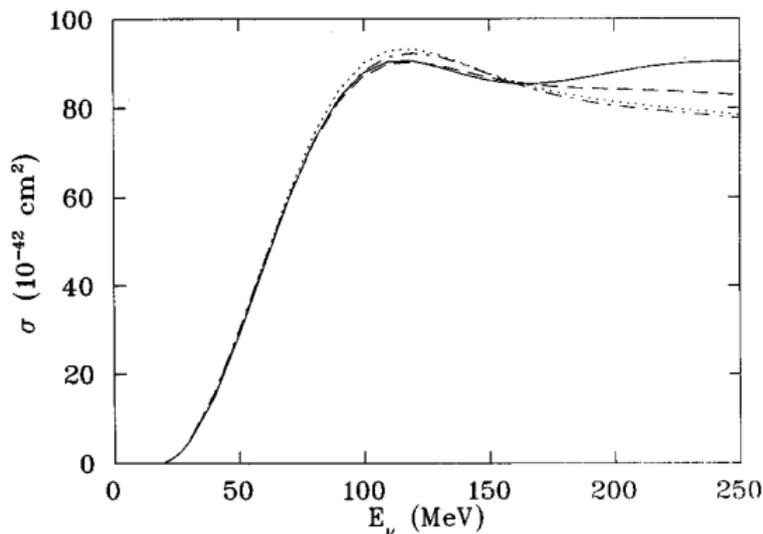


FIG. 1. Cross section for $^{12}\text{C}(\nu_e, e)^{12}\text{N}_{\text{g.s.}}$ as a function of the ν_e energy, in units of 10^{-42} cm^2 . The full line is for the shell model with one-body densities from line 2, Table I, the dashed line is the modified Cohen-Kurath one-body densities from line 5, Table I [17] (the curves for the other shell-model variants are very similar and are not shown), the dot-dashed line is for the RPA [7], and the dotted line is for the EPT.

Рис. 16.

у нас стандартное значение сечения для энергии составляет $10^{-20} - 10^{-1}$, то, когда вы переходите в области 200 МэВ и выше, у вас в сечение возрастает на несколько порядков.

На рисунке 17 мы видим поведение потоков при широком диапазоне энергий.

Чем выше у нас энергия, тем меньше потоки.

2.6. Изменение сечения реакций.

На рисунке 18 мы видим, что возрастание сечения очень сильное. Где-то в районе 10^{-20} барн у нас начинается очень быстрый подъём.

Если вы уходите в энергию значительно больше 1 ГэВ (Рис. 19), то необходимо помнить еще об одной вещи: если, когда мы говорим об обратном бета-распаде, у вас все процессы сводятся к взаимодействию с образованием единичных частиц, то при больших энергиях у вас начинается уже трогаться внутренняя структура наклона. У нас образуются адронные струи, то есть у вас образуется большое количество новых частиц.

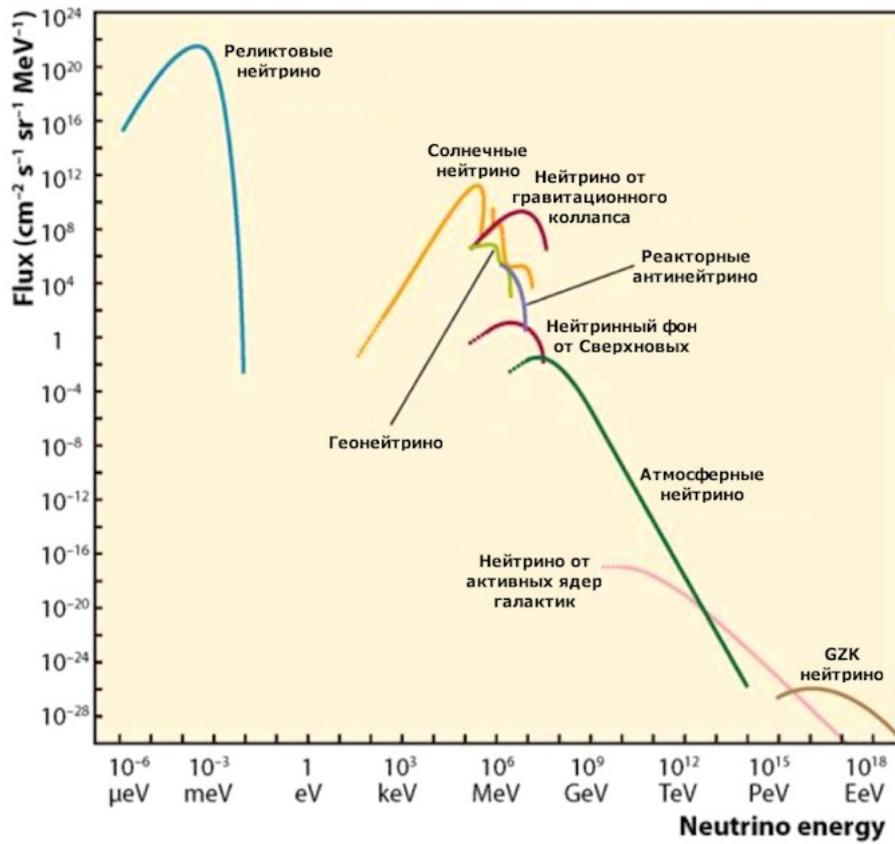


Рис. 17. Спектр нейтрино

У нас сейчас нет возможности сделать самое главное — это восстановить траекторию частицы.

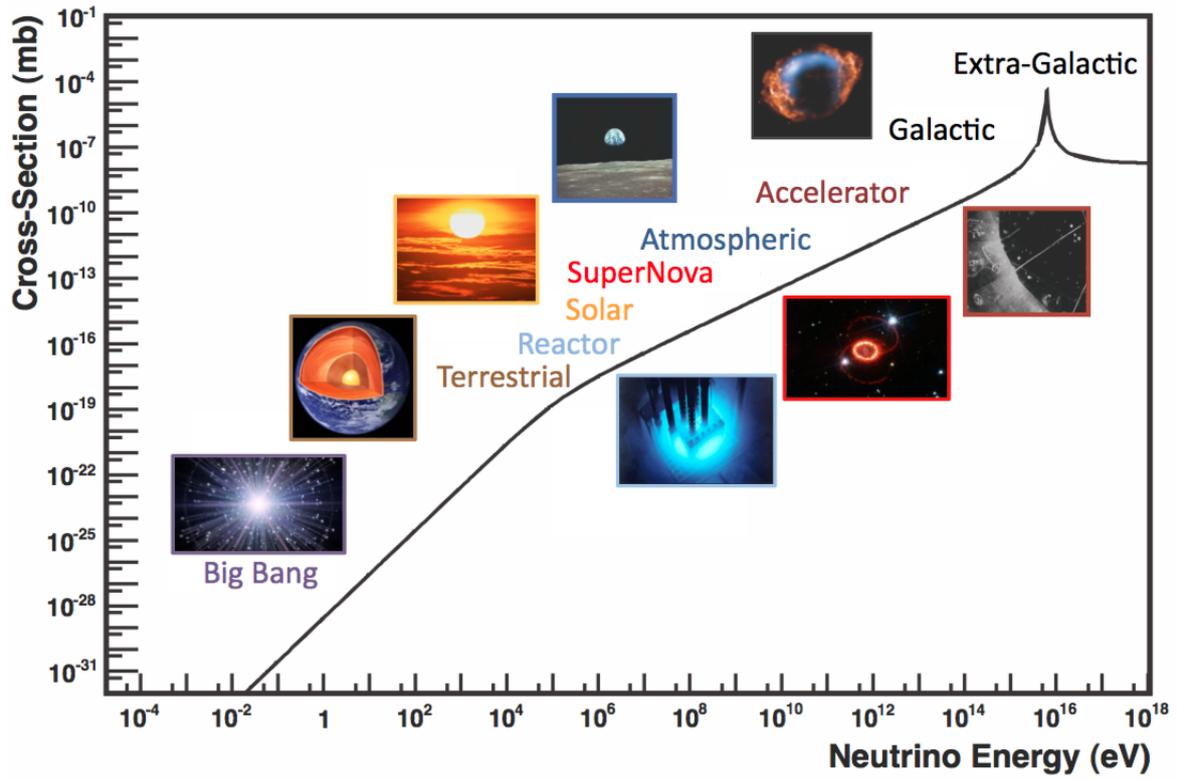


Рис. 18.

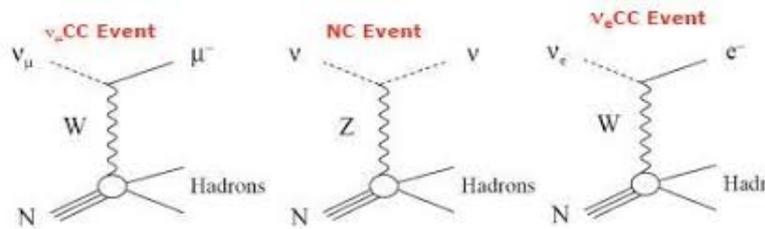


Рис. 19.

3. Лекция 3. Слабое взаимодействие.

3.1. Слабое взаимодействие.

Третий важный в физике частиц вид взаимодействия (помимо сильного и электромагнитного) - слабый. Радиус слабых сил очень мал (10^{-16} см). Слабое взаимодействие осуществляется обменом промежуточными бозонами W , Z . В слабых взаимодействиях участвуют лептоны и кварки (адроны).

Несмотря на "слабость" слабого взаимодействия его роль в нашем мире и в физике велика. Оно выделяется, во-первых, экзотичностью. Многие законы сохранения нарушаются именно слабыми силами. Кроме того, без слабых сил не светило бы Солнце. Ключевым процессом, открывающим цепочку ядерных реакций на Солнце и в других звездах, является реакция идущая за счет слабых сил.

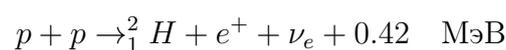
3.2. Частицы, участвующие в слабом взаимодействии.

Одним из признаков слабого взаимодействия является появление нейтрино (антинейтрино). Эти частицы входят в группу лептонов - точечных фундаментальных фермионов со спином $1/2$, не участвующих в сильных взаимодействиях (в них не участвуют также кванты слабого поля W , Z и квант электромагнитного поля - фотон). Характеристики лептонов даны в табл.12.1. Характеристики антилептонов получаются изменением знаков всех зарядов и заменой в схемах распада частиц на античастицы.

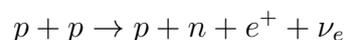
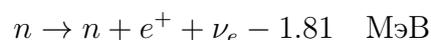
Лептонный заряд или лептонное квантовое число было введено в физику частиц в 1955 г., когда появились эксперименты, указывающие на нетождественность.

3.3. Проявления и особенности слабого взаимодействия.

Ключевая термоядерная реакция на Солнце



идет за счет слабых сил.



Главная особенность слабого взаимодействия: несохранение одного (или больше) квантовых чисел. Основные законы сохранения (энергии, импульса, зарядов) выполняются.

Рассмотрим кварк-лептонную диаграмму распада нейтрона (Рис. 21).

Она сводится к диаграмме распада d -кварка.

Видно, что заряженные слабые токи меняются ароматы кварков.

К другой особенности слабого взаимодействия относится малость константы взаимодействия, и малый радиус взаимодействия, и малый радиус взаимодействия, что в большинстве случаев приводит к малому сечению.

Лептоны и их характеристики

Дублет	Название	Символ		Масса		L	Время жизни (с)
		частица	античастица	в m_e	МэВ		
1	Электрон	e^-	e^+	1	0,511	± 1	стабильно
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	$0(1,4 \cdot 10^{-5})$	± 1	стабильно
2	Мюон	μ^-	μ^+	207	105,66	± 1	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	$0(<0,25)$	± 1	стабильно
3	Таон	τ^-	τ^+	3492	1784	± 1	$<4 \cdot 10^{-13}$
	Таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	$0(<0,35)$	± 1	стабильно

Рис. 20. Лептоны

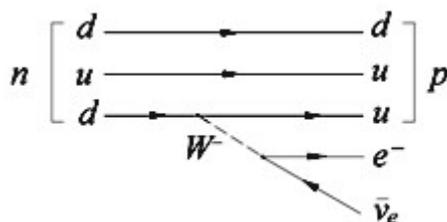


Рис. 21. Диаграмма распада нейтрона

3.4. Лептонные числа.

Лептонное число (лептонный заряд) — аддитивное квантовое число, которое сопоставляется каждому поколению лептонов. Лептонам приписывается лептонное число $L = +1$, антилептонам — $L = -1$.

У частиц не являющихся лептонами лептонные числа равны 0. Лептонное число системы частиц равно алгебраической сумме лептонных чисел входящих в нее частиц.

Однако с теоретической точки зрения нет весомых аргументов считать, что законы сохранения лептонных чисел являются абсолютно строгими законами сохранения.

Лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

Во всех процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий лептонные числа L_e, L_μ, L_τ сохраняются порознь. Поэтому:

Наблюдаются процессы:

$$\begin{aligned} \tilde{\nu}_\mu + p &\rightarrow e^+ + n \\ \nu_\mu + n &\rightarrow \mu^- + p \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu \\ \tau^- &\rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau \\ \tau^- &\rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau \end{aligned}$$

Не наблюдаются процессы:

$$\begin{aligned} \mu^- &\rightarrow e^- + \gamma \\ \nu_\mu + p &\rightarrow \mu^+ + n \\ \nu_\mu + n &\rightarrow e^- + p \end{aligned}$$

Рис. 22. Лептонные числа

3.5. Классификация процессов слабого взаимодействия.

Обратный процесс

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+) = \frac{G^2}{\pi} |M|^2 \frac{p^2}{v_i v_f}$$

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n) \simeq 10^{-43} E^2 \text{cm}^2$$

3.6. Константа слабого взаимодействия.

Сильный распад: $a_s \approx 1$ (Рис. 23):

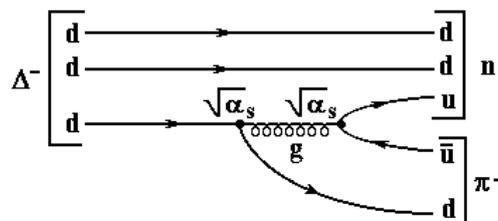


Рис. 23.

Слабый распад: $a_w \approx ?$ (Рис. 24):

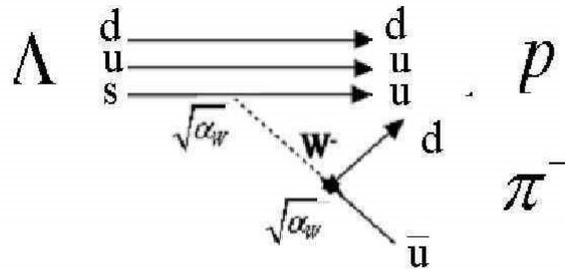


Рис. 24.

Для двухузловой диаграммы имеем:

$$\tau = \frac{1}{\text{вероятность}} \sim \frac{1}{a^2}$$

и получаем:

$$\frac{\tau(\Delta^-)}{\tau(\Sigma^-)} = \left(\frac{a_w}{a_s}\right)^2 = \frac{10^{-23}\text{сек}}{1.5 \cdot 10^{-10}\text{сек}} \approx 10^{-13}$$

$$a_w \approx 10^{-6}$$

Насколько слабо слабое взаимодействие?

Константа Ферми:

$$G_F = \frac{\sqrt{2}g_w^2}{8M_W^2} = 1.166 \cdot 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$$

$$M_W = 80.4 \text{GeV}$$

$$g_w = 0.65$$

$$\Rightarrow a_w = \frac{g_w^2}{4\pi} = \frac{1}{29}$$

3.7. Создание теории электрослабого взаимодействия.

Электрослабое взаимодействие — взаимодействие, объединяющее электромагнитное и слабое взаимодействия и описываемое в рамках единой теории. Модель электрослабого взаимодействия была сформулирована в 1967 г.

С. Вайнбергом, Ш. Глэшоу и А. Саламом с использованием механизма Хиггса.

Частицами-переносчиками электрослабого взаимодействия являются два заряженных бозона W^+ и W^- , имеющие массы $m(W^+) = m(W^-) = 80.4 \text{ ГэВ}$ и два нейтральных бозона — Z и γ -квант. Z -бозон имеет массу $m(Z) = 91.2 \text{ ГэВ}$. Фотон имеет нулевую массу. Появление масс у W^{\pm} - и Z -бозонов обусловлено спонтанным нарушением калибровочно симметрии в результате взаимодействия W^{\pm} - и Z -бозонов с

полем Хиггса. Массы W^\pm - и Z-бозонов были предсказаны в модели электрослабых взаимодействий и выражаются через константу Ферми G_F и угол Вайнберга θ_W .

$$m(W^\pm) = \frac{1}{\sin \theta_W} \left(\frac{\pi \alpha}{\sqrt{2} G_F} \right) = \frac{37/3}{\sin \theta_W} \text{ ГэВ}$$

$$m(Z) = m(W^\pm) / \cos \theta_W$$

$\alpha = 1/137$ — постоянная тонкой структуры.

Значение угла Вайнберга может быть извлечено из независимых экспериментов по упругому рассеянию мюонных нейтрино на электроны. Полученное значение $\sin^2 \theta_W = 0.215$ хорошо согласуется с предсказаниями модели электрослабых взаимодействий и является её подтверждением.

Наблюдение слабого тока (1973 г.)



Рис. 25. Наблюдение слабого тока

3.8. Открытие промежуточных бозонов.

В качестве современного субатомного эксперимента, сочетающего достижения в ускорительной технике и технике детектирования частиц, мы в данном разделе опишем эксперимент в ЦЕРНе по поиску, так называемых, промежуточных бозонов W^\pm

и Z, завершившийся их открытием в 1983 г. С точки зрения фундаментальной физики это событие имело исключительно важное значение. Дело в том, что бозоны W^\pm и Z являются частицами, "реализующими" слабое взаимодействие. В соответствии с современными представлениями любое фундаментальное взаимодействие (этих взаимодействий, как известно, четыре – сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное) осуществляется обменом соответствующими бозонами (т.е. частицами с целым спином) или квантами полей - сильное взаимодействие осуществляется обменом безмассовыми глюонами (их спин 1, они открыты в 1973 г.), электромагнитное – безмассовым фотоном (спин 1), слабое – массивными промежуточными бозонами W и Z (спин 1) и гравитационное – безмассовым гравитоном (спин 2, гравитон пока не наблюдался).

W- и Z-бозоны как переносчики слабого взаимодействия были предсказаны в 60-е годы прошлого века С. Вайнбергом, Ш. Глэшоу и А. Саламом в их электрослабой теории, объединившей электромагнитное и слабое взаимодействие. Предсказанные массы W- и Z-бозонов были соответственно в районе 80 и 90 ГэВ/ c^2 . В 1976 г. Д. Клайн, П. Макинтайр и К. Руббиа предложили для поиска W- и Z-бозонов построить в ЦЕРНе новый ускоритель (ни один ускоритель в мире в то время не обладал энергией, достаточной для рождения частиц столь большой массы) и в 1981 г. такой ускоритель в ЦЕРНе был создан под руководством С. Ван дер Меера. Этот ускоритель (суперсинхротрон) представлял собой протон-антипротонный коллайдер с энергиями сталкивающихся частиц по 270 ГэВ (в дальнейшем энергии частиц были увеличены до 315 ГэВ).

W^\pm – и Z-бозоны были открыты в экспериментах, выполненных на ускорителе ЦЕРНа на встречных протон-антипротонных пучках.

Образование W^\pm – и Z искали в инклюзивных процессах типа:

$$\bar{p} + p \rightarrow W^\pm + X$$

и

$$\bar{p} + p \rightarrow Z + X$$

где X – совокупность других частиц.

Образование W^+ происходит в результате столкновения u-кварка протона с \bar{d} -антикварком антипротона. Образующийся W^+ -бозон затем регистрируется по одному из характерных каналов распада

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$$

Такой канал распада позволяет выделить образование W^+ из большого фона адронов, образующихся при столкновении антипротон $p\bar{p}$. Один из возможных каналов образования и распада W^+ -бозона показан на рис

рисунок а40-4

$$\bar{p} + p \rightarrow e^+ + \nu_e + \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

Величина сечений реакций образования W^\pm и Z при энергии сталкивающихся $p\bar{p}$ пучков 2×270 ГэВ составляла 1 нб или 10^{-8} от полного сечения $p\bar{p}$ взаимодействия.

В первом эксперименте было зарегистрировано около 10 событий на 10^9 событий $\bar{p}p$ столкновений.

Были также с большой точностью измерены разности масс W^+ - и W^- -бозонов и W - и Z -бозонов.

$$m(W^+) - m(W^-) = -0.2 \pm 0.6 \text{ ГэВ}$$

$$m(W) - m(Z) = 10.85 \pm 0.15 \text{ ГэВ}.$$

Особый интерес для определения числа поколений кварков и лептонов представляют измерения ширин различных каналов распада Z -бозона. Точное знание величины ширины распада Z -бозона важно для определения числа поколений кварков и лептонов.

4. Лекция 4. Спектр солнечных нейтрино.

4.1. Методы регистрации нейтрино.

Перед тем, как рассмотреть существующие способы детектирования нейтрино, выделим характерные особенности и проблемы, возникающие во время этого процесса.

Поток нейтрино, детектируемых на Земле, характеризуется тем, что:

1) можно выделить несколько типов нейтрино по энергии, соответственно различаются и методы детектирования, наиболее чувствительные к разным типам нейтрино;

2) поток почти беспрепятственно пересекает вещество, включая Землю, поэтому нейтрино долетают до детектора как днем – сверху, так и ночью – со стороны Земли. К тому же поток не отклоняется магнитными полями, а, следовательно, можно точно определить его источник;

3) поток имеет относительно слабую интенсивность по сравнению с другими частицами.

Для большинства нейтринных детекторов справедливо следующее:

1) каждый детектор приспособлен для детектирования одного типа нейтрино – это как правило нейтрино определенного типа(ов) от определенного источника;

2) детекторы находятся глубоко под Землей (примерно 1 км) или под водой для защиты от фонового излучения; защита необходима от существующих источников нейтрино на Земле, а также естественного радиационного фона Земли;

3) детекторы имеют большие размеры для набора достаточной статистики в виду малого сечения взаимодействия нейтрино и, соответственно, сравнительно малое число регистрируемых событий; типичное значение - от нескольких сотен или до нескольких тысяч в год. Скорость захвата нейтрино зависит от реакции детектирования и от энергии нейтрино.

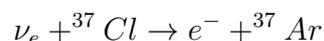
4) одной из важнейших задач в процессе проектирования, установки и настройки детектора является борьба с фоном; для этого, в частности, необходимо выполнить следующие действия:

а. многослойное экранирование детектора от внешних излучений, в частности атмосферных мюонов,

б. обеспечение радиационной чистоты используемых материалов, детектирующего вещества, детектирующего оборудования, в частности ФЭУ.

4.2. Радиохимический метод.

Принципиальная схема радиохимического метода детектирования нейтрино на примере реакции с хлором была предложена Понтекорво в 1946 г. В ее основе лежит реакция:



Хлорный детектор является жидкостным, т.е. он заполнен жидким хлорсодержащим веществом.

В методе Понтекорво нейтрино захватывается атомом ${}^{37}\text{Cl}$ с образованием ${}^{37}\text{Ar}$ радиоактивного изотопа, который опять превращается в ${}^{37}\text{Cl}$ по каналу обратного бета-распада со временем полураспада 35 суток.

При захвате ${}^{37}\text{Ar}$ атомарного К- или L- атомарного электрона на освободившееся место переходят электроны внешних оболочек, что приводит к испусканию оже-электронов с определенными энергиями и рентгеновскому излучению.

Т.к. аргон является благородным газом, то он не вступает в реакцию с другими веществами и поэтому легко выделяется из смеси. Полученный аргон Понтекорво предполагал извлекать при помощи продувки четыреххлористого углерода CCl_4 и последующим подсчетом атомов ${}^{37}\text{Ar}$ в газоразрядном счетчике. Понтекорво рассматривал 2 возможных источника нейтрино: ядерные реакторы и Солнце, — как возможные объекты экспериментального исследования.

Пороговая энергия реакции захвата составляет 0,814 МэВ. Отсюда вытекает ограниченность применения данного метода при исследованиях солнечных нейтрино, позволяющего детектировать только «борные» и «бериллиевые» нейтрино, поток которых существенно меньше потока «р-р» нейтрино.

Первый эксперимент с использованием данной реакции в 1949 г. был предложен Л. Альваресом (Нобелевский лауреат 1969 г.). В качестве источника ${}^{37}\text{Cl}$ предполагалось использовать концентрированный раствор хлорида натрия NaCl . Однако этот эксперимент так и не был осуществлен.

После этого созданием хлорного детектора занялся Р. Дэвис мл. Первым удавшимся экспериментом, основанным на реакции Понтекорво был эксперимент по исследованию тождественности нейтрино и антинейтрино.

Следующим опытом с данной реакцией стала серия экспериментов по поиску солнечных нейтрино, также проведенных Дэвисом. В этих экспериментах был использован детектор, заполненный перхлорэтиленом C_2Cl_4 . Возникший в результате реакции радиоактивный аргон извлекался с помощью продувания через бак с газообразным гелием. Затем аргон вымораживался охлаждением до сверхнизкой температуры (77 К) и адсорбировался активированным углем. После этого атомы аргона регистрировались по их радиоактивному распаду с помощью пропорциональных счетчиков.

Достоинством данного метода является относительная дешевизна основного компонента детектора – перхлорэтилена (это жидкость, используемая для химической чистки одежды).

4.3. Сцинтилляционный метод.

Основной реакцией такого детектора является реакция рассеяния нейтрино на электронах:

$$e^{-} + \bar{\nu} = e^{-'} + \bar{\nu}'$$

Основным отличием является то, что в качестве вещества детектора используется ультрачистая сцинтилляционная жидкость. Детектирование же происходит во вспышкам в сцинтилляторе, вызываемым электроном рассеяния.

Преимуществом сцинтилляционной технологии является ее высокая светимость: она превышает примерно в 50 раз светимость черенковского излучения и она чувствительна к событиям с энергиями вплоть до 50 КэВ. Поэтому энергетический порог сцинтилляционного детектора можно сделать ниже, чем порог черенковского детектора. В частности, с помощью сцинтилляционного детектора Bogexino предполагается детектирование бериллиевых нейтрино (0,861 MeV).

Недостатком данного способа детектирования является невозможность определить направление движения исходного нейтрино по направлению движения образовавшихся сцинтилляционных фотонов, более высокая стоимость вещества детектора. А в случае детектирования низкоэнергетичных нейтрино кроме того налагаются более строгие требования к радиационной чистоте материалов, используемых для построения детектора.

4.4. Черенковский метод.

Черенковский детектор принципиально отличался от предыдущих тем, что основным процессом является рассеяние солнечных нейтрино на электронах воды (как правило – обычной легкой H₂O). В результате столкновения нейтрино с каким-либо атомом, входящим в состав воды, из атомной оболочки вылетает электрон, создавая в воде черенковское излучение свечение темно-голубого цвета.

$$e^{-} + \bar{\nu} = e^{-'} + \bar{\nu}'$$

Регистрация образовавшихся фотонов и позволяет получить информацию о нейтринном событии. Данный способ детектирования является прямым, т.к. фиксируется непосредственно выбивание электрона. Этим он отличается от, например, радиохимических методов (Homestake, GALLEX, ...), продукты основной реакции которого не фиксируются, а факт взаимодействия определяется путем сложных химических методов, требующих большого времени и не дающих информации о направлении движения первоначального нейтрино.

Такая методика позволяет регистрировать все ароматы нейтрино, но максимально она чувствительна к электронным нейтрино. Ее достоинство заключается в том, что можно определить достаточно точно, откуда прибыло нейтрино, так как вылетевший электрон сохраняет направление движения нейтрино.

Граничная энергия регистрируемых нейтрино для данного способа находится в районе 5-8 MeV в зависимости от строения детектора. Граничная энергия опреде-

ляется тем, что выбитый из атома электрон должен лететь со скоростью, большей скорости света в воде для того, чтобы излучать черенковское свет.

Немаловажным достоинством данного метода является дешевизна основного вещества детектора - воды, причем вода в установке выступает как в качестве мишени, так и в качестве детектора. Использование воды приводит к низкому фону, т.к. не представляет сложности найти достаточное ее количество с минимальной концентрацией радиоактивных веществ. Детектирование по черенковскому излучению позволяет легко отсеять все фоновые события, связанные с альфа-частицами низких энергий.

Кроме того, эксперименты по рассеянию позволяют точно определить время прилета частицы, что имеет важное значения в случае нестационарного источника нейтрино для поиска корреляций нейтринных событий с характеристиками этого источника.

Энергетическое распределение вылетающих электронов в реакции в определенной степени отражает спектр падающих нейтрино. Это имеет значение при детектировании солнечных нейтрино с целью подтверждения ССМ. Согласно данной модели существуют несколько типов солнечных нейтрино, различных по своему спектру и интенсивности. Этим реакции по рассеянию также выгодно отличаются от радиохимического метода детектирования, позволяющего определить только скорость счета нейтрино.

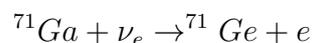
Но у данного метода есть и свои недостатки. Нет точного способа определить, было ли вызвано регистрируемое событие нейтрино или другой нейтральной частицей, способной рассеяться на электроны. Необходимость уменьшения фона является еще одной причиной высокой пороговой энергии черенковского детектора. Поэтому из всего спектра солнечных нейтрино черенковский детектор чувствителен только к борным и гер-нейтрино.

Этот факт, а также то, что получающееся эффективное сечение рассеяния нейтрино мало по сравнению с эффективным сечением поглощения на наиболее подходящих поглотителях, приводит к низкой скорости счета нейтрино.

4.5. Радиохимический метод. Галлиевый детектор

Для регистрации низкоэнергетичных нейтрино можно было воспользоваться тем, что при взаимодействии низкоэнергетичных нейтрино с атомом галлия образуется атом германия. Однако галлий — редкий и дорогой металл, его мировая добыча невелика, а для получения надежных результатов детектор должен был бы содержать примерно 40 тонн этого элемента. Поэтому галлиевые детекторы появились значительно позднее.

В 1966 году молодой теоретик из Института ядерных исследований В. Кузьмин, руководствуясь идеей Понтекорво, указал на то, что реакция поглощения нейтрино изотопом галлия ^{71}Ga с образованием радиоактивного германия идет с порогом всего лишь 0,233 МэВ.



В реакции образуется радиоактивный изотоп ^{71}Ge с $T_{1/2} = 11.4$ дней, который

химическими методами переводится в GeH_4 . А после этого число атомов германия измеряется пропорциональным счетчиком. Таким образом общая схема эксперимента в точности повторяет схему опыта, предложенного Б. Понтекорво.

Галлиевый детектор имеет очень низкий порог регистрации нейтрино (233 кэВ) и поэтому он чувствителен ко всем типам солнечных нейтрино, в том числе и к основному потоку солнечных нейтрино – р-р нейтрино.

Работающие галлиевые детекторы появились в только 90-х годах – это детекторы GALLEX, SAGE и GNO.

4.6. Акустический метод.

Сейчас наиболее развитыми методами регистрации нейтрино являются черенковский (в оптическом, ультрафиолетовом и радио диапазоне), использующий эффект Вавилова-Черенкова от заряженных частиц – результата взаимодействия нейтрино, сцинтилляционный и радиохимический, регистрирующий ядерную реакцию бета-распада.

Однако эти методы применимы не для всех энергий и имеют свои ограничения. На данный момент существуют альтернативные способы, которые, возможно, могли бы расширить диапазон и повысить эффективность регистрации нейтрино. На рисунке 26 представлены области энергий, в которых сейчас работают некоторые нейтринные телескопы, и видно, что акустический метод может быть особенно важным и полезным для детектирования высокоэнергетичных нейтрино и исследования эффекта ГЗК-обрезания, а также происхождения нейтрино с такой энергией и проверки космологических теорий.

Устройства для регистрации акустических импульсов (волн плотности и давления) в воде называются гидрофонами. Их задача – преобразовать энергию волны в цифровой сигнал и в конечном итоге – в информацию об этой волне. Основными характеристиками, которые интересуют нас при регистрации нейтрино, являются амплитуда акустического импульса и плоскость распространения волны. Из этих данных можно найти энергию, оставленную в воде каскадом, направление его прихода и, соответственно, энергию и направление первоначального нейтрино.

Наиболее разработанной и применяемой сейчас является технология регистрации импульсов давления пьезоэлементами, которые при включении их в электрическую цепь дают импульс тока в этой цепи из-за деформации и поляризации кристалла (или некристаллического пьезоэлемента). Импульс тока проверяется триггерами и записывается в виде цифрового сигнала.

Гидрофоны на этом принципе используются в военных целях для локации и навигации. Они недорогие в изготовлении, обладают хорошей чувствительностью, но их недостатком является наличие внутреннего шума от электроники в той цепи, в которую включен пьезоэлемент, а также то, что такую электронику нужно монтировать в каждом гидрофоне, что не очень удобно при работе на большой глубине или во льду.

Вторым типом регистрирующих устройств являются оптоволоконные гидрофоны. Это новая технология, которая пока еще тестируется в лабораториях и не применялась в реальных акустических нейтринных детекторах. Принцип работы за-

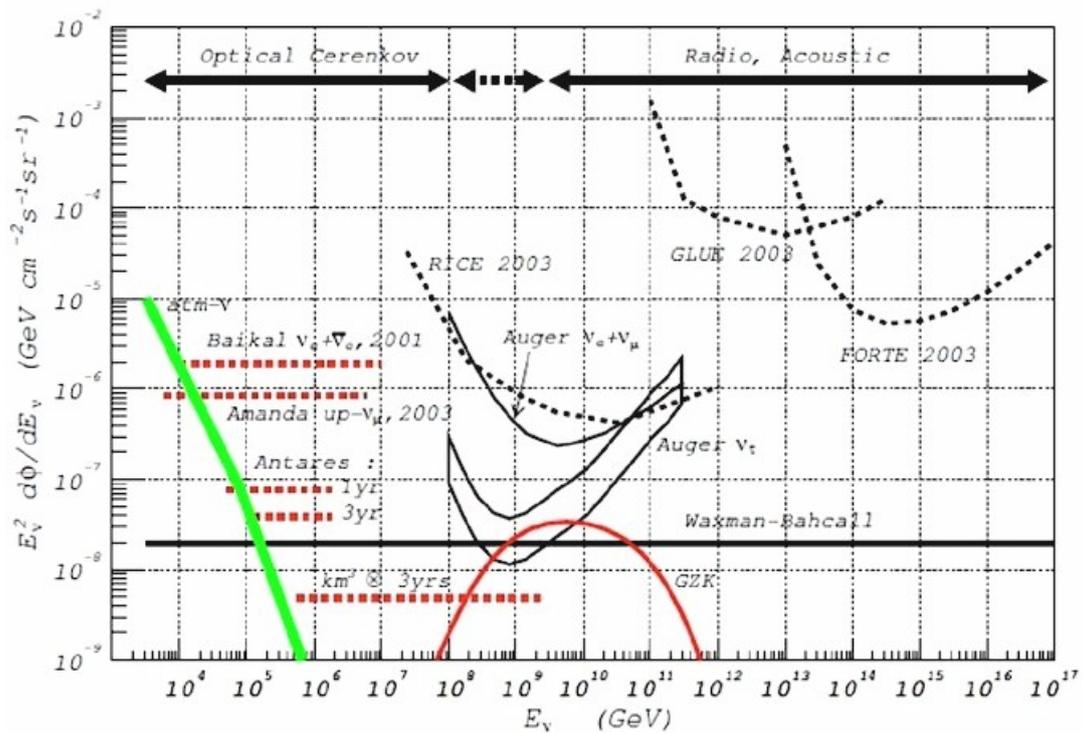


Рис. 26. Диапазоны работы современных нейтринных детекторов.

ключается в том, что на упругий деформируемый цилиндр намотано оптоволокно, а этот цилиндр в свою очередь надет на жесткий каркас. Оптоволоконная катушка гидрофона соединена таким же светопроводом с импульсным лазером, который запускает по волокну импульсы с периодом, за который каждый отдельный импульс проходит туда и обратно всю длину гидрофона. На входе гидрофона и другом его конце стоят зеркала Брэгга, от которых частично отражаются лазерные импульсы. Отраженные импульсы регистрируются фотоприемником и в недеформированном состоянии отраженный от дальнего конца гидрофона импульс должен прийти на приемник в фазе со следующим, отраженным от зеркала на входе.

Волна давления деформирует упругий цилиндр, в результате чего меняется световой путь в оптоволокне и возникает интерференция между импульсами. Регистрируя ее, можно получить данные о степени деформации оптоволоконки и амплитуде акустической волны. Для определения направления и плоскости, в которой распространяется акустический сигнал, необходимо иметь массив гидрофонов.

Основным преимуществом устройств такого типа является отсутствие дополнительной электроники возле каждого гидрофона. На светопровод, в который запускаются лазерные импульсы, можно ставить несколько гидрофонов, что значительно облегчит создание массивов и уменьшит стоимость детектора. Также отсутствуют связанные с электроникой шумы.

Так как акустический метод находится на стадии разработки и кажется перспективным, то некоторые нейтринные телескопы включают акустическую технику вместе с другим, например, черенковским, детектором.

Одна из основных проблем для развития акустического метода регистрации ней-

трино – это отсутствие экспериментально проверенной теоретической модели для расчета. Сейчас мы лишь качественно представляем себе процессы выделения тепла в результате ионизации каскадом, и как параметры распределения источников тепла в среде связаны с параметрами первоначального нейтрино. Как именно информация о первоначальном нейтрино переходит в параметры акустического сигнала. Поэтому в каждом конкретном случае алгоритмы извлечения информации о нейтрино модифицируются и не описываются подтвержденной теорией.

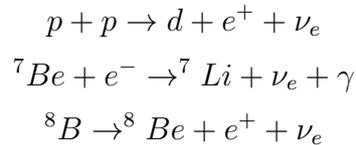
Другая проблема связана с малой статистикой, так как собирать данные начали совсем недавно. Планируемые в будущем проекты акустических нейтринных телескопов, а также гибридных детекторов, могут решить эту проблему.

Если получится совместить карту направлений прихода нейтрино, полученную оптическими черенковскими телескопами с тем распределением, которое дает акустический метод, то это поможет с большей вероятностью определить источники нейтрино во Вселенной, а также даст ценную информацию для калибровки акустических детекторов и построения соответствующей теории.

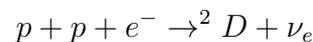
5. Лекция 5. Методы регистрации нейтрино.

5.1. Солнечные нейтрино.

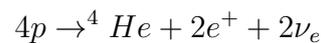
Наблюдаемая светимость Солнца обеспечивается ядерной энергией, выделяющейся в водородном (p-p) цикле. В реакциях:



водородного цикла испускаются нейтрино, называемые соответственно p-p, бериллиевые и борные нейтрино. Помимо них имеются ещё pep-нейтрино, образующиеся при одновременном столкновении двух протонов и электрона:



Если Солнце светит стационарно, то предсказываемое полное количество нейтрино, испускаемое в 1 с, не зависит от модели Солнца. Действительно, в любом варианте протекания реакции четыре протона превращаются в ядро гелия:



и освобождается $Q=26,7$ МэВ ядерной энергии (образующиеся при синтезе позитроны аннигилируют, увеличивая энерговыделение для всех цепочек до 26.7 МэВ), которая в конце концов высвечивается как тепловая энергия с поверхности Солнца и вылетают 2 нейтрино. Т.о., высвечивание порции энергии Q сопровождается испусканием двух нейтрино. Количество N , излучаемых в 1 с, полностью определяется светимостью Солнца $L_\odot = 3.86 \cdot 10^{33}$ эрг/с:

$$N_\nu = \frac{2L_\odot}{Q} = 1.8 \cdot 10^{38} \text{ нейтрино/с}$$

Однако энергетический спектр излучаемых нейтрино, особенно высокоэнергетическая его часть, самым существенным образом зависит от таких деталей солнечных моделей, как температура в центре Солнца и концентрация гелия, т.к. от этих параметров зависит конкуренция между различными ответвлениями реакций водородного цикла.

Энергетический спектр p-p-нейтрино непрерывен от нуля до энергии 0,420 МэВ, pep-нейтрино и бериллиевые N имеют точно фиксированные энергии 1,44 МэВ для pep и 0,861 и МэВ для Be-нейтрино соответственно. Борные нейтрино имеют наибольшие энергии: их спектр находится в диапазоне от нулевых энергий до 14,06 МэВ.

Сравнивая вычисленные величины нейтринного потока для стандартной солнечной модели, выполненные Дж. Бакаллом и экспериментальные данные о потоке борных, бериллиевых и p-p нейтрино, мы получим что экспериментальное значение значительно меньше теоретического. Расхождение предсказываемого и измеренного значений может объясняться двумя причинами:

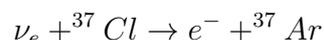
1. более сложными процессами в Солнце, не отраженными в принятых моделях Солнца; эти процессы могут уменьшать поток нейтрино в высокоэнергетической части спектра (экстремальная возможность такого рода - это наличие другого источника энергии в Солнце, например маленькой чёрной дыры);

2. свойствами нейтрино (например, нейтринными осцилляциями, представление о которых впервые введено советским учёным Понтекорво в 1957 г., или распадом на пути от Солнца до Земли).

5.2. Homestake.

Первый эксперимент по обнаружению солнечных нейтрино был проведен в 1967 году в бывшей золотодобывающей шахте Homestake (Южная Дакота, США) под руководством Р. Дэвиса. В данном эксперименте использовался хлор-аргонный детектор.

Для детектирования нейтрино использовалась реакция:



Напомним, что реакция происходит под действием нейтрино с энергиями, большими, чем 0,814 МэВ. Т.е. хлорный детектор наиболее чувствителен к "борным" (${}^8\text{B}$) нейтрино.

Основная трудность, препятствующая получению результатов состояла в том, что ССМ в те годы не была достаточно разработана, в частности, непонятно было, какая часть солнечных нейтрино образуется в сумме в ppII и ppIII цепочках и сколько нейтрино приходится на каждую из этих цепочек. Вначале вероятность протекания реакции с образованием "борных" и "бериллиевых" нейтрино считалось очень малой – 0,015%, что приводило к бессмысленности использования хлор-аргонного метода для детектирования солнечных нейтрино. Однако после ряда уточнений, внесенных Бакалом в ССМ, вероятность этих реакций повысилась до 15%, что дало толчок к проведению первого эксперимента. В нем Дэвис предполагал, что практически все ядра ${}^7\text{Be}$ вступают в реакцию с протоном с дальнейшим испусканием "борных" нейтрино. Детектор представлял собой 3800 литровый бак с перхлорэтиленом. Эксперимент закончился провалом – ни одного нейтрино не было обнаружено. Причиной этого было то, что основной цепочкой реакций является именно ppII, приводящая к образованию "бериллиевых" нейтрино. Но рассчитанное в 1960 г. значение скорости захвата "борных" нейтрино было занижено, что снова указывало на невозможность проведения хлор-аргонного эксперимента. И лишь после правильно рассчитанной интенсивности захвата началась подготовка к осуществлению эксперимента в Брукхейвенской солнечной нейтринной обсерватории.

Детектор представлял собой большой контейнер объемом 380 000 л, заполненный 610 т жидкого перхлорэтилена. Этот контейнер располагался на глубине 1 480 м, что соответствует 4500 м. водного эквивалента (m.w.e.), и впоследствии был дополнительно защищен толстым слоем воды.

Предсказанная скорость счета была 4-11 нейтринных события в день. Основной задачей при создании детектора была герметичность швов бака: происходило облучение швов рентгеновским излучением, при этом за каждым швом помещалась



Рис. 27. Схема хлор-аргонного эксперимента

рентгеночувствительная пленка. Также осуществлялись проверки бака на удержание вакуума: бак помещался в гелиевую среду, из него откачивался воздух, а к насосу подсоединялся масс-спектрометр, чувствительный к гелию.

Прокачка перхлорэтилена для извлечения из него атомов ^{37}Ar осуществлялась при помощи эндуктора, помещенного в бак, раз в два месяца. Во время гелиевых продувок перхлорэтилена гелий скапливался в верхних 5% объема бака и прогонялся со скоростью 17000 литров в минуту через контрольную комнату, в которой осуществлялась экстракция атомов аргона. Большой конденсатор, помещенный около бака, вымораживал перхлорэтилен, а фильтр из древесного угля в контрольной комнате улавливал аргон. Около 95% аргона, образующегося в баке, извлекалось за 20 часов продувки. После извлечения аргон очищался от сопутствующих примесей и помещался в маленькие пропорциональные счетчики с объемом 0,25 или 0,5 см³. Вначале аргон доставлялся в Брукхейвен в защитных контейнерах, в качестве которых использовались пустые гильзы больших корабельных снарядов. Позднее прибор для счета распадов атомов был установлен в шахте Homestake на глубине 1500 м. с целью использования гораздо лучшей естественной защиты от космических лучей слоем горных пород.

Эксперимент начался в 1967 г. и уже первые его результаты показали, что Солнце производит только треть ожидаемых нейтрино с высокими энергиями.

Измерения показали, что фон в счетчике в диапазоне энергий, соответствующих распаду, был примерно равен сигналу от взаимодействия с нейтрино. Возникла необходимость отсекаания фоновых событий, что было сделано по форме переднего фронта импульсов сигнала. В случае распада ^{37}Ar происходит испускание оже-электронов с энергией 100 мкэВ, приводящих в конечном итоге к образованию порядка 100 электрон-ионных пар, которые регистрируются счетчиком практически одновременно. Это приводит к резкому переднему фронту сигнала. Источником фона в основном являются фотоны, взаимодействующие с газом счетчика и приво-

дящие к образованию комптоновских электронов на всем пути своего движения в счетчике. Это дает плавное нарастание сигнала.

Несмотря на все усовершенствования детектора с целью уменьшения и отсеечения фона, измеренный в эксперименте поток нейтрино не изменился. Окончательно рассчитанное отношение экспериментально измеренного потока солнечных нейтрино к теоретической величине равняется:

$$r_n = 33 \pm 3 \pm 5$$

Измеренный поток нейтрино равняется 2,56 SNU.

Так возникла проблема «проблема солнечных нейтрино» (Solar Neutrino Problem - SNP).

Чтобы подчеркнуть сложность детектирования нейтрино можно отметить, что за 30 лет работы детектор зафиксировал в общей сложности 2200 солнечных нейтрино.

В 2002 году Р. Дэвису мл. была присуждена Нобелевская премия за пионерский вклад в астрофизику, в частности, за регистрацию космических (солнечных) нейтрино.

Следующим экспериментом, подтвердивший существование проблемы солнечных нейтрино, стал эксперимент Kamiokande, проведенный спустя 22 года после начала работы детектора.

5.3. Kamiokande.

В 1988 году японские ученые начали проводить эксперимент на подземном детекторе Kamiokande-II, который расположен на глубине 1 000 м (2700 m.w.e.) в шахте Камиока, расположенной в Японских Альпах). Шахта Камиока является глубочайшей шахтой в Японии. Это обстоятельство сыграло важную роль в снижении радиационного фона до приемлемого уровня.

Основной реакцией, на которой основан эксперимент, является рассеяние солнечных нейтрино на электронах легкой воды:



Водный детектор содержится в цилиндрическом резервуаре диаметром 15,6 м и высотой 16м. Стальные стенки резервуара имеют толщину 4,5-12 мм. Внутренняя поверхность резервуара окрашена в черный цвет. Для того чтобы поймать нейтрино, использовались 3 000 тонн чистой воды, из которых собственно для детектирования были задействованы только 680 т. в центре резервуара. Причиной этого являются строгие требования к уровню фона (см. далее подробности). 1 000 больших фотоумножителей (50 см диаметром), размещенных на внутренней поверхности резервуара и покрывающих 20% этой поверхности, фиксировали черенковское излучение. ФЭУ имели высокий энергетический выход (3 фотоэлектрона на 1 МэВ) и хорошее разрешение по энергиям (22% при 21 МэВ), а эффективность детектирования составляла порядка 50% при энергии 7,6 МэВ и достигала 90% при энергии 10 МэВ. Т.е. характеристики больших ФЭУ были аналогичны характеристикам малых ФЭУ, но при этом они имели большую площадь детектирования.

Строительство детектора началось в 1982 году. Первоначально – в первой фазе эксперимента, получившей название Kamiokande-I - детектор не мог ловить солнечные нейтрино. Для этих целей его пришлось доработать: был установлен сферический слой счетчиков антисовпадений и новая электроника. Схема антисовпадений представляла собой также водный черенковский детектор, окружавший внутренний детектор, с толщиной порядка 1,5 м, просматриваемая 123 ФЭУ. В дальнейшем аналогичная схема будет применяться на многих других нейтринных детекторах. Антисовпадательный слой необходим для прямой защиты от гамма-излучения и нейтронов, проникающих в детектор, путем их поглощения. Второй его функцией является отсеивания сигналов от пролетающих мюонов – это т. наз. система мюонного вето. Система электроники в детекторе позволяет регистрировать временную информацию о черенковских фотонах и информацию об амплитуде импульсов в ФЭУ. Регистрируются сигналы с амплитудой более 0,35 МэВ. Триггер на нейтринное событие срабатывает при регистрации сигнала с не менее 20 ФЭУ, находящиеся в состоянии возбуждения в течение 100 нс, что соответствует энергии электрона отдачи порядка 7,5 МэВ.

В процессе настройки детектора была проделана большая работа по уменьшению фона. Основными компонентами фона были:

1. Радиоактивные изотопы, содержащийся в воде
 - а. ^{222}Rn
 - б. ^{238}U
 - в. ^{226}Ra
2. Гамма-излучение из окружающей детектор породы

3. Радиоактивные осколки, образуемые при столкновении мюонов и ядер кислорода ^{16}O в воде, распадающиеся с образованием электронов.

Влияние ^{222}Rn было практически полностью исключено из-за малого периода полураспада элемента – 3,8 суток. Ионообменная система, подключенная к системе отчистки воды позволила исключить фон от изотопов ^{238}U . Гамма-излучение, как уже было сказано, в основном рассеивается в антисовпадательном слое. Радиоактивные осколки от мюонов были исключены используя геометрическую корреляцию с регистрируемыми высокоэнергетичными мюонными событиями и малые времена бета-распада осколков. В результате этой работы фон был уменьшен более чем в 1000 раз.

Определение нейтринного события происходило в 4 этапа:

1. Отбор низкоэнергетических событий
2. Выделение границ опорного объема в детекторе
3. Исключение событий, связанных с продуктами взаимодействия мюонов с водой
4. Корреляция направления движения регистрируемых фотонов с направлением на Солнце.

Подобно экспериментам Homestake, Kamiokande-II обнаруживал только очень редкие высокоэнергетичные нейтрино. Граничная энергия регистрируемых нейтрино в этом эксперименте была равна 7.5 MeV.

Детектор проработал с 1986 по 1995 год. За тысячу дней наблюдений ученые обнаружили только 1/2 от ожидаемого потока таких нейтрино.

Результатом его работы стало следующее: доля экспериментально обнаруженных нейтрино от теоретически рассчитанного количества равна:

$$r_n = 0.54 \pm 0.08^{+0.10}_{-0.07}$$

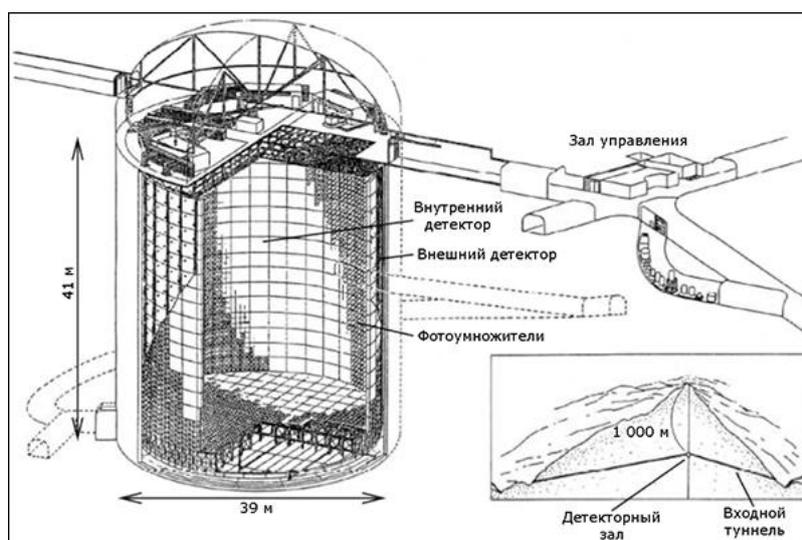


Рис. 28. Схема детектора Kamiokande II

Кроме измерения потока солнечных нейтрино, детектору Kamiokande также удалось зарегистрировать нейтрино от сверхновой, вспыхнувшей 23 февраля 1987 г. Было зарегистрировано 12 из 10^{16} нейтрино, которые прошли сквозь этот детектор.

В результате попыток теоретического обоснования результата родилось множество других проблем: имеет ли нейтрино массу, магнитный момент, каково время жизни нейтрино, и т.д. Все эти проблемы послужили поводом к созданию детекторов второго поколения, одним из которых является SuperKamiokande.

SuperKamiokande является модернизацией Kamiokande-II. Его детектор — огромный резервуар (40x40 м) из нержавеющей стали, заполненный 50 000 т чистой воды. На поверхности резервуара размещены 11 146 фотоумножителей (ФЭУ). Внутренний детектор, используемый для физических исследований, окружен слоем воды, который является внешним детектором и также контролируется фотоумножителями. Внешний детектор предотвращает срабатывание основного детектора от нейтрино, произведенных в окружающей детектор породе.

SuperKamiokande различает электронные и мюонные нейтрино по характеристикам черенковского излучения, вызываемого заряженными лептонами. Также у данного детектора был уменьшен порог регистрации - 5.5 МэВ. Как уже говорилось нейтрино сохраняет первоначальное направление во время своего движения. На рис.

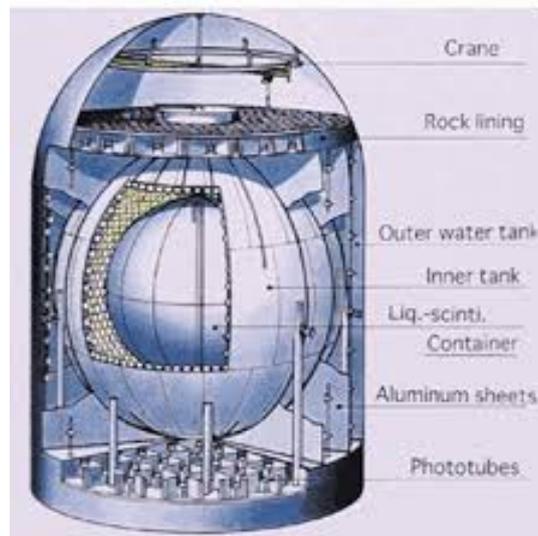


Рис. 29. Схема детектора SuperKamiokande

изображено угловое распределение нейтрино – как хорошо видно поток нейтрино имеет четко выраженное направление, совпадающее с направлением на Солнце:

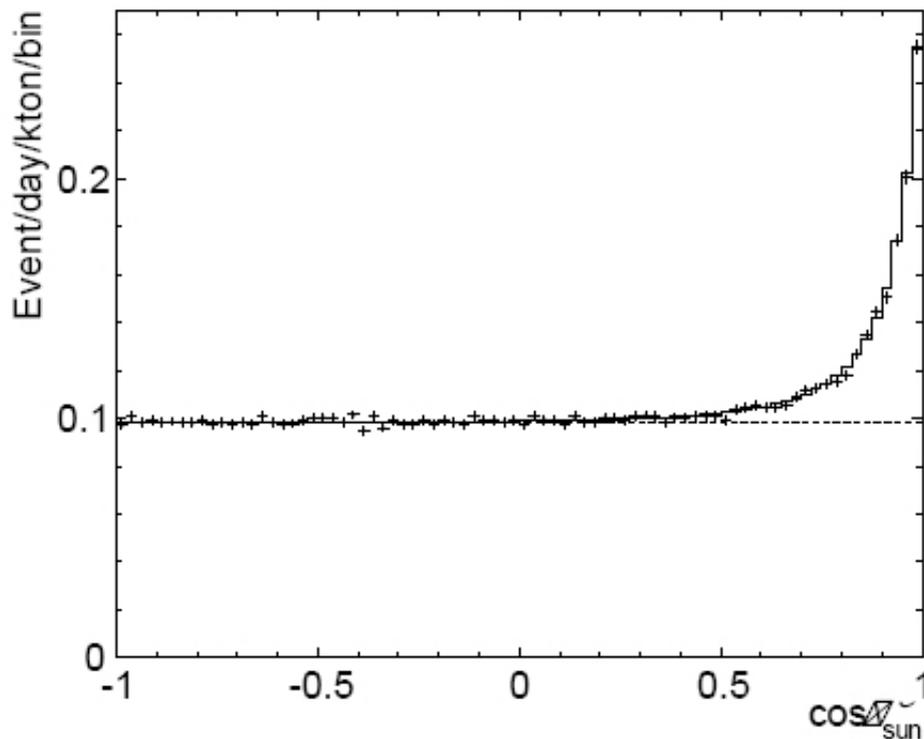


Рис. 30. Угловое распределение событий в детекторе SuperKamiokande по отношению к направлению на Солнце

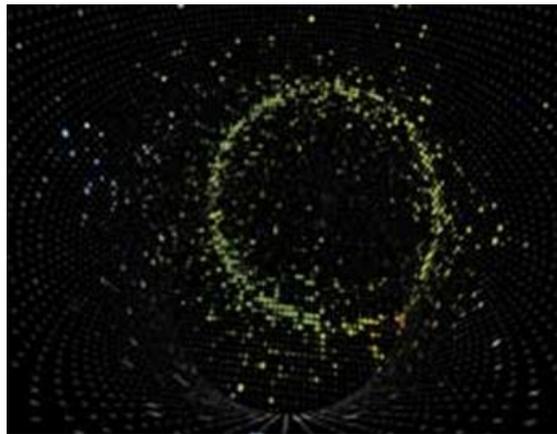


Рис. 31. Регистрация нейтрино в проекте SuperKamiokande

Точки соответствуют фотоумножителям, расположенным на стенах резервуара, а светящееся кольцо — зафиксированным высокоскоростным электронам, которые нейтрино выбивает из молекул воды.

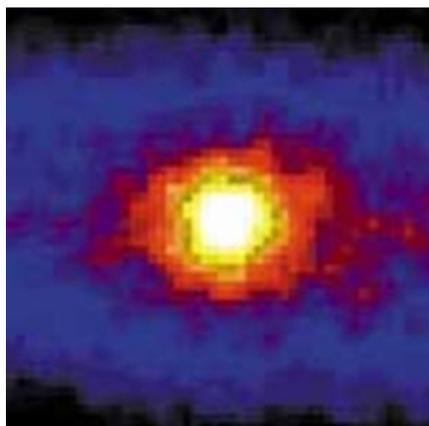


Рис. 32. Изображение Солнца, полученное с помощью нейтрино в течение 500 дней детектором SuperKamiokande

Более яркие цвета соответствуют большему зафиксированному числу нейтрино. Направление, откуда пришло то или иное нейтрино, может быть вычислено исходя из направления внутри резервуара, на котором был зафиксирован электрон, выбитый из воды нейтрино. Так как происходит это очень редко, эффект рассеивания «смазывает» истинное направление до такой степени, что каждый видимый элемент изображения соответствует двум солнечным дискам.

Как уже было сказано, исключение событий, вызванных пролетающими мюонами, осуществляется системой мюонного вето. Приблизительный вид сигнала с ФЭУ, вызываемого мюоном, показан на рис. 33.

Детектор SuperKamiokande проработал с 1996 по 2001 гг. Результаты эксперимента показали, что доля регистрируемых нейтрино от количества, предсказанного теорией, составляет

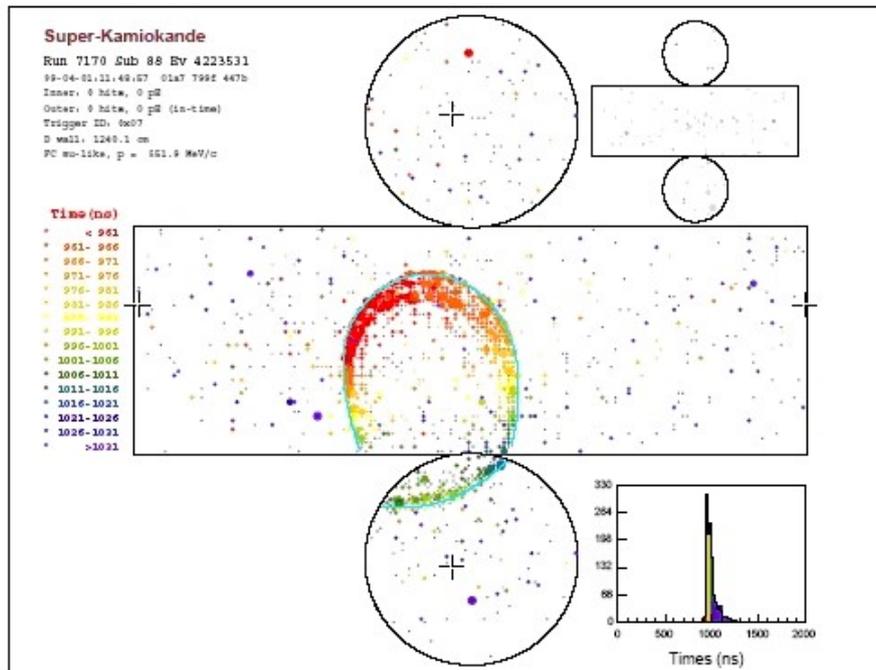
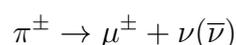


Рис. 33. Пример обработки события, вызванного мюоном с энергией 0,6 ГэВ, в детекторе SuperKamiokande: виден четко выраженное кольцо черенковского излучения. Каждая точка представляет собой сигнал от одного ФЭУ, его величина зависит от числа фотоэлектронов, образовавшихся в ФЭУ, а цвет определяется временем прихода в ФЭУ черенковского света

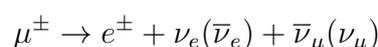
$$r_n = 47.5 \pm 0.8 \pm 1.3$$

Кроме солнечных нейтрино участники эксперимента SuperKamiokande исследовались не только солнечные, но и атмосферные нейтрино. А именно число мюонных нейтрино, рожденных в верхних слоях земной атмосферы, при столкновении протонов космических лучей с ядрами атомов воздуха, приходящих в детектор с разных расстояний. Оказалось, что меньшее число мюонных нейтрино приходило с тех направлений, где нейтрино преодолевали большее расстояние. Эти результаты дали основания полагать, что количество нейтрино данного класса зависит от пройденного ими пути, что может быть следствием трансформации нейтрино из одного вида в другой.

Протоны космических лучей в результате столкновения с атомом рождают заряженный пион, который распадается на мюон и мюонное нейтрино.



Мюон в свою очередь распадается на электрон, низкоэнергетичное электронное антинейтрино и высокоэнергетичное мюонное нейтрино.



Таким образом, поток атмосферных мюонных нейтрино должен быть в 2 раза больше потока электронных нейтрино. Причем это соотношение должно выполняться независимо от модели атмосферных ливней и справедливо для широкого диапазона энергий нейтрино ($0,1 \leq E \leq 1$) ГэВ.

Эксперимент показал, что потоки практически равны:

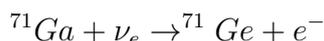
$$\left[\frac{N(\nu_\mu + \tilde{\nu}_\mu)}{N(\nu_e + \tilde{\nu}_e)} \right]_{exp} / \left[\frac{N(\nu_\mu + \tilde{\nu}_\mu)}{N(\nu_e + \tilde{\nu}_e)} \right]_{theor} R = \left(\frac{N_\mu}{N_e} \right)_{exp} / \left(\frac{N_\mu}{N_e} \right)_{theor} = 0.6^{+0.07}_{-0.6}$$

Эта проблема получила название аномалии атмосферных нейтрино.

Возглавляющий коллаборацию Kamiokande SuperKamiokande М. Кошиба в 2002 г. вместе с Р. Дэвисом получил Нобелевскую премию. Работы Дэвиса и Кошибы привели к неожиданным открытиям и положили начало нейтринной астрономии.

5.4. SAGE.

Основной реакцией, используемой в галлиевых детекторах, является:



Данная реакция проходит с порогом 0, 283 МэВ и позволяет детектировать все типы солнечных нейтрино.

Российско-Американский галлиевый эксперимент, получивший название SAGE, был проведен под руководством Г.Т. Зацепина в Боксанской нейтринной обсерватории, расположенной на глубине 4700 m.w.e. в низкофоновой лаборатории в горах Северного Кавказа. Общая масса галлия в детекторе была равна 60 тоннам. Почти 100 измерений потока солнечных нейтрино, проведенных в течение 1990—2000 годов, зафиксировали только половину потока нейтрино, который прогнозируется Стандартной Солнечной Моделью.

5.5. Баксанская нейтринная обсерватория (эксперимент SAGE).

Аналогичный эксперимент был проведен коллаборацией GALLEX (Рис. 34). Галлиевый эксперимент GALLEX проводился при международном сотрудничестве ученых из Франции, Германии, Италии, Израиля, Польши и США в период с 1991 по 1997 год.

Главной составной частью детектора GALLEX является контейнер с расплавом галлия (температура плавления - 30°C), смешанного с перекисью водорода и кислотой. Мишенью для нейтрино служили 30 тонн галлия в форме водного раствора хлорида галлия (общий вес - 110 тонн). Чтобы защитить детектор от фона, создаваемого космическим излучением, он помещен на глубину 3 300 м под самой высокой горой Италии, в Гран-Сассо (150 км восточнее Рима).

За 5 лет работы усредненный измеренный поток солнечных нейтрино составил порядка 80% от теоретического.

В 1997 году эксперимент GALLEX был завершен, и на основе этого же детектора стартовал эксперимент GNO. Детектор, содержащий 60 тонн галлия, позволит регистрировать одно р-р нейтрино в сутки. GNO должен проработать около 10 лет.

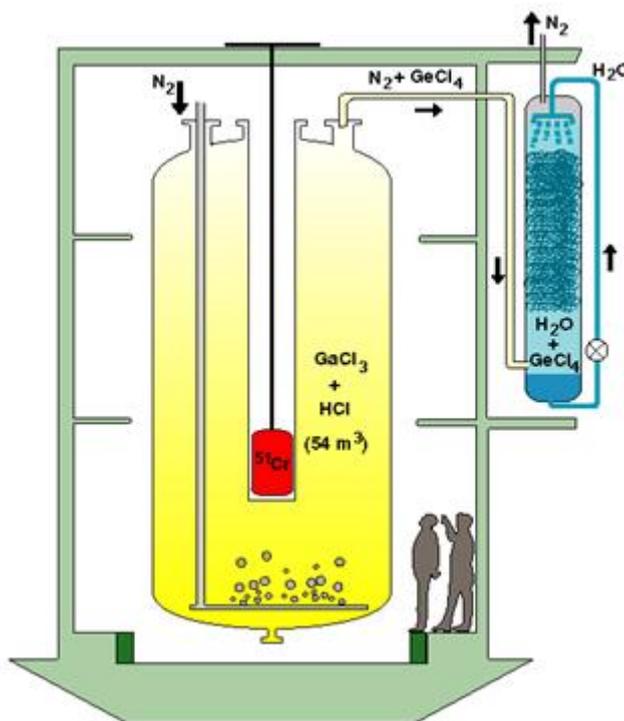


Рис. 34. Схема детектора Gallex

Первые результаты с GNO уже получены, совместив их с результатами GALLEX, получим следующую картину (Рис. 35)

При этом предсказания ССМ допускают диапазон от 115 до 135 SNU.

5.6. SNO.

Нейтринная лаборатория в Садбери (Онтарио, Канада) была построена в шахте на глубине 2070 метров. Его строительство началось в марте 1990 года и закончилось в мае 1993 года. SNO – черенковский детектор на тяжелой воде. Детектор представляет собой резервуар – бочкообразную полость, выкопанную в скале, - диаметром 22 метра и высотой 34 метра, заполненный 5300 тоннами сверхчистой легкой водой, в которую помещен бак из акрилового пластика, имеющий диаметр 12 метров, с 1000 тонн тяжелой воды D_2O , служащей мишенью для нейтрино. Внешний слой обычной воды служит для поглощения гамма квантов и нейтронов от естественной радиоактивности скальных пород. Акриловый резервуар окружает геодезическая сфера 17-метрового диаметра, заполненная 1700 тоннами обычной воды и содержащая 9 600 фотоумножителей (см. Рис. 36).

За сутки детектор регистрировал порядка 10 событий.

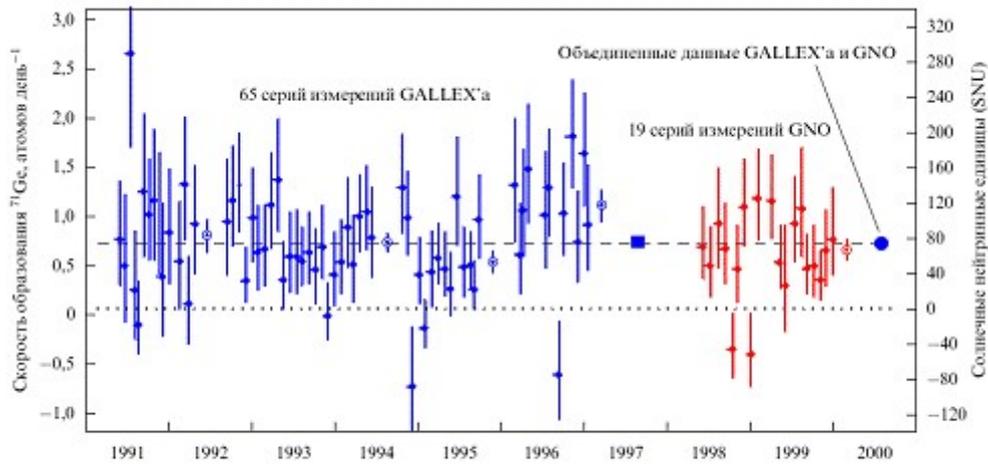


Рис. 16. Выход, измеренный в экспериментах GALLEX и GNO. Выход определяется как произведение потока электронных нейтрино на сечение захвата, проинтегрированное по соответствующему энергетическому диапазону. Одна "солнечная нейтринная единица" SNU = 10^{-36} захватов на ядро-мишень в секунду.

Рис. 35. Выход, измеренный в экспериментах GALLEX и GNO. Выход определяется как произведение потока электронных нейтрино на сечение захвата, проинтегрированное по соответствующему энергетическому диапазону

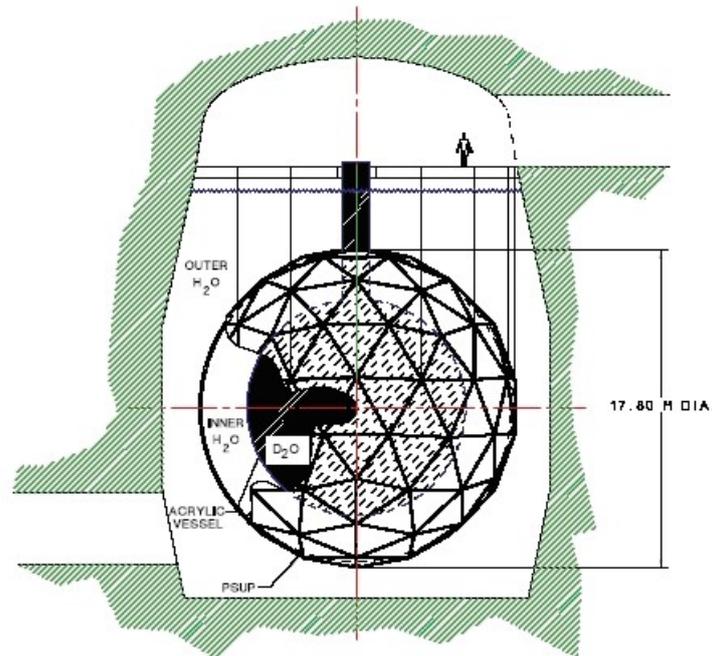
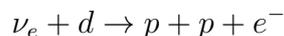


Рис. 36. Схема детектора SNO

Детектор должен был соответствовать высоким требованиям по чистоте используемых материалов. В частности концентрация элементов из радиоактивных цепочек урана и тория должна быть в миллионы раз меньше, чем в обычной воде. Так

для тяжелой воды содержание примесей должно быть меньше 10-14г/г воды, а для легкой воды весом - меньше 10-13г/г.

SNO чувствителен ко всем 3 ароматам нейтрино. Детектирование электронных нейтрино происходит путем реакции рассеяния нейтрино на дейтерии, протекающей с участием заряженных токов:



Когда нейтрино попадает в ядро дейтерия, происходит обмен W-бозоном. При этом нейтрон превращается в протон, а нейтрино – в электрон. И в результате реакции происходит образование 2 протонов и электрона. Электрон как самая легкая из образовавшихся частиц получает практически всю энергию налетающего нейтрино. Электрон двигаясь в детекторе со скоростью, большей скорости света в воде, испускает черенковский свет, регистрируемое фотоумножителями (ФЭУ). Сигнал на ФЭУ получается пропорциональным энергии нейтрино.

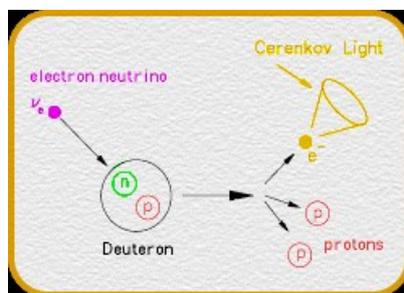
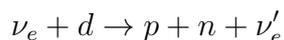


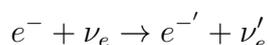
Рис. 37. Схема реакции посредством заряженных токов между нейтрино и дейтерием.

Нейтрино с дейтерием также может взаимодействовать посредством реакции с нейтральными токами. В этом случае происходит обмен Z-бозоном. Данная реакция чувствительна ко всем 3 ароматам нейтрино в одинаковой степени. В результате реакции дейтерий распадается на нейтрон и протон. Нейтрон в тяжелой воде термализуется при рассеянии, после чего захватывается ядром. Возбужденное ядро испускает гамма кванты, которые рассеиваются на электронах атомов воды, излучающие в свою очередь черенковское излучение, которое и является признаком нейтринного события. Эффективность данной реакции зависит от интенсивности захвата нейтрона ядром, которая относительно высока для дейтерия. Для увеличения этой интенсивности существуют 2 отдельные системы регистрации нейтральных токов.

Реакцию, протекающую с участием нейтральных токов, можно записать в виде:



Для детектирования нейтрино использовалась также уже известная нам реакция упругого рассеяния нейтрино на электронах, не являющаяся специфичной для тяжелой воды в отличие от вышеуказанных реакций:



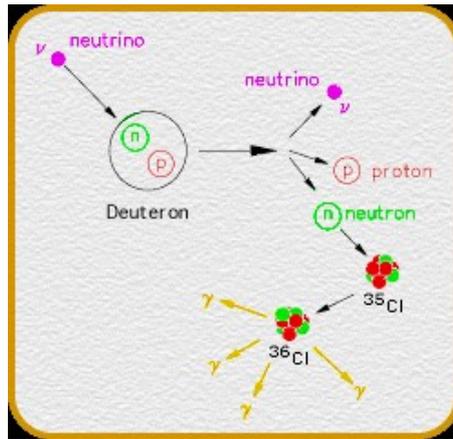


Рис. 38. Схема реакции посредством нейтральных токов между нейтрино и дейтерием.

Рассеяние происходит с нейтрино всех 3 типов, но интенсивность процесса для электронных нейтрино выше в 6 раз. Т.к. в конечном состоянии энергия нейтрино делится между обоими продуктами реакции, то точная спектроскопия невозможна. Но зато данный метод дает нам информацию о первоначальном направлении нейтрино, что позволяет нам убедиться в том, что обнаружено именно солнечное нейтрино. Кроме того данный результат можно сравнить с данными других черенковских детекторов, например, SuperKamiokande.

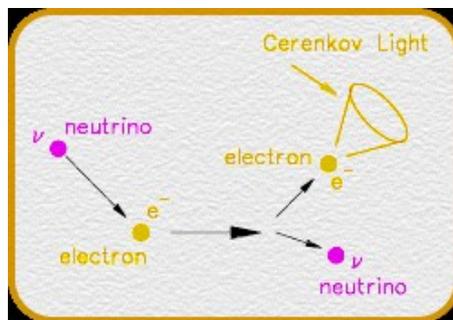


Рис. 39. Схема реакции упругого рассеяния нейтрино на электроне.

Эффективность реакции (n, γ) в случае нейтральных токов составляет 25% для дейтерия в тяжелой воде. Для увеличения эффективности в SNO созданы 2 различные системы регистрации процессов с нейтральными токами.

1. Пропорциональные счетчики с ${}^3\text{He}$:

У ${}^3\text{He}$ очень большое сечение захвата тепловых нейтронов, в результате захвата образуется высокоэнергетичная протон-тритонная пара, вызывающая импульс в пропорциональном счетчике. Пропорциональные счетчики (трубки общей длиной 800 м) равномерно размещены (висят на проволоках) в объеме D_2O . Так как их общий объем довольно велик, они должны быть изготовлены из ультрачистого материала, в качестве которого берется никель. Содержание урана и тория в них должно быть менее нескольких частей на триллион (по весу).

2. Хлористый натрий:

В этом варианте в тяжелую воду добавляется более двух тонн хлористого натрия (NaCl). У ^{35}Cl большое сечение захвата тепловых нейтронов, который сопровождается каскадом гамма квантов с максимумом в области 8 МэВ. Эффективность захвата около 83%. Фоном для этого процесса могут быть нейтроны от фотодезинтеграции дейтрона, вызванной в основном гамма квантами с энергиями 2.45 МэВ и 2.63 МэВ от цепочек распада радиоактивных ^{232}Th и ^{238}U . Таким образом соль, также как и вода должны быть высокой степени очистки от радиационных примесей.

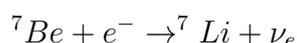
Для уменьшения низкоэнергетического фона граничная энергия детектируемых нейтрино в эксперименте была установлена в 6,75 МэВ.

Все поведенные эксперименты показывают дефицит потока солнечных электронных нейтрино, измеряемого на Земле, который объясняется по всей видимости тем, что часть электронных нейтрино проходя через Солнце превращаются в нейтрино других ароматов (прежде всего мюонное). При этом набранные в SNO данные совместно с данными более ранних экспериментов ясно указывают на LMA решение MSW-эффекта.

5.7. Borexino.

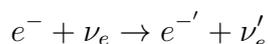
Борексина - это детектор для регистрации низкоэнергетичных нейтрино, сооружение которого приближается к концу в подземной лаборатории института LNGS в Grand Sasso, Италия. Цель эксперимента - прямое измерение потока ^7Be солнечных нейтрино всех 3 ароматов с помощью рассеяния нейтрино на электронах в ультрарасширенной сцинтиляционной жидкости.

^7Be нейтрино образуются в реакции:



90% нейтрино, образующийся в этой реакции, имеют энергию 0,86 МэВ, а 10% - 0,38 МэВ. В данном эксперименте регистрируются нейтрино с энергией 0,86 МэВ.

Реакция детектирования ^7Be нейтрино – это реакция рассеяния на электронах:



Электрон отдачи в этой реакции имеет непрерывный спектр с максимальной энергией, равной 0,66 МэВ.

Данный эксперимент пытается ответить на вопрос, какой поток солнечных нейтрино наблюдается на Земле и напрямую показать осцилляции солнечных нейтрино.

Ожидаемое согласно ССМ количество регистрируемых событий в диапазоне энергий 0,25 – 0,80 МэВ составляет примерно 55 нейтрино/день, из которых 43 – это «бериллиевые» нейтрино. Предполагается также детектирование верхней части спектра «борных» нейтрино. Реально наблюдаемый поток будет зависеть от того, какая из моделей нейтринных осцилляций верна.

5.7.1. Общая схема детектора

Схематически детектор изображен на рис. X. Детектор состоит из 2 частей: так называемых внутреннего и внешнего детекторов. Ядро внутреннего детектора представляет собой прозрачный сферический сосуд (нейлоновая сфера толщиной в 100 микрон), 8.5 метров в диаметре, наполненный 290 т. жидкого сцинтиллятора. Сцинтиллятор состоит из псевдокумола (1,2,4-триметилбензина) с добавлением 0,1% PPO (2,5-дифенилоксазола). Энергетический выход данной смеси довольно высок и равен 12 000 фотонов/МэВ.

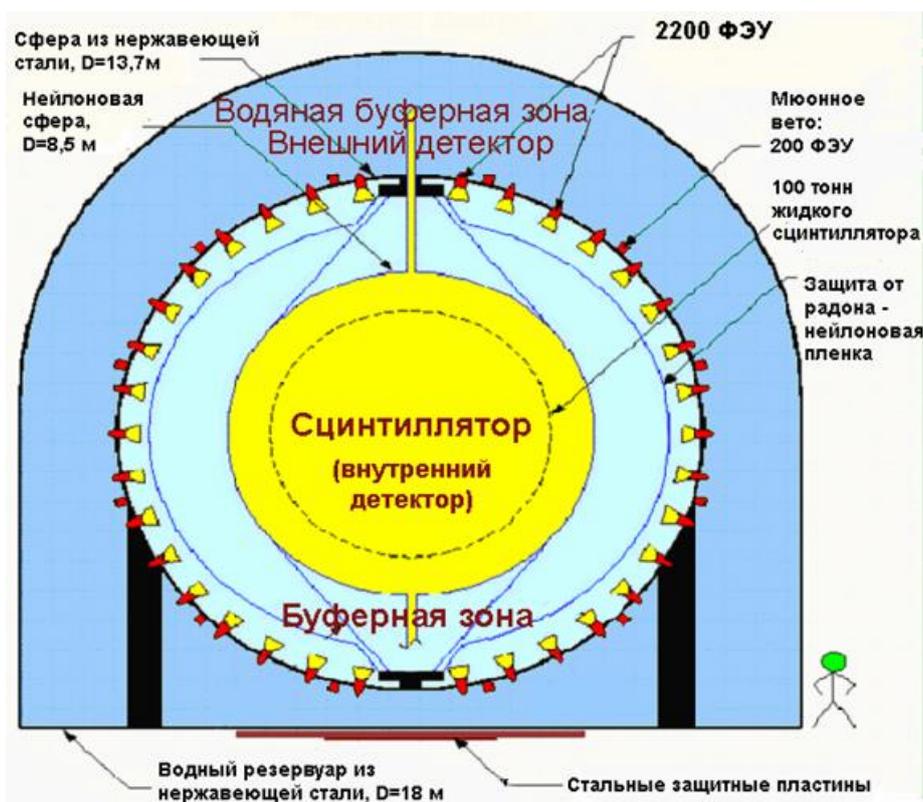


Рис. 40. Общая схема детектора Борексино.

Псевдокумол был выбран из-за большой длины пропускания светового излучения (до 7 м), подходящих механических свойств, высокой химической чистоте, а также доступности в больших количествах. PPO служит для сдвига длины волны гамма-излучения к значению 380 нм, которое совпадает с максимумом чувствительности ФЭУ. Внутренний детектор погружен в не сцинтилляционную жидкость, находящуюся в сфере, сделанной из нержавеющей стали. Это так называемая буферная зона, она содержит 1040 тонн псевдокумола с добавлением гасящего сцинтилляцию диметилфталата. Сфера в свою очередь находится в резервуаре с 2000 тоннами воды высокой очистки. Это и есть внешний детектор. Внутренний детектор просматривается 2200 ФЭУ, внешний включает в себя еще 200 ФЭУ, локализованных вокруг внутреннего детектора. Эти ФЭУ детектируют мюоны по их черенковскому излучению.

5.7.2. Основные принципы детектирования

В основе регистрации событий в детекторе Борексина лежит явление одноэлектронного импульса ФЭУ. Для регистрации события служит схема совпадений. Только совпадение импульсов в некотором количестве ФЭУ в течение достаточно малого промежутка времени служит основанием для регистрации физического события в объеме детектора.

Одной из основных проблем при конструировании детектора являлось подавление фонового излучения. Наибольший вклад в фоновое излучение вносят ряд процессов.

1. Естественная радиоактивность веществ, из которых изготовлен детектор, источниками которой являются:

- a) тяжелые изотопы ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th и продукты их распада: ^{226}Ra и ^{210}Pb ;
- b) радиоактивные благородные газы: ^{222}Ra и ^{85}Kr ;
- c) радиоактивный углерод ^{14}C .

2. Процессы, порождаемые в детекторе космическими мюонами:

- a) непосредственное излучение при взаимодействии с веществом детектора;
- b) наведенная мюонами радиоактивность.

Внешнее гамма-излучение:

- a) от окружающих детектор горных пород;
- b) излучение внешних частей детектора.

Для избавления от влияния радиоактивных изотопов металлов используется химическая очистка сцинтилляционной жидкости. Для защиты от радона и криптона применяется внешняя нейлоновая сфера. Единственный способ добиться необходимой чистоты сцинтиллятора от изотопа ^{14}C – это использование органической жидкости нефтехимического производства, такой как псевдокумол.

Детектор Борексина находится на глубине 3700 m.w.e. На данной глубине происходит подавление потока атмосферных мюонов на 6 порядков до значения $1,1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Кроме того, для подавления мюонных событий служит система мюонного вето, выключаящая внутренний детектор на несколько секунд после пролета мюона во внешнем детекторе.

Защита детектора от фонового гамма-излучения сделана так, чтобы уменьшить этот фон до величины меньшей, чем поток фотонов, возникающий при сцинтилляции. Поэтому защита детектора является многоступенчатой, причем, чем ближе к сцинтиллятору, тем более радиоактивно-чистые материалы используются. Во внешний поток фотонов наибольший вклад вносят ФЭУ, а точнее их стекла. Но это излучение ослабляется 3,25 м буферной зоной, а также нейлоновой сферой, содержащей сцинтиллятор. Кроме того, внешнее гамма-излучение можно выделить по амплитуде сигнала и его радиальной зависимости.

5.7.3. Преимущества детектора

Борексино является первым детектором, созданным специально для детектирования «бериллиевых» солнечных нейтрино.

Особенностью детектора является то, что детектирование происходит непосредственно или в режиме реального времени, в отличие, к примеру, от химического метода детектирования в Homestake или SAGE. Но детектирование в режиме реального времени в диапазоне 0-5 МэВ затруднено сильным фоновым излучением, вызванным естественной радиацией, причем как проникающим из внешней среды, так и продуцируемым самим детектором. Чтобы уменьшить внешний фон в Борексино применили внешнюю водяную защиту, как и в детекторах SuperKamiokande и Sudbury.

При детектировании в диапазоне низких энергий для отсекающего высокого фона необходима высокая светимость в реакции детектирования. Как известно, сцинтилляция отличается повышенной светимостью по сравнению с черенковским излучением. Создание технологии применения сцинтилляции в детекторе с объемом более ста тонн для низкоэнергетической спектроскопии является одним из достижений коллаборации Борексино.

Рассмотрим возможные механизмы нейтринных осцилляций, которые могут быть подтверждены или опровергнуты в эксперименте Boraxino.

Эксперимент SuperKamiokande показал наличие нейтринных осцилляций, но не показал наличие MSW или вакуумных осцилляций, и не указал их механизм: SMA, LMA или LOW решение. Найденное в эксперименте Sudbury отношение NC/CC указывает на конкретное решение для нейтринных осцилляций (LMA), но ничего не говорит о возможности преобразования в стерильные нейтрино. Поток нейтрино, измеренный в эксперименте Борексино, может доказать любой из механизмов осцилляций:

- 11 нейтрино/день – четкое указание на SMA;
- 30 нейтрино/день – совместно с результатами предыдущих экспериментов указывает на LMA;
- поток менее 11 нейтрино/день – указывает на преобразование в стерильные нейтрино.

5.8. JUNO.

Эксперимент JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) — это планируемый прецизионный эксперимент с реакторными антинейтрино нового поколения, предназначенный для определения иерархии масс нейтрино.

Детектор JUNO будет представлять собой 35-и метровую сферу заполненную 20 кт жидкого сцинтиллятора, свечение которого будет детектироваться 20-ю тысячами фотоэлектронных умножителей диаметром 50 см каждый. Максимальное геометрическое покрытие детектора фотоумножителями необходимо для увеличения светосбора. Это необходимо для достижения беспрецедентного энергетического разрешения детектора 3% для энергии 1 МэВ.

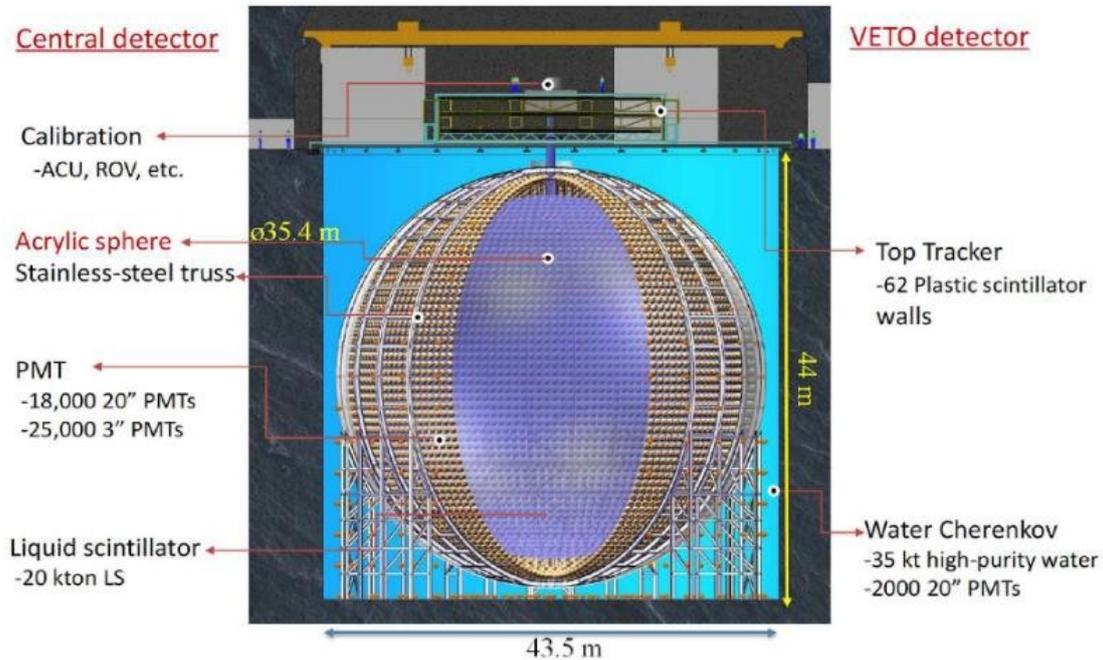


Рис. 41. Эксперимент JUNO.

Детектор будет расположен на расстоянии около 52 км от реакторов атомных электростанций Янцзян и Тайшань. На этом расстоянии наблюдаемый антинейтринный спектр будет искажён за счёт осцилляций: в нём появятся осцилляции с периодом порядка сотен кэВ. При условии достижения энергетического разрешения в 3% измеренная фаза и период этих искажений позволят прецизионно измерить расщепление масс нейтрино Δm_{32}^2 и, в частности, определить его знак на уровне достоверности более трёх стандартных отклонений в течение 6 лет после начала набора данных в 2020 году. Определение знака Δm_{32}^2 эквивалентно определению иерархии масс нейтрино: при нормальной иерархии третье массовое состояние тяжелее первого и второго, тогда как при обратной иерархии третье массовое состояние является самым лёгким.

6. Лекция 6. Ускорительные нейтрино.

6.1. Основные характеристики.

Когда говорят об ускорительных нейтрино, всегда имеется в виду нейтрино, целенаправленно получаемые для целей определенного нейтринного эксперимента. В проводимых в настоящее время подобных экспериментах для производства нейтрино используются протонные синхротроны: KEK PS (proton synchrotron), FNAL Main Injector, CERN PSP. Как правило, в таких экспериментах происходит образование мюонных нейтрино по следующей схеме: пучок протонов циклически инжектируется в ускорительное кольцо за малый промежуток времени, ускоряется в нем, после чего выводится из кольца и направляется на мишень, а в результате распада образованных адронов (π - и K-мезонов), получаются мюонные нейтрино. Для пионов распад на мюон и соответствующее ему нейтрино является доминирующим каналом распада:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Для каона распад с образованием тех же частиц происходит с вероятностью 63.5

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

а второй наиболее вероятный канал (21.16%):

$$K^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+$$

$$K^- \rightarrow \pi^0 + \pi^-$$

также в конечном итоге приводит к образованию мюонных нейтрино.

Период полураспада в обоих случаях составляет порядка 10^{-8} с.

Принципиальным отличием пучков нейтрино, формируемых на ускорителях, является то, что их генерация контролируема, и, следовательно, все параметры пучка могут быть довольно строго заданы. Поэтому в отличие от других нейтринных источников, ускорительные пучки обладают рядом преимуществ, среди которых отметим следующие:

1. Возможность формирования потока нейтрино определенного сорта (ν_μ или $\bar{\nu}_\mu$) с хорошо известным (расчетным и непосредственно измеренным) спектром как основного пучка, так и примесей. Примесь ν_e составляет обычно менее 1%, а примесь ν_i — менее 10⁻⁵.

2. Обеспечение контроля интенсивности, временной структуры, направления и профиля пучка. Контроль за временем появления нейтрино особенно важен потому, что позволяет легко отфильтровывать нейтринные события в детекторе.

3. Возможность варьирования энергии родителей нейтрино (π - и K -мезонов) и различных схем их магнитооптической фокусировки. Это позволяет иметь нейтринные пучки широкого спектра (обычно от нескольких ГэВ вплоть до 100 ГэВ), низкоэнергетические пучки (с максимумом в области 5-7 ГэВ), а также монохроматические пучки, настроенные на выделенную область энергий.

6.2. JPARC.

JPARC — протонный ускорительный комплекс, расположен вблизи Токай, Японии, совместный проект национальной лаборатории по физике высоких энергий КЕК и агентства атомной энергии JAEA.

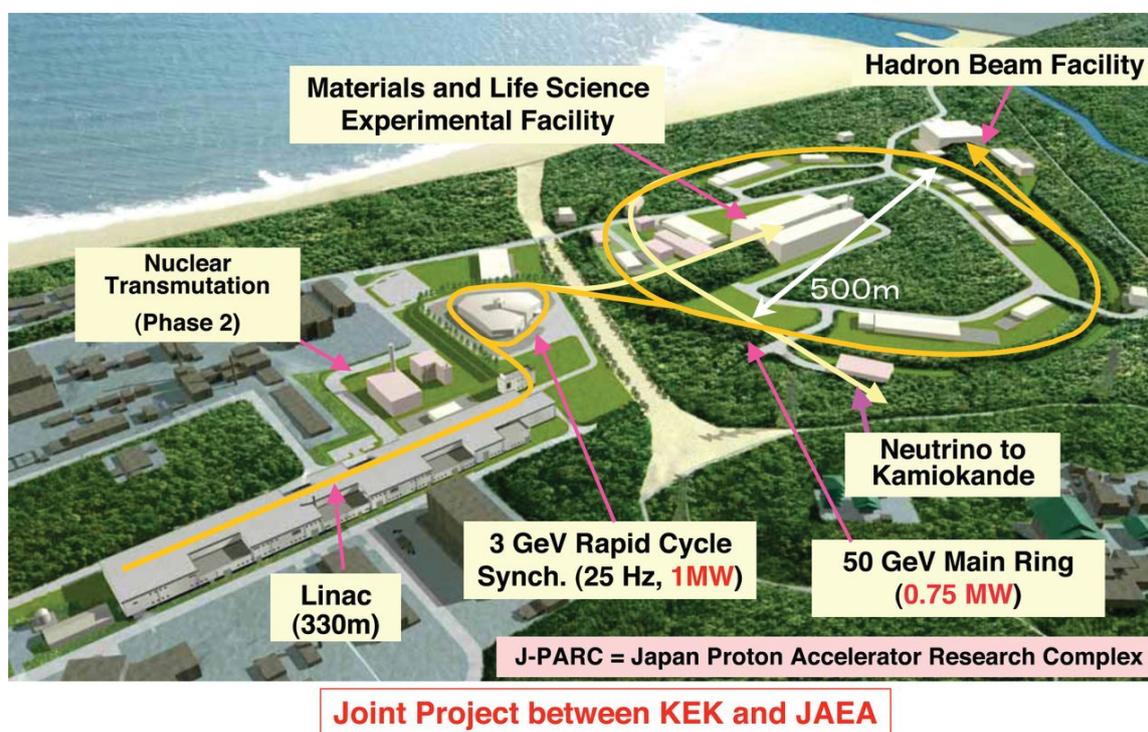


Рис. 42. Схема ускорительного комплекса и экспериментальных залов.

Комплекс состоит из трёх ускорителей, каждый из которых обслуживает ряд экспериментальных установок:

1. Линак

Источником первичных пучков является линейный ускоритель ионов H^- на энергию 400 МэВ, с возможностью доускорить до 600 МэВ в сверхпроводящем линаке.

2. RCS

Быстроциклирующий протонный синхротрон RCS (Rapid Cycling Synchrotron) на энергию 3 ГэВ имеет периметр 348.3 м, частоту повторения 25 Гц. Инжекция перезарядная, из линака.

3. Main Ring

Основное кольцо, протонный синхротрон MR (Main Ring) на энергию 50 ГэВ, периметр 1567.5 м. Имеет две системы выпуска: медленная, и быстрая. Частота повторения 3 с при быстрой экстракции и 6 с — при медленной. Система медленного выпуска направляет пучок протонов на станцию адронной физики, где протонный пучок рождает каоны. Быстрый выпуск используется для создания пучка нейтрино: пучок протонов выводится в сверхпроводящий канал транспортировки, направляющий пучок в сторону Super-Kamiokande, затем сбрасывается на мишень, где рождается пучок пионов, которые быстро распадаются на мюоны. В распадном канале мюонов рождаются нейтрино, которые далее летят 293 км до нейтринного детектора Super-Kamiokande.

6.3. Эксперимент NOνA.

Проект NOνA (NuMI Off-Axis ν_e Appearance) - это сотрудничество 181 ученого и инженеров из 26 учреждений, которые планируют изучить нейтрино, используя пучок нейтрино от NuMI (Neutrinos at the Main Injector) в Fermilab.

Эксперимент NOνA разработан, чтобы искать осцилляции мюонного нейтрино к электронному нейтрино, сравнивая количество зарегистрированных электронных нейтрино на участке Fermilab с количеством электронных нейтрино зарегистрированных к югу от Интэрнэшнл-Фолс, штат Миннесота в 810 километрах от Fermilab. Если осцилляции произойдут, то на дальнем участке будут обнаружены электронные нейтрино в пучке мюонных нейтрино, произведенных в Fermilab.

6.4. Эксперимент OPERA.

OPERA располагается в крупнейшей в мире подземной лаборатории – Национальной Лаборатории Гран-Сассо (LNGS INFN), расположенной в Италии. Установка находится на глубине около 2 км, что соответствует 3.1 км водного эквивалента. Мюонный фон от космических лучей составляет примерно 1 мюон/(м² час). Используется поток от протонного суперсинхротрона SPS в ЦЕРН-е. ν_μ проходят 730 км в земной коре, затрачивая на это 2.4 – 3.0 мс.

Работа ускорителя и работа детектора согласованы. Для этого создана система их временной синхронизации. Средняя энергия пучка нейтрино в LNGS составляет около 17 ГэВ. Ожидается за 5 лет работы детектора получить около 25000 нейтринных событий, связанных с взаимодействием ν_μ и примерно 100 событий связанных с появлением ν_τ , из которых рождение τ -лептона можно ожидать в 10-15 событиях.

Анализ данных производится в 12 лабораториях. После проявки, обработка эмульсий производится в автоматизированном режиме, с использованием установок по сканированию ядерных фотоэмульсий. Скорость сканирования составляет порядка 1 кадра в 10 мс, что даёт поток информации ≥ 500 МВ/с. Поэтому в Университете Салерно было разработано специальное программное обеспечение, называемое

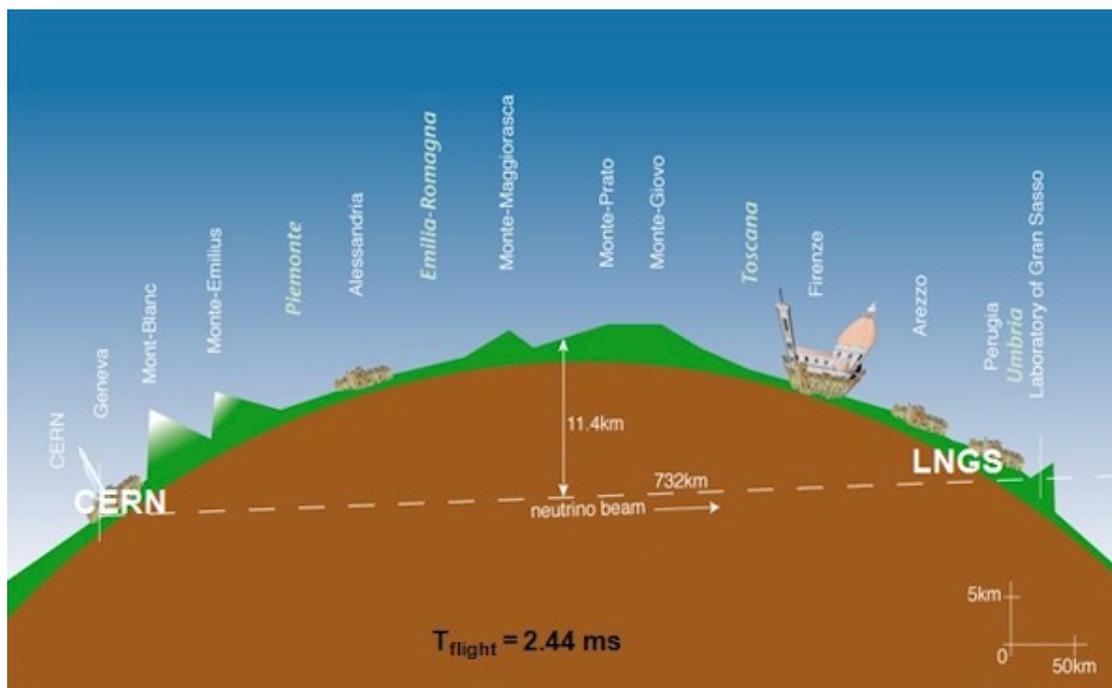


Рис. 43. Расположение источника (SPS CERN) и детектирующего устройства (OPERA).

SySal (System Salerno), для первичной обработки данных по мере их поступления (online). Затем провидится моделирование с использованием кодов OpRelease, FLUKA, FEDRA. Используются различные критерии отбора, для классификации событий. К примеру, если ищем распад τ -лептона, то первым критерием будет отсутствие мюона при взаимодействии. Произведя локализацию вершины, делают реконструкцию события. После исследуют особенности топологии.

6.5. Эксперимент DUNE (LBNE).

Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) — планируемый эксперимент по изучению осцилляций мюонного нейтрино в другие типы нейтрино. Начало работы запланировано на начало 2020-х годов.

Будет использовать пучок нейтрино, порождаемый протонным ускорителем в лаборатории Фермилаб. Затем свойства этого пучка нейтрино будут изучать два нейтринных детектора: ближний, расположенный также в Фермилаб, и дальний, расположенный на расстоянии 1300 км в Сэнфордской лаборатории.

Задачами эксперимента являются:

1. изучение иерархии масс трёх состояний нейтрино
2. изучение механизма, посредством которого нейтрино приобретают массу
3. поиск проявлений нарушения CP-инвариантности

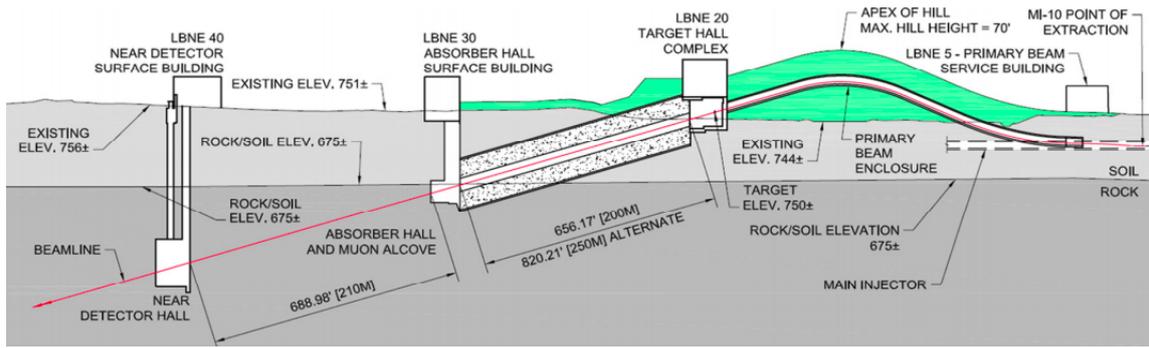


Рис. 44. Схема эксперимента.

7. Лекция 7. Нейтринные телескопы.

Нейтринные телескопы можно разбить на две большие группы – подземные телескопы и нейтринные телескопы в естественных средах (вода, лед). Подземные нейтринные телескопы – это большие баки с водой или жидким сцинтиллятором. Их помещают в шахтах или туннелях для экранирования от фона атмосферных мюонов. Энергетический порог подземных установок может опускаться до 5-10 МэВ. Это достаточно для регистрации нейтрино от гравитационного коллапса и от Солнца.

Нейтринные телескопы в естественных средах – это система фотоумножителей, расположенных на вертикальных тросах глубоко под водой или во льду. Фотоумножители регистрируют черенковский свет от мюона или каскадного ливня. Объем таких нейтринных телескопов во много раз больше, чем подземных, а энергетический порог существенно выше - примерно 10 ГэВ.

Нейтринные телескопы – крупные экспериментальные установки, с большим числом регистрирующих каналов. Методика регистрации заряженных частиц, рожденных при взаимодействии нейтрино, самая разнообразная – сцинтилляционные баки (Баксанский сцинтилляционный телескоп), стримерные трубки (установка MACRO), регистрация черенковского света в воде (установки Super-Kamiokande и SNO). Энергетический порог установок 5-10 МэВ. Для уменьшения фона от атмосферных мюонов нейтринные телескопы размещают в помещениях, экранированных от поверхности слоем грунта толщиной 1 - 2 км.

7.1. Баксанский сцинтилляционный телескоп

Один из первых (крупных) и до сих пор работающих нейтринных телескопов был создан под руководством А.Е. Чудакова на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Телескоп расположен в туннеле под горой Андырчи в Баксанском ущелье на Кавказе. Телескоп состоит из более чем 3000 баков с жидким сцинтиллятором, просматриваемых ФЭУ-49.

7.2. Super-Kamiokande

Наибольшим из существующих подземных нейтринных телескопов является водный черенковский детектор Super-Kamiokande. Детектор представляет собой стальной цилиндрический резервуар (высотой 41 м и диаметром 40 м), наполненный водой. Полная масса воды – 50 тыс тонн. Внутренний объем просматривается 11 тысячами фотоумножителей с диаметром фотокатода 50 см, равномерно размещенных по внутренней поверхности резервуара. Площадь, покрытая фотокатодами фотоумножителей, примерно равна 40% всей внутренней площади резервуара. Такое большое число фотоумножителей позволяет регистрировать слабые вспышки света от взаимодействия нейтрино в объеме детектора. Снаружи резервуар окружен со всех сторон слоем воды толщиной 2.5 м, также просматриваемой фотоумножителями. Большое число фотоумножителей позволяет получать детальный "образ" события и разделять события от взаимодействия мюонных нейтрино с образованием

мюона от событий, вызванных взаимодействием электронных нейтрино с электроном в конечном состоянии. Наличие активной защиты дает возможность выделять нейтринные события не только снизу, т.е. от нейтрино, прошедших Землю, но и сверху.

7.3. Детектор SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

Канадский детектор SNO также является водным черенковским детектором, только в этом детекторе обычная вода заменена на тяжелую. Это сделало этот детектор уникальным при исследовании солнечных нейтрино.

7.4. Детектор KamLAND

Детектор представляет из себя сферу диаметром 13 м, наполненную 1000 т жидкого сцинтиллятора. Первоначальная цель детектора – изучение осцилляций нейтрино, путем измерения потока электронного антинейтрино на больших расстояниях от реактора. Эта задача успешно решена. В настоящее время начаты работы, направленные на существенное снижение энергетического порога детектора для регистрации низкоэнергичных нейтрино от Солнца

7.5. Нейтринные телескопы в естественных средах

Глубоководный нейтринный телескоп можно представить как систему пространственно разнесенных фотоприемников (фотоумножители с большой площадью фотокатода или гибридные фотоприемники, как например Квазар–370 в Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ200)

Расстояние между фотоприемниками по порядку величины совпадает с длиной поглощения света. Траектория мюона может быть восстановлена по времени регистрации черенковского света фотоприемниками с точностью порядка 10. Примерно с такой же точностью при высоких энергиях (> 100 ГэВ) направление движения мюона совпадает с траекторией нейтрино. Нейтрино и, соответственно, мюоны от нейтрино пересекают детектор со всех направлений, но отделить мюоны от нейтрино от мюонов, рожденных в распадах пионов и каонов, можно только с направлений из нижней полусферы (из-под Земли). Действительно, только нейтрино может пересечь земной шар и родить мюон вблизи поверхности.

Эффективность регистрации мюонного нейтрино

Эффективность регистрации мюонного нейтрино с энергией E примерно равна отношению длины пробега мюона с энергией $E/2$ (примерно такую энергию уносит мюон) к длине пробега нейтрино до взаимодействия.

7.6. Нейтринный телескоп AMANDA

В начале 90-х годов были начаты работы по созданию нейтринного телескопа AMANDA (E.Anders et al., 2000) на Южном полюсе, на американской станции

Амудсен – Скотт. Южный полюс покрыт, как известно, льдом толщиной около 3-х километров. Реализация проекта стала возможной благодаря уникальной методике создания глубоких (2 км) каналов во льду с помощью горячей воды. Канал замерзает примерно через 2-ое суток, и этого времени достаточно для монтажа гирлянды фотоприемников, но поднять и отремонтировать гирлянду уже невозможно. В настоящее время AMANDA состоит из 677 фотоприемников, размещенных на 19 стрингах, и является крупнейшим нейтринным телескопом.

Для регистрации нейтрино ультравысоких энергий нужны установки с площадью существенно большей 1 кв.км. Разумной границей объема оптических нейтринных телескопов, по крайней мере на ближайшее 20 лет, является 1 км³. Возможные пути увеличения объема нейтринных телескопов и, следовательно, продвижения в область более высоких энергий связаны с регистрацией акустического и высокочастотного (100-1000 МГц) радиосигнала от электромагнитных и адронных каскадов и регистрация горизонтальных атмосферных ливней. Существование акустических и радиочастотных сигналов от электромагнитных каскадов было предсказано более 40 лет назад Г.Аскарьяном (Г.Аскарьян, 1957, Г.Аскарьян 1961).

Нейтрино сверхвысоких энергий — возможные методы регистрации

1. Регистрация акустического сигнала
2. Регистрация радиоизлучения
3. Регистрация горизонтальных атмосферных ливней

8. Лекция 8. Нейтринные осцилляции.

8.1. Нейтринные осцилляции.

На сегодняшний момент общепринятой физической теорией, полностью описывающей слабые и электромагнитные взаимодействия, является Стандартная модель электрослабых взаимодействий (или просто Стандартная модель). Данная модель объясняет все собранные экспериментальные данные, а открытие нейтральных токов и W- и Z-бозонов явилось ее блестящим подтверждением. Кроме того Стандартную модель подтвердили эксперименты на коллайдере LEP (Large Electron Positron Collider), доказавшие, что существует только 3 поколения лептонов с массой менее 50 ГэВ и, согласно кварк-лептонной симметрии, 3 поколения кварков.

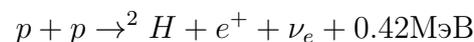
Тем не менее Стандартная модель нуждается в дополнении и обобщении. В своем нынешнем состоянии она не может предсказать массы фермионов, не объясняет необходимость нескольких поколений кварков и лептонов и, наконец, не может дать объяснение результатам всех проведенных экспериментов по измерению потока солнечных нейтрино, зафиксировавших дефицит потока нейтрино. Зато проблема солнечных нейтрино, а точнее ее отсутствие может быть объяснено с помощью теории нейтринных осцилляций.

Основные положения теории нейтринных осцилляций:

- лептонные кварковые числа не сохраняются
- массы нейтрино не равны нулю, хотя и очень малы - при этом противоречий с проведенными экспериментами по измерению массы нейтрино нет, т.к. все они дают лишь ограничение на верхний предел массы нейтрино
- электронное, мюонное и тау-нейтрино является суперпозицией 3 состояний, имеющих массы m_1, m_2, m_3

Нобелевская премия по физике 2015 г. была присуждена А. Мак-Дональду и Т. Каджите «за открытие нейтринных осцилляций, демонстрирующих наличие у нейтрино массы».

В самом деле, на Солнце, в соответствии со стандартной солнечной моделью, нейтрино в основном возникают в результате реакции протон-протонного цикла:

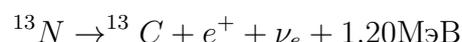


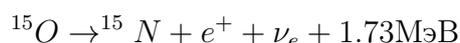
(Относительная вероятность такой реакции 99.75%)

Главным источником высокоэнергетичных нейтрино на Солнце служат распады изотопов ${}^8\text{B}$, которые возникают в реакции ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ (редкой ветви протон - протонного цикла):



Далее по вероятности образования идут нейтрино CNO – цикла:





В настоящее время имеется несколько типов экспериментальных данных по регистрации различных групп солнечных нейтрино. В течение 30 лет ведутся радиохимические эксперименты на основе реакции $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$. Согласно теории, основной вклад в эту реакцию должны внести нейтрино от распада ^8B . Исследования по прямой регистрации нейтрино от распада ^8B с измерением энергии нейтрино выполняются с 1987 года. Помимо этого с 90-х годов прошлого века ведутся радиохимические эксперименты, использующие реакцию «галлий — германий» $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$. Важной особенностью этой реакции является ее чувствительность в основном к первой реакции протон-протонного цикла $p + p \rightarrow ^2\text{D} + e^+ + \nu_e$. Темп этой реакции определяет скорость энерговыделения в термоядерной «печи» Солнца в реальном масштабе времени. Во всех экспериментах наблюдается дефицит в потоках солнечных нейтрино по сравнению с предсказаниями стандартной солнечной модели.

Возможным решением проблемы дефицита солнечных нейтрино и являются нейтринные осцилляции — превращение электронных нейтрино в мюонные и тау-нейтрино. Связь с массой нейтрино заключается как раз в том, что в моделях нейтринных осцилляций изменяющейся (осциллирующей) компонентой является как раз масса нейтрино. Следовательно, если есть осцилляции, есть и ненулевая масса нейтрино.

Говоря об осцилляциях, нельзя не упомянуть о ряде особенностей в свойствах и классификации этих удивительных частиц. Первое, на что надо обратить внимание, приступая к обсуждению свойств нейтрино, это существование их различных сортов. Как известно, в настоящее время мы определенно можем говорить о трех таких сортах: ν_e , ν_μ , ν_τ и соответственно их антинейтрино. Электронное нейтрино при обмене заряженным W-бозоном переходит в электрон, мюонное — в мюон, таонное — в таон. Это свойство и позволило в свое время установить различие в природе электронного и мюонного нейтрино (Л. Ледерман, 1962 г.)

Возникает основной вопрос — могут ли смешиваться разные сорта нейтрино? При ответе на этот вопрос важно знать, каковы массы нейтрино. Из наблюдений мы знаем, что их массы очень невелики, они существенно меньше, чем массы соответствующих лептонов. Так, для массы электронного нейтрино мы на сегодняшний день (эксперимент KATRIN) имеем ограничение

$$m(\nu_e) < 1.3 \text{ эВ}$$

в то время как масса электрона равна 0.511 МэВ. Во многих случаях для различных оценок, связанных с массами частиц, мы можем полагать массы всех трех нейтрино равными нулю. Если они в точности равны нулю, заметить эффекты возможного смешивания различных сортов нейтрино невозможно. Только если нейтрино имеют отличные от нуля массы, смешивание приобретает физический смысл. Отметим, что нам неизвестны какие-либо принципиальные причины, приводящие к строгому равенству нулю масс нейтрино. Таким образом, вопрос о том, существует ли смешивание разных нейтрино, представляет собой задачу, которую следует решать физическими методами, прежде всего экспериментальными.

Теперь можно привести некоторые теоретические выкладки, поясняющие ситуа-

цию со смешиванием различных сортов (ароматов) нейтрино. Рассмотрим задачу о двух сортах нейтрино: ν_e, ν_μ . Для эффектов смешивания следует рассмотреть, как изменяются состояния в зависимости от времени. Эволюцию во времени определяет уравнение Шредингера

$$i \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi$$

Здесь H — энергия системы (точнее, оператор энергии).

Мы знаем, что электронные нейтрино образуют в результате реакции с обменом W электрон, а мюонные — соответственно мюон.

Первые попытки ответить на вопрос о наличии осциллирующих экспериментальным путём делались ещё в 80-е годы прошлого века. Сейчас нет наверное, ни одного крупного эксперимента, связанного с физикой нейтрино, в котором тем или иным образом не освещалась бы проблема нейтринных осцилляций. Осцилляции нейтрино активно изучались в экспериментах Superkamiokande и SNO, им было уделено немало внимания в самом длительном эксперименте, связанным с солнечными нейтрино — SAGE, проводящемся в Баксанской Нейтринной Обсерватории на Северном Кавказе. Однако в последние 10-15 лет возник целый класс отдельных экспериментов, известный под наименованием Oscillations Industry (осцилляторная индустрия), т.е. класс экспериментов, нацеленных прежде всего на обнаружение нейтринных осцилляций.

Современную «осцилляторную индустрию» можно разделить на части, связанные, в первую очередь с природой изучаемых нейтрино. Это эксперименты с солнечными нейтрино (Superkamiokande, SNO, Gallex, SAGE, Borexino), атмосферными (MACRO, Soudan2), и реакторными (KamLand, Double CHOOZ). Отдельно стоит сказать о той части экспериментов, которые особенно бурно развиваются в последнее десятилетие — это ускорительные эксперименты вида «long base» (ускорительные эксперименты с длинной базой), в которых нейтрино генерируются протонным ускорителем, а затем измерения проводятся на значительном (вплоть до сотен километров) расстоянии от места их образования. Преимуществами таких экспериментов является прежде всего то, что

- а) можно чётко представлять содержание нейтрино определённого типа (как правило, мюонных) в первичном пучке
- б) за счёт длинной базы вероятность осцилляций становится довольно значительной.

Теперь необходимо сказать немного подробнее о наиболее значительных «long base» экспериментах последнего времени, как законченных, так и продолжающихся.

Эксперимент MINOS (Fermilab, США). В этом проекте использовался относительно низкоэнергетический пучок (3 ГэВ), в нём измерялось время прохождения пучка нейтрино с точностью < 100 нс, сравнивая время регистрации нейтрино в ближнем (ND, 1.1 км) и дальнем детекторах (FD, 735 км). Помимо этого, в эксперименте выполнялось уникальное измерение с целью сравнить энергии нейтрино в заряженных взаимодействиях со временем взаимодействия в дальнем детекторе. Тем не менее, основная цель эксперимента — это изучение осцилляций мюонных нейтрино. Нейтринный пучок, произведённый в Фермилабе, попадал вначале

в ближний детектор, расположенный на территории Фермилаба, и потом в дальний детектор (шахта Судан, Миннесота). Сравнивая ароматы нейтрино в дальнем и ближнем детекторах, находились осцилляционные параметры. Результатами измерений 2008-11 г. были следующие значения для разницы масс и угла смешивания: $\Delta m^2 = (2.43 \pm 0.13) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$ и $\sin^2(2\theta) > 0.90$. В настоящий момент эксперимент находится в стадии модернизации для запуска следующего эксперимента с длинной базой — LBNE.

Говоря о современных экспериментах по исследованию осцилляций, невозможно пройти мимо одного из самых известных (если не самом известном) экспериментов — эксперименте OPERA (Гран-Сассо, Италия). Достаточно упомянуть, что в числе коллективов, участвующих в нём — крупнейшие научные центры Европы CERN и INFN (Итальянский Национальный Институт Ядерной Физики). Представлен в данном проекте и Московский Государственный Университет (НИИЯФ имени Д.В.Скобельцына и Физический Факультет).

Основная цель проекта на длинной базе (732 км) — прямая регистрация таонов, возникших в результате осцилляций в первичном пучке мюонных нейтрино. Конфигурация детектора представляет из себя эмульсионный детектор для оффлайнных измерений.

Основная идея обнаружения осцилляций в проекте состоит в следующем — представим, что во время пути пучка мюонных нейтрино от ускорителя в ЦЕРНе до лаборатории Гран-Сассо в результате осцилляций возникла примесь таонных нейтрино. При попадании в детектор нейтрино этого типа с ненулевой (хоть и очень малой) вероятностью, в результате взаимодействия с веществом, могут превратиться в своего заряженного партнёра.

8.2. Проект KATRIN.

Цель проекта KATRIN, основанного на опыте более ранних проектов, — повышение на порядок чувствительности к эффективной массе покоя электронного антинейтрино по сравнению с самыми лучшими предыдущими прямыми измерениями, а именно до $0,2 \text{ эВ}/c^2$ (с 90-процентным доверительным интервалом) в течение трех лет набора статистики. Принятое на сегодняшний день значение $2 \text{ эВ}/c^2$ для верхнего предела эффективной массы покоя электронного антинейтрино основано на экспериментальных данных $2,3 \text{ эВ}/c^2$ и $2,1 \text{ эВ}/c^2$, полученных из анализа формы ν -спектра трития в области его граничной энергии с использованием электронных спектрометров такого же типа, как в проекте KATRIN. Это интегральный электро-статический спектрометр с магнитной адиабатической коллимацией.

В случае проекта KATRIN спектрометр должен обеспечить приборное разрешение около 1 эВ при энергии электронов $18,6 \text{ кэВ}$ (граничная энергия бета-спектра трития) и трансмиссию около 18 процентов от 4. Одно из важнейших требований для достижения намеченной цели — стабильность тормозящего/анализирующего напряжения (около $-18,6 \text{ кВ}$). По проведенным расчетам его нестабильность в пределах $\pm 60 \text{ мВ}$ может внести систематическую погрешность около $0,007 \text{ эВ}^2/c^4$ в значение квадрата массы покоя антинейтрино, полученное из измеренного бета-спектра. Такая погрешность представляет значительный вклад в максимальную



Рис. 45. Общий вид эксперимента.

допустимую систематическую погрешность $0,017 \text{ эВ}^2/\text{с}^4$ для достижения целевой чувствительности к массе нейтрино.

Долгосрочный мониторинг стабильности напряжения в случае $-18,6 \text{ кВ}$ в пределах отклонения $\pm 60 \text{ мВ}$ (т.е. с относительной погрешностью $\pm 3 \cdot 10^{-6}$) в течение двух месяцев (планируемая продолжительность одного сеанса измерений) — это достаточно сложная задача для современной техники. Поэтому стабильность тормозящего напряжения будет проверяться одновременно двумя независимыми способами: с помощью высокоточного вольтметра в сочетании со специальным делителем высокого напряжения и мониторингом положения стабильной во времени реперной линии моноэнергетических электронов, эмитируемых естественным источником, в специальном мониторирующем спектрометре (такого же типа, как и главный спектрометр проекта KATRIN), который будет подключен к общему источнику напряжения $-18,6 \text{ кВ}$. В таком случае любое изменение положения реперной линии будет свидетельствовать о нестабильности в общей системе тормозящего напряжения. В разработке естественного источника реперных электронов, удовлетворяющего вышеупомянутым требованиям, вместе с коллегами из ИЯФ АН ЧР в Ржеже принимали участие и сотрудники ЛЯП ОИЯИ, которые занимаются прецизионной ядерной электронной спектроскопией уже несколько десятков лет.

В связи с этим необходимо напомнить, что (в отличие от фотоэлектронной спектроскопии) в ядерной электронной спектроскопии до сих пор отсутствуют коммерчески доступные твердотельные энергетические реперы конверсионных электронов или электронов Оже с погрешностью менее $0,1 \text{ эВ}$. Главная причина состоит в том, что кинетические энергии этих электронов напрямую зависят от энергий их связи в атоме. А, как известно, энергии связи электронов чувствительны к физико-химическому окружению атомов, что впоследствии приводит к энергетиче-

ческим сдвигам как в спектрах конверсионных электронов, так и электронов Оже, особенно в случае твердотельных источников. Из фотоэлектронной спектроскопии известно, что этот энергетический сдвиг (который принято называть химическим сдвигом) достигает ± 7 эВ и сильно коррелирован с валентным состоянием излучаемого атома. Известно также, что энергии связи электронов в твердых телах, как правило, на 2-10 эВ меньше, чем для свободных атомов (т.н. твердотельный сдвиг), а для атомов, адсорбированных на поверхности твердых тел, на 1-3 эВ

9. Лекция 9. Реакторные нейтрино

Практически с момента своего появления, ядерные реакторы использовались в физических экспериментах. Достаточно вспомнить, что открытие нейтрино (на самом деле антинейтрино) было сделано Райнесом именно в реакторном эксперименте, как и доказательство не тождественности нейтрино и антинейтрино.

В реакторах в процессе их работы образуются бета-радиоактивные изотопы, в результате распада которых возникают антинейтрино в больших количествах. Рассмотрим этот процесс.

Как известно, в основе работы реактора лежит цепная реакция деления изотопа урана ^{235}U .

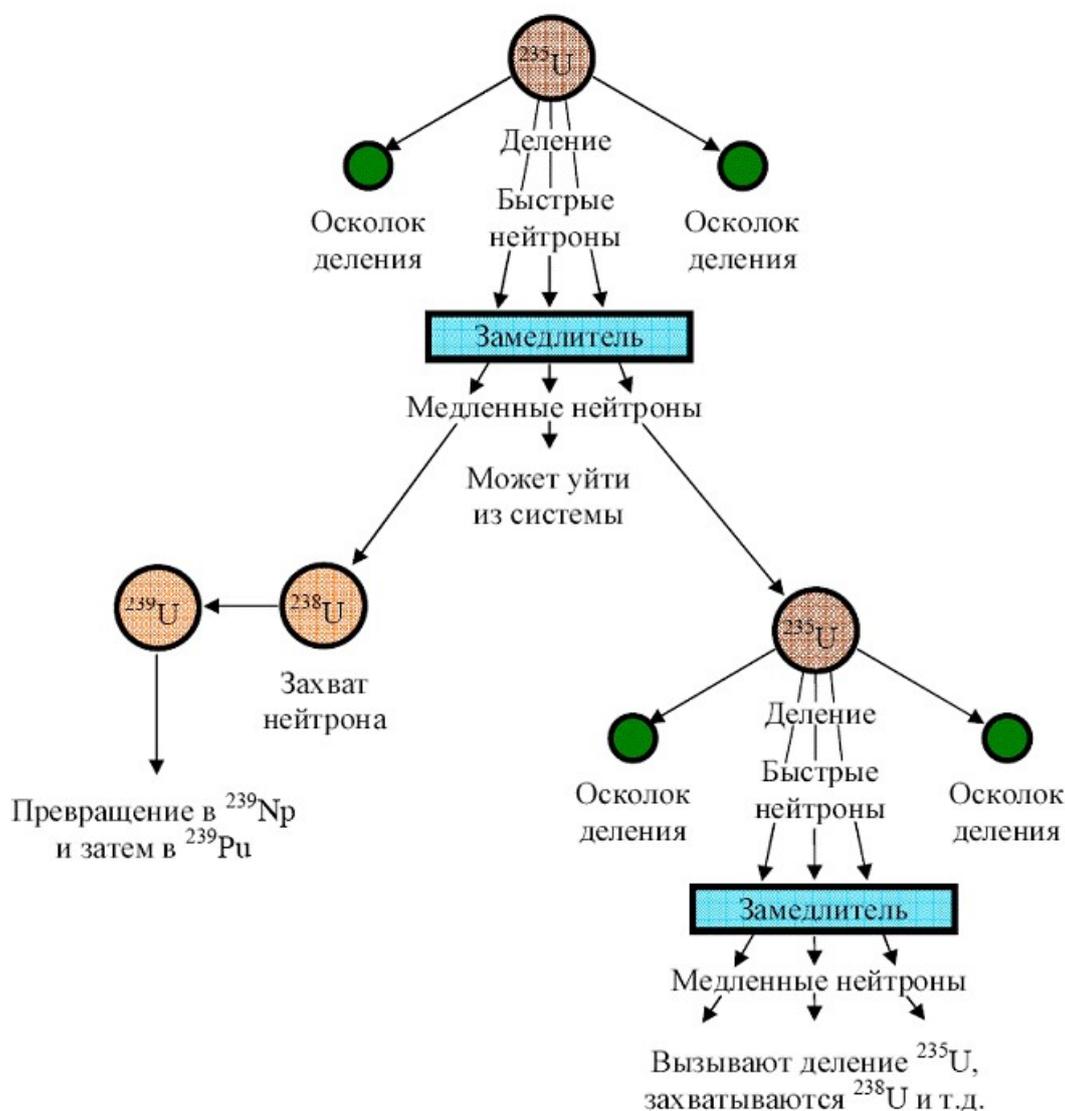


Рис. 46. Схема цепной реакции деления в среде с замедлителем.

Как видно из схемы, в реакторе можно выделить 2 «источника» нейтрино.

реактора, схемы распадов, величина выхода отдельных изотопов и другие факторы, поэтому такие расчеты являются довольно сложными.

9.1. Эксперименты.

9.2. KamLAND.

KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector) — большой нейтринный детектор, совместный американско-японский эксперимент, а также проводящая этот эксперимент международная коллаборация.

На KamLAND было обнаружено более 100 событий, которые могли быть вызваны геонейтрино.

The KamLAND Experiment

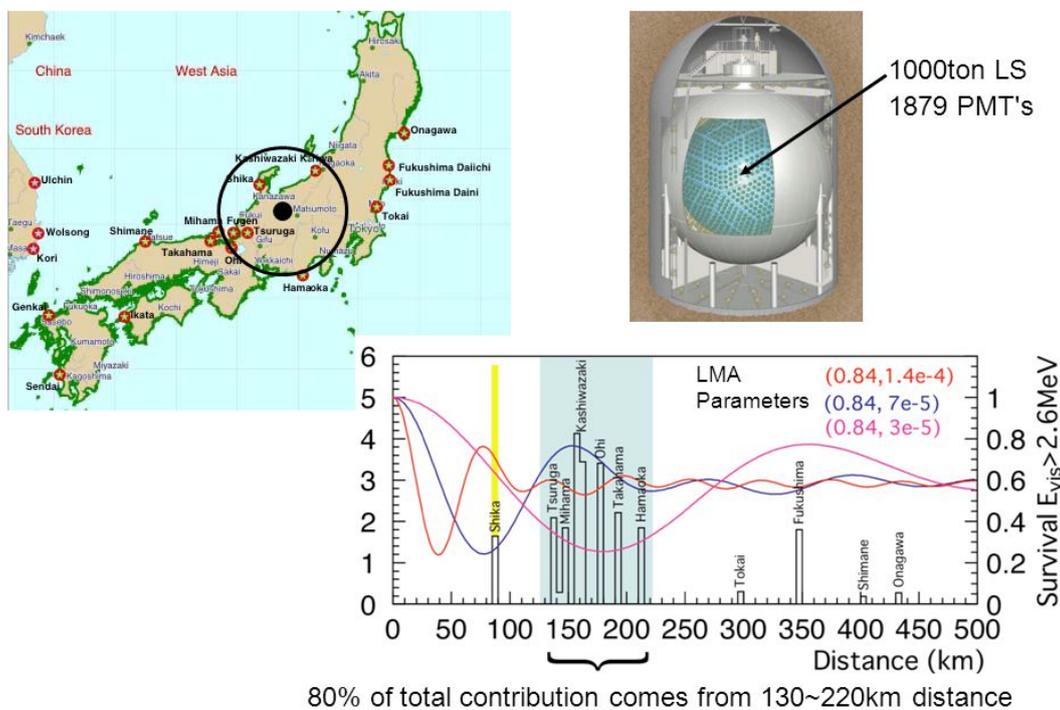


Рис. 48. Эксперимент KamLAND.

KamLAND — это детектор, расположенный на острове Хонсю в Японии. В эксперименте участвуют 12 институтов США и Японии. Это крупнейший из когда-либо построенных низкоэнергетичных нейтринных детекторов, а также крупнейший сцинтиляционный детектор. Граничная энергия регистрируемых нейтрино составляет 1 МэВ. Основная цель эксперимента — разрешение проблемы нейтринных осцилляций путем детектирования антинейтрино от японских и южнокорейских ядерных реакторов. Для этого нужно сопоставить поток антинейтрино, детектируемый установкой, с точно рассчитанным значением потока этих же частиц от реактора.

KamLAND создан на месте уже описанного ранее детектора Kamiokande-II. Установка начала свою работу в 2002 году и продолжает работать до настоящего времени.

Основной (внутренний) детектор установки содержит 1000 тонн жидкого сцинтиллятора в прозрачной нейлоновой сфере (являющейся бывшим метеозондом) диаметром 13 м.

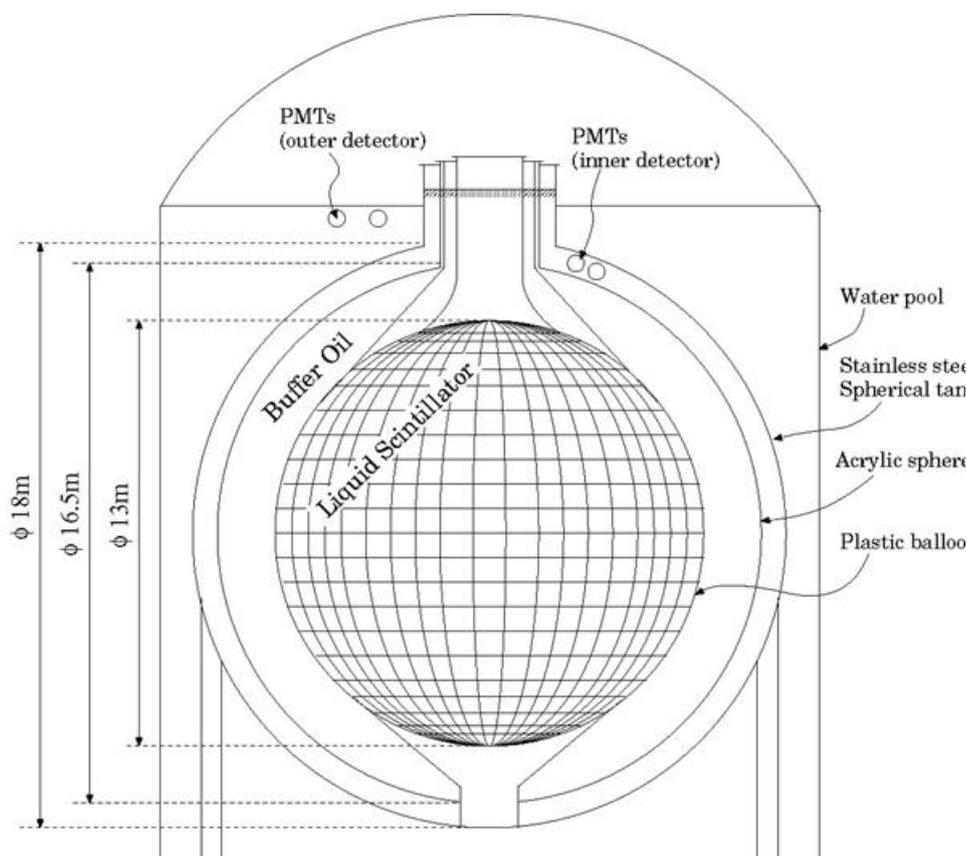


Рис. 49. Схема детектора KamLAND.

При этом собственно для детектирования антинейтрино используется центральная область сферы диаметром 5,5 м, содержащая примерно 544 тонны сцинтиллятора. Сцинтиллятор состоит из раствора псевдокумола в додекане (20:80) с небольшой добавкой дифенилоксазола, который улучшает сцинтилляционные характеристики. Чистота сцинтиллятора по урану, тории и калию (природным радиоактивным элементам, способным давать вклад в фон детектора) доведена до нескольких единиц на г/г. Пластиковая сфера со сцинтиллятором подвешена в центре стальной сферы, заполненной прозрачной смесью жидких парафинов (массой 2 килотонны). На внутренней поверхности стальной сферы расположены 1879 фотоумножителей двух типов (17- и 20-дюймового диаметра). Момент срабатывания каждого ФЭУ отслеживается с точностью 3,5 нс, что позволяет не только измерять энергию событий, но и восстанавливать координаты сцинтилляционной вспышки.

Одной из основных проблем детектирования является уменьшение фона. Основными процессами, вносящими вклад в радиационный фон, являются процессы,

вызванные атмосферными мюонами, и естественная радиоактивность. Естественная радиоактивность уменьшается путем окружения детектора слоем минерального масла, защищающего от гамма-лучей и нейтринной радиации.

Для обнаружения космических мюонов служит внешний детектор. Основной детектор смонтирован внутри внешнего защитного водного черенковского детектора. Это заполненная сверхчистой водой стальная цилиндрическая емкость диаметром 18 м. Хотя почти все мюоны, рождающиеся в верхних слоях атмосферы, поглощаются километровой толщиной скалы над подземной лабораторией, небольшая часть их все же достигает установки, и генерируемые ими быстрые нейтроны могут вызывать ложное срабатывание основного детектора. Поэтому после зарегистрированного пролета мюона набор данных основным детектором временно приостанавливается.

В предыдущих экспериментах с реакторными нейтрино (на реакторах в Красноярске, Ровно, Саванна-Ривер, Гёсгене, Буже, Пало Верде и в эксперименте CHOOZ) их дефицита не было обнаружено. Однако эксперименты с солнечными нейтрино свидетельствовали, что расстояния порядка 1 км слишком малы для его обнаружения — т.е. все ранее проведенные эксперименты были слишком малочувствительны к эффекту нейтринных осцилляций. Размеры KamLAND и его расположение в 100-200 км от реакторов сделало его весьма чувствительным к этому эффекту, что и привело к его обнаружению. Резко увеличив массу мишени, снизив фон и продвинувшись на два порядка по расстоянию, KamLAND смог попасть в область осцилляций.

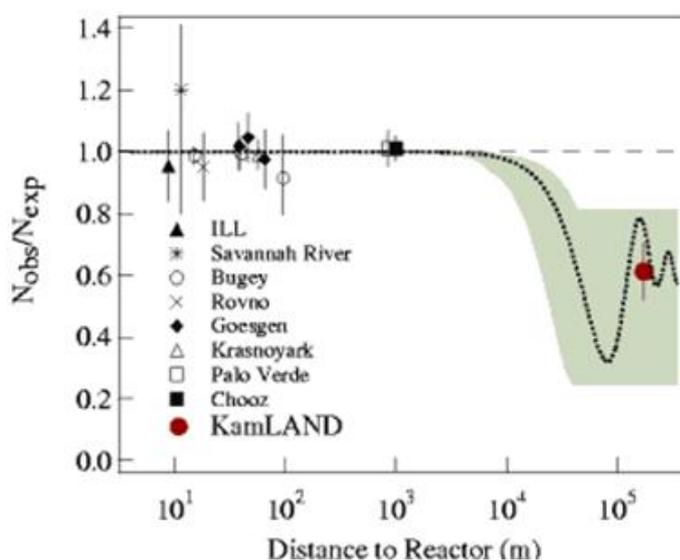


Рис. 50. Отношение измеренных нейтринных потоков к ожидаемым в случае отсутствия осцилляций для всех экспериментов с реакторными нейтрино, проведенных в последнее время.

Ядерные реакторы, которые служат источниками антинейтрино - а всего их около 70, но примерно 80% потока дают 26 из них - в основном удалены от детектора на расстояние от 138 до 214 км, хотя даже реакторы из Кореи вносят некоторый вклад

(примерно 2.5%) в общий поток.

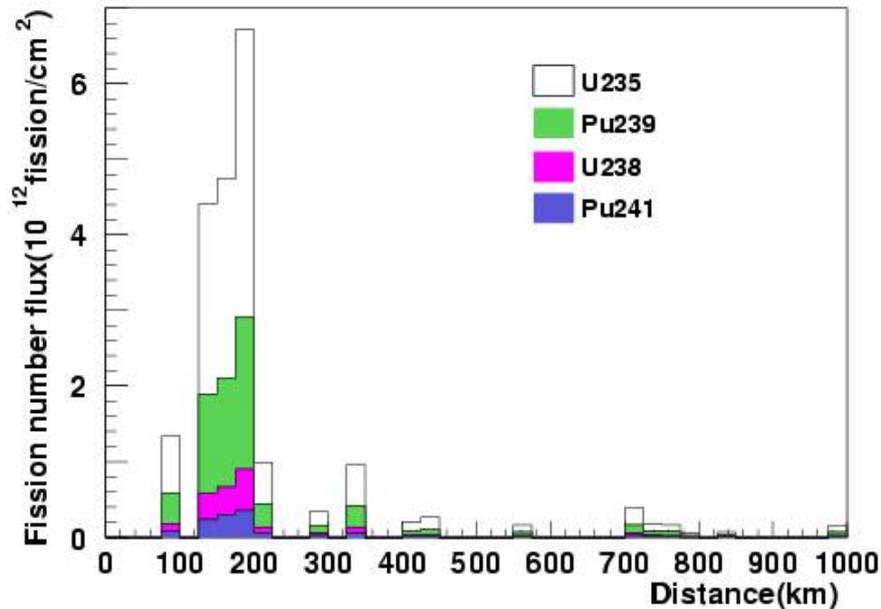


Рис. 51. Расчетное значение потока антинейтрино от различных радиоактивных изотопов в зависимости от расстояния от реактора до детектора KamLAND.

9.3. Daya Bay.

Daya Bay — эксперимент физики элементарных частиц по изучению осцилляций нейтрино, проводящийся в Китае. Многонациональная коллаборация включает исследователей из Китая, России, США, Тайваня и Чехии. Эксперимент проводится на АЭС Дайя Бэй, около 52 километров к северу от Гонконга. Установка состоит из восьми антинейтринных жидкосцинтилляционных детекторов, расположенных в трёх экспериментальных залах.

Источником антинейтрино являются шесть атомных реакторов (тепловая мощность каждого около 3 ГВт), располагающихся на расстояниях от 500 до 1800 метров от детекторов.

Эксперимент Дайя-Бэй предназначен для исследования нейтринных осцилляций и угла смешивания $\theta = 13$. Он использует поток антинейтрино от реакторов АЭС Дайя Бэй и Линг Ao.

9.4. iDREAM.

В изучении реакторных нейтрино на данный момент используют сцинтилляционные детекторы. В них используется захват антинейтрино протоном с рождением позитрона и нейтрона. Подобная реакция использовалась еще в Саванна Ривер, однако на сегодняшний день возможно строить более эффективные и компактные



Рис. 52. Эксперимент Daya Bay.

детекторы. Одной из разработок в данном направлении является iDREAM — промышленный детектор реакторных антинейтрино.

Спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) создан совместными усилиями специалистов НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова и НИЦ Курчатовский институт. Уникальными искусственными высокоинтенсивными источниками электронного антинейтрино являются современные энергетические ядерные реакторы. Для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области физики нейтрино вблизи АЭС, имеющих, как правило, несколько реакторов строятся лаборатории, в которых устанавливаются большие жидкосцинтилляционные спектрометры с массой мишени десятки и сотни тонн. Достижения в области экспериментальной техники детектирования антинейтрино, хорошо отработанные и ставшие доступными благодаря большим детекторам антинейтрино, позволили перейти к созданию компактных недорогих детекторов, направленных на внедрение нейтринного метода мониторинга в промышленную ядерную энергетику.

9.5. Эксперимент K2K.

K2K — первый запущенный эксперимент с пучком дальних ускорительных нейтрино. Эксперимент проходит в настоящее время в Японии: ведется набор статистики нейтринных взаимодействий.

Для формирования пучка нейтрино используется стандартный протонный пучок ускорителя KEK PS с энергией 12 ГэВ. Сформированный на ускорителе нейтринный пучок имеет среднюю энергию 1,4 ГэВ и проходит внутри Земли расстояние 250 км до детектора Super-Kamiokande (250 км – пролетная база эксперимента).

Название эксперимента расшифровывается следующим образом: КЕК To(2) Kamiokande – K2K. Детектор Super-Kamiokande используется в качестве дальнего детектора, а вблизи ускорителя на расстоянии 300 м находятся еще 3 детектора:

1. черенковский детектор с массой 1000 тонн, аналогичный Super-Kamiokande
2. сцинтилляционно-фибровый трекер
3. мюонный телескоп.

Эксперимент был запущен в 1999 году.

9.6. Ускорительные эксперименты по детектированию нейтрино

Основной задачей в происходящих и готовящихся сейчас ускорительных экспериментах является поиск нейтринных осцилляций.

Все ускорительные эксперименты по их организации можно разделить на 3 класса:

1. инклюзивные, в которых измеряется поток нейтрино исходного аромата — мюонных, а признаком нейтринных осцилляций является уменьшение потока мюонных нейтрино, по сравнению с исходным
2. эксклюзивные, в которых определяется появление в пучке новых ароматов нейтрино: электронных и таонных.
3. смешанные инклюзивно-эксклюзивные эксперименты.

На чувствительность инклюзивных экспериментов влияет погрешность в измерении первоначального потока нейтрино и неточности в определении в нем примесей других ароматов нейтрино, а на точность эксклюзивных экспериментов оказывает влияние только второй фактор.

Еще одну классификацию ускорительных экспериментов можно провести по взаимному расположению ускорителя и детектора:

1. короткобазовые (эксперименты с «близкими» нейтрино): детектор и ускоритель расположены на небольшом расстоянии;
2. дальнебазовые (эксперименты с «дальними» нейтрино): детектор и ускоритель расположены на значительном расстоянии (как минимум больше одного, а желательно несколько сот километров).

На данный момент было проведено значительное число короткобазовых экспериментов на ускорителях CERN PS, FNAL, CERN SPS, BNL AGS, У-70: CHARM, CDGS, CCFR, BEBS, CHARM II, ..., - но все они смогли дать лишь довольно грубые ограничения на параметры осцилляций. А главное, все эти эксперименты не смогли исследовать область параметров: $\Delta m^2 = 10^{-4} - 10^{-3}$ при $\sin^2 2\theta = 1$, - указания на осцилляции в которой были получены из экспериментов с солнечными и атмосферными нейтрино. Для исследования этой области необходимо проведение дальнебазовых экспериментов.

В свою очередь дальнебазовые эксперименты можно организовать несколькими способами:

1. используя один детектор (т.е. расстояние между детектором и ускорителем фиксировано);

2. используя как минимум два детектора: один из них расположен вблизи ускорителя, а другой — на значительном от него расстоянии (в этом случае расстояние между детектором и ускорителем как бы варьируется).

В случае использования двух детекторов в дальнем частота взаимодействий на единицу массы детектора в 5-6 раз меньше, чем в ближнем из-за расходимости пучка на больших расстояниях. Поэтому дальний детектор должен иметь большую эффективную массу.

Вне зависимости от конкретной техники регистрации, используемой в эксперименте, для достоверного детектирования осцилляций нейтрино необходимо два измерения некой характеристики пучка нейтрино (интенсивности или спектра) с целью их сравнения между собой. Если в инклюзивных экспериментах возможны несколько способов детектирования для регистрации нейтрино:

1. использование реакций на заряженных токах (CC—метод);
2. использование реакций на заряженных токах и реакций на нейтральных токах (CC/NC-метод) — в случае нейтринных осцилляций соотношение между количеством нейтринных CC событий и количеством событий, зарегистрированных посредством NC-реакций, отличается от теоретически предсказанного;
3. спектрально-энергетический метод - исследование энергетического спектра нейтрино, форма которого изменяется в случае осцилляций: на изначально гладком спектре появляются характерные пики - то в эксклюзивных экспериментах детектирование происходит только посредством CC-реакции, чувствительных к конкретным ароматам нейтрино.

10. Лекция 10. Осцилляторная индустрия

10.1. Основные направления в экспериментальной физике нейтрино.

Все современные эксперименты по регистрации нейтрино можно разделить на следующие типы:

1. Эксперименты с солнечными нейтрино
2. Эксперименты с атмосферными нейтрино
3. Реакторные эксперименты
4. Ускорительные эксперименты
5. Регистрация нейтрино от взрывов сверхновых (как правило, как дополнительная задача в других типах экспериментов)
6. Эксперименты с высокоэнергетичными нейтрино (нейтринные телескопы)

а также следует отметить эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета-распада.

Что характерно, эксперименты первых четырех типов были предложены еще Б.М. Понтекорво для поиска доказательства нейтринных осцилляций.

В зависимости от энергий и происхождения, детектирование нейтрино происходит разными способами. Поэтому необходимо иметь представление о том, откуда приходят к нам эти частицы. Надо помнить также основную проблему работы с нейтрино — крайне слабое взаимодействие с веществом.

Самые многочисленные нейтрино — реликтовые. К сожалению, их энергия крайне мала, и весь этот поток остается нами незамеченным. Далее идут солнечные и гео-нейтрино — первые вполне поддаются регистрации на многих детекторах, вторые же обыкновенно являются фоном. Следующими по энергиям наблюдаются нейтрино от некоторых астрофизических процессов, ускорителей и реакторов. Еще выше лежат энергии атмосферных нейтрино и нейтрино, испускаемых квазарами. Потоки этих частиц с ростом энергий убывают, что осложняет их детектирование. Некоторым облегчением впрочем может послужить тот факт, что при росте энергий нейтрино растет и их сечение взаимодействия с веществом.

Методы, применяемые для регистрации нейтрино, очень сильно зависят от их источника. В изучении различных нейтрино космического происхождения одну из ключевых ролей играет черенковское детектирование. Оно требует большого объема детектора, однако хорошо зарекомендовало себя. Принцип работы данного метода следующий: ультрарелятивистское нейтрино в случае взаимодействия с веществом порождает заряженный лептон сверхвысокой энергии. Этот лептон, двигаясь со скоростью, превышающей скорость света в среде, порождает излучение Вавилова-Черенкова, которое возможно зафиксировать фотоумножителями. Этот метод используется в детектировании нейтрино галактического и внегалактического происхождения на так называемых нейтринных телескопах (Байкал, KM3Net, ANTARES, IceCUBE), а также в знаменитых экспериментах по регистрации солнечных нейтрино в Камиоке (Япония).

В изучении реакторных нейтрино на данный момент используют сцинтилляционные детекторы. В них используется захват антинейтрино протоном с рождением

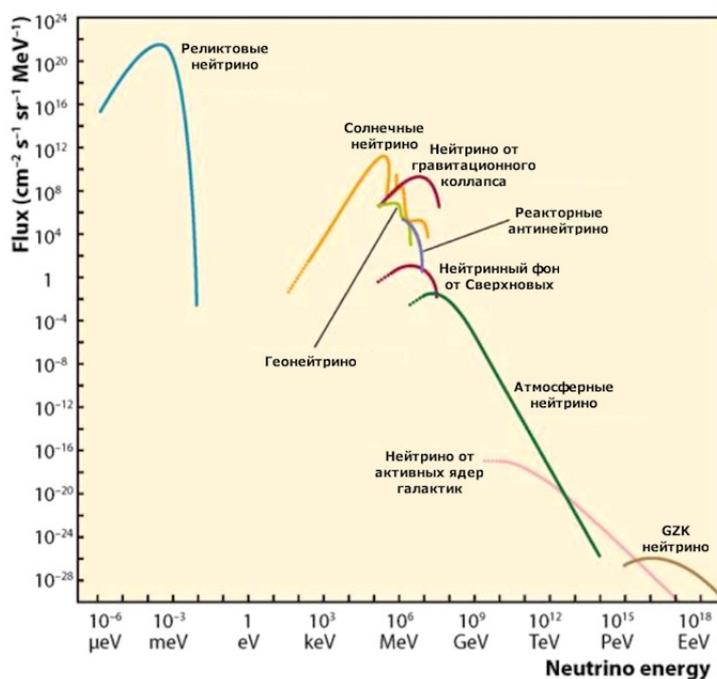


Рис. 53. Энергии различных видов нейтрино.

позитрона и нейтрона. Подобная реакция использовалась еще в Саванна Ривер, однако на сегодняшний день возможно строить более эффективные и компактные детекторы. Одной из разработок в данном направлении является iDREAM — промышленный детектор реакторных антинейтрино.

В эксперименте OPERA для фиксации взаимодействий нейтрино используются фотоэмульсии, которые перемежаются слоями низкофонового свинца. Кроме того, дополнительную информацию дают сцинтилляционные детекторы, дополнительные пластины фотоэмульсий, а также детекторы мюонов.

Из перспективных, но нуждающихся в развитии методов можно отметить галлий-германиевый детектор, который имеет более низкий порог регистрации нейтрино по энергии. Идея метода существует довольно давно, и он позволил зафиксировать, к примеру, солнечные нейтрино от водородного цикла. Но, в отличие от хлор-аргонового метода, в галлий-германиевом гораздо острее стоит проблема выделения продукта реакции. Именно это затрудняет работу детекторов.

Даже в современных методах регистрации фиксируется довольно малый процент приходящих нейтрино, и это составляет значительную трудность.

10.2. Эксперимент KATRIN.

KATRIN - сокращенное название эксперимента KARlsruhe TRItium Neutrino, который находится в стадии подготовки в Технологическом институте Карлсруэ, Германия.

Проект, запущенный в 2001 году, предназначен для определения абсолютной шкалы масс нейтрино, наиболее важного открытого вопроса в физике нейтрино. Ано-

мально малая масса нейтрино является однозначным указанием на физику, выходящую за рамки Стандартной модели элементарных частиц. На самых больших масштабах нейтрино участвуют в формировании видимой структуры Вселенной, влияя на формирование и распределение галактик.

Экспериментальный метод основан на работе В.М.Лобашева и П.Е.Спивака, которые в 1983 году предложили новый тип электростатического спектрометра, использующий эффект магнитной адиабатической коллимации. Установка, включающая такой спектрометр и безоконный газовый источник трития, была создана в ИЯИ и первые результаты опубликованы в 1994 году

10.3. Эксперимент OPERA.

OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) — эксперимент по изучению нейтринных осцилляций. Он направлен на доказательство гипотезы превращения одних типов нейтрино (электронные, мюонные и тау-нейтрино) в другие. В 2010 году в рамках эксперимента были получены прямые доказательства того, что мюонные нейтрино могут превращаться в тау-нейтрино.

Для эксперимента используется пучок мюонных нейтрино, создаваемый протонным суперсинхротроном (SPS) ЦЕРН в Женеве направленный в подземную лабораторию Гран-Сассо (LNGS), где находится детектор OPERA, использующийся в первую очередь для выявления тау-нейтрино, появляющихся от осцилляций мюонных нейтрино. Путь в 732 километра от ЦЕРН до лаборатории Гран-Сассо занимает у частиц 3 миллисекунды. Детектор проекта OPERA состоит из примерно 150 тысяч элементов («кирпичей» (brick)) общей массой 1300 тонн: свинцовых пластин, прослоенных эмульсионной плёнкой весом 8,3 кг каждая. Кроме них аппарат комплектуется электронными детекторами и другой вспомогательной инфраструктурой. Его сооружение было начато в 2003 году и завершено весной-летом 2008 года. В данный момент эксперимент в своей активной фазе.

10.4. Детектирование атмосферных нейтрино.

10.5. Эксперимент MACRO.

MACRO — это универсальный детектор большой площади, расположенный в Лаборатории Гран Сассо и предназначенный для поиска редких событий в космическом излучении. Одной из его задач являлось измерение потока атмосферных мюонных нейтрино и поиск нейтринных осцилляций. В отличие от других ранее описанных экспериментов, детектировались не непосредственно нейтрино, а мюоны, которые образуются при прохождении нейтрино сквозь Землю. Детектор строился и вводился в эксплуатацию в несколько стадий, отдельными модулями, в период с 1988 г. по 1995 г. Набор информации на нем продолжался до декабря 2000 г.

Детектор MACRO изображен на рис. X, его размеры составляли 76,5 x 12 x 9,3 м². Масса детектора достигала 5300 тонн.

Нижняя часть детектора содержала десять горизонтальных плоскостей трековых камер, прослоенных поглотителем из бетона; еще четыре горизонтальных плоскости находились в верхней части. На боковых стенках располагались вертикальные

плоскости трековых камер. В состав установки входили три горизонтальные плоскости сцинтилляционных счетчиков: одна — под установкой, другая — сверху в виде крыши и одна между ними. Вертикальные боковые стороны также были покрыты плоскостями сцинтилляционных счетчиков. Мюоны, входящие в детектор снизу, образуются атмосферными мюонными нейтрино в веществе Земли. Длину пробега нейтрино в Земле можно оценить, используя измеряемое направление мюона, приблизительно сохраняющего направление нейтрино.

Треки мюонов, пересекающих детектор, устанавливаются по данным трековых плоскостей, а разделение на идущие вверх или вниз — по времени пролета, измеряемому сцинтилляционными счетчиками. Поток мюонов вверх очень низок, менее 100 мюонов в год. Именно время-пролетная методика дает для MACRO коэффициент подавления 10^7 для мюонов, летящих в детектор сверху, что достаточно для уверенного отделения их от мюонов, идущих снизу. Как известно, мюоны попадающие в детектор сверху генерируются при распаде мезонов, образованных в атмосфере космическими лучами. И даже под землей, где их поток ослабляется в 10^6 раз, они образуют фон очень высокой интенсивности, который, как видно из всех описаний практически всех нейтринных детекторов, приходится учитывать при детектировании.

10.6. Детекторы высокоэнергетичных нейтрино (нейтринные телескопы)

Характерной особенностью нейтринных телескопов является то, что они должны иметь большие размеры по сравнению с детекторами низкоэнергетичных солнечных, реакторных или атмосферных нейтрино. В связи с этим нейтринные телескопы как правило размещают в естественных водоемах: озеро Байкал, Средиземное море - или в антарктическом льду. При этом их устанавливают на большой глубине для защиты от фонового излучения и в связи с тем, что с глубиной оптические свойства воды (льда) улучшаются. Если сравнивать воду и лед по их оптическим свойствам, то нужно отметить ряд факторов:

1. длина поглощения во льду в 1,5 раза больше, чем в океане и в 4 раза больше чем в Байкале, что приводит к требованиям большего размера детектора и уменьшает вероятность регистрации события
2. оптическое рассеяние черенковского света во льда также больше, чем в воде, что приводит к задержкам при регистрации события
3. неоднородность льда изменяется с глубиной сильнее, чем в воде, что усложняет процесс выбора необходимой глубины для детектора
4. вода содержит значительную долю калия, в отличие от льда, что затрудняет детектирование
5. на детектирование во льду не может влиять биолуминесценция
6. фон от внешних источников фотонов во льду существенно меньше, чем в воде: вклад фона в частоту регистрации событий для воды составляет от десятков до сотен kHz, а для льда – порядка 500 Hz.

Подводя итог, можно сказать, что водные детекторы все-таки выглядят предпочтительнее для будущих экспериментов.

10.7. Источники нейтрино.

В самом общем случае все источники нейтрино можно разделить на 3 группы:

1. Космические нейтрино
2. Нейтрино от естественных источников на Земле, возникающие в процессах бета-распада радионуклидов
3. Нейтрино от искусственных источников, к ним относятся реакторные антинейтрино и ускорительные нейтрино.

Космические нейтрино в свою очередь имеют 4 основных источника.

Первый из них — это реликтовые (или космологические) нейтрино, оставшиеся от Большого Взрыва. Согласно модели горячей Вселенной в настоящее время их температура около 2К.

Вторым источником нейтрино служат ядерные реакции, идущие в ядрах звезд. Например, для подтверждения механизмов светимости Солнца и подтверждения существования нейтринных осцилляций очень интересны измерения потока солнечных нейтрино. Кроме реакций горения в звездах интерес представляют также взрывы сверхновых звезд и звездные гравитационные коллапсы. В результате последних двух процессов температура в центре звезды поднимается настолько, что рождаются позитроны, π -мезоны (пионы) и мюоны. Энергии звездных нейтрино находятся в основном в диапазоне от 0 до нескольких десятков МэВ.

Третий тип внеземных нейтрино – это нейтрино, которые рождаются космическими лучами при их взаимодействии с такими космическими объектами как ядра галактик, взорвавшиеся сверхновые, пульсары, черные дыры и др. Как известно космические лучи примерно на 80 процентов состоят из протонов. Ускоренные до высоких энергий протоны (или более тяжелые ядра), сталкиваясь с ядрами атомов или с низкоэнергетичными фотонами, производят π - и K-мезоны, в результате распада которых возникают нейтрино высоких энергий. Их энергетический диапазон, доступный регистрации, простирается от нескольких десятков ГэВ до, возможно, $10^{15} - 10^{16}$ эВ.

Четвертым источником высокоэнергетичных нейтрино являются реакции, возникающие при попадании в атмосферу Земли космических лучей. Протоны космических лучей в результате столкновения с атомами воздуха (в частности азота) рождают заряженный пион, который распадается на мюон и мюонное нейтрино. Мюон в свою очередь распадается на электрон, низкоэнергетичное электронное антинейтрино и высокоэнергетичное мюонное нейтрино. Энергетический диапазон этих нейтрино примерно такой же, как и у звездных нейтрино.

Изучением космических нейтрино занимаются 2 раздела физики:

1. нейтринная астрофизика изучает процессы внутри космических объектов, происходящие с участием нейтрино.
2. нейтринная астрономия изучает методы детектирования нейтрино.

10.8. Акустические детекторы.

Так как акустический метод находится на стадии разработки и кажется перспективным, то некоторые нейтринные телескопы включают акустическую технику вме-

сте с другим, например, черенковским, детектором. Ниже дадим краткое описание таких экспериментов.

10.8.1. Brookhaven National Laboratory и Harvard University (1978).

Это был первый эксперимент по проверке выдвинутого в 1957 году термоакустического метода генерации сигнала от заряженных частиц. В эксперименте использовались пучки протонов диаметром 4,5 см с энергией до 200 МэВ. Механизм был подтвержден, и затем в 1976 году также Аскарьяном был предложен способ применить этот же метод к регистрации нейтрино. А именно, были рассчитаны параметры установки в океане для нейтрино с энергией больше 10^{16} эВ, содержащей 10^5 гидрофонов в виде пространственной решетки с шагом около 100 м. Она будет охватывать объем 10км x 10км x 1км и в соответствии с теорией регистрировать около 1000 нейтринных событий в год.

При регистрации одного события в установке будет срабатывать в среднем 50 гидрофонов.

Пространственно-временные корреляции в срабатывании гидрофонов, связанные с характерным видом акустического сигнала, должны обеспечить выделение его на уровне шумов. Кроме того, оставшиеся гидрофоны могут служить как детектор антисовпадений и являться защитой от внешних сигналов.

10.8.2. Study of Acoustic Ultrahigh-energy Neutrino Detection (SAUND).

Детектор расположен на морском дне, недалеко от Багамских островов на базе военно-морской локации AUTECS. Проект реализовывался в две стадии. На первой (SAUND1) установка содержала 7 гидрофонов на глубине около 1100 м.

По разнице времени прихода сигнала на каждый гидрофон определяется его направление и расстояние до источника.

10.8.3. Acoustic COsmic Ray Neutrino Experiment (ACORNE).

Система сбора данных была установлена на военном массиве гидрофонов Рона в Шотландии, предназначенном для детектирования подводных лодок. Массив расположен в акустически тихом месте, и чувствительность гидрофонов вполне соответствует требованиям для детектирования импульсов от заряженных частиц. Детектор стоит на глубине около 200 м, шумы окружающей среды хорошо изучены. Средняя температура воды приблизительно 10 градусов в течение всего года. Наиболее подходящими для регистрации каскадов являются гидрофоны, расположенные вокруг центра массива. Они находятся в толще воды и содержат лучшие сенсоры, а также меньше страдают от фона, обусловленного повторными отражениями, который приходится учитывать для гидрофонов, установленных вблизи поверхности или морского дна. Данные по аналоговым кабелям доставляются на береговой компьютерный центр.

Выгодной отличительной чертой этого эксперимента от других является то, что массив гидрофонов уже существует, развернут, а также то, что условия и шумы

окружающей среды хорошо известны, что позволяет более эффективно выделить реальные сигналы.

Кроме того, было бы интересно и полезно сравнить данные, полученные в различных морских условиях на массиве Роны и на американском гидроакустическом массиве AUTECS.

10.8.4. ANTARES Modules for Acoustic Detection Under the Sea (AMADEUS) в Средиземном море.

Расположенные на глубине более 2000 метров, акустические сенсоры AMADEUS основаны на пьезо-керамических элементах для широкополосного детектирования сигналов с частотами до 125 кГц.

Конструкция телескопа ANTARES представляет собой вертикальные струны (линии), прикрепленные к морскому дну, на которых держатся акустические и оптические модули детектора.

Акустические данные непрерывно собираются и обрабатываются на компьютере каждого кластера, где применяются алгоритмы фильтров для выделения событий, которые с высокой точностью могут соответствовать сигналам от нейтрино. Для оценки фона были исследованы характеристики окружающего шума и переходные сигналы на глубине около 2 километров.

Сами акустические модули имеют три разных конфигурации. Два типа отличаются направлением датчиков (вверх или вниз), в которых пьезоэлектрические элементы покрыты полиуретаном, а в третьем типе модулей по два сенсора установлены на поверхности стандартной стеклянной сферы, внутри которой располагается соответствующая электроника. Такие сферы используются для фотоэлектронных умножителей черенковского детектора.

10.8.5. Acoustic Positioning System (APS)

Это система, включенная в проект KM3NeT. Состоит из акустических синхронизированных трансиверов (устройств, в которые включен и приемник, и передатчик сигнала), фиксированных якорями на морском дне. Гидрофоны будут прикреплены к структурным элементам детектора рядом с фотоэлектронными умножителями. Предполагаемый диапазон энергий начинается от 10^{18} эВ.

Тип и конструкция сенсоров для будущего акустического детектора сейчас выбирается исходя из многих параметров: устойчивость к высокому давлению, хорошая чувствительность, низкий уровень внутреннего шума и другие. Одним из вариантов сейчас рассматривается серия Free Flooded Ring (FFR) модели FFR-SX30. Несмотря на то, что они пьезо-керамического типа, их свойства вполне соответствуют условиям глубоководного детектора. Они работают в полосе частот 20 – 40 кГц и были протестированы в чистой воде в лаборатории, в бассейне и в морской воде. После этого трансиверы системы были интегрированы в инструментальную линию акустического детектора в рамках проекта ANTARES.

Инструментальная линия была успешно развернута на окончательной позиции на глубине 2475 м 7-го июля 2011 года. Система акустического позиционирования, которая является базовой системой электроники и программного обеспечения

будущего детектора, называется Sound Emission Board (SEB). Для проверки этой системы в глубоководной среде и ее применимости к регистрации нейтрино вообще и акустическому позиционированию в частности, прототипы ее были интегрированы в двух различных местах: в инструментальной линии телескопа ANTARES и в акустическую систему эксперимента NEMO II.

10.8.6. Deep Underwater Muon And Neutrino Detection (DUMAND).

Проект существовал с 1976 по 1995 год. Это был первый нейтринный глубоководный телескоп, в Тихом океане на глубине 4800 метров недалеко от Гавайских островов. Основная идея этого детектора состояла в том, что гидрофоны должны были регистрировать акустические волны, возникающие при ударе адронного или электромагнитного каскада о поверхность океана.

10.8.7. Geological Exploration Neutrino Induced Underwater Sound (GENIUS)

Проект применения пучков нейтрино в геофизике. Сформированный на сверхмощном ускорителе, такой пучок нацеливается в заданном направлении и проходит значительное расстояние в Земле. По мере распространения пучок генерирует акустическое излучение. Оценки показывают, что пучок нейтрино, созданный протонным кольцевым ускорителем (геотроном) на энергии 10 ТэВ на дистанции 1000 км и на глубине 10 км в Земле, должен иметь диаметр около 20 м и генерировать акустические импульсы с амплитудой 10-5 Па в полосе частот около 90 Гц с центральной частотой 100 Гц.

Такие импульсы могут быть зарегистрированы решеткой акустических приемников – геофонов на поверхности Земли или гидрофонов в воде. Фиксируя изменения акустического сигнала вдоль трассы пучка, можно получить информацию о типе пород и полезных ископаемых на довольно больших глубинах в Земле.

10.8.8. South Pole Acoustic Test Setup (SPATS).

Тестовый акустический детектор в составе эксперимента IceCube, главной целью которого является детектирование нейтрино с энергией в районе ГЗК-области спектра и изучение акустических свойств полярного льда. Разработка проекта была начата в 2005 году, а спустя 18 месяцев, в январе 2007 года были успешно установлены и развернуты три струны детектора (A, B, C).

Тип чувствительных датчиков – пьезокерамика.

10.8.9. Sea Acoustic Detector of Cosmic Objects (SADCO)

Проект нейтринного телескопа в рамках эксперимента NESTOR в Ионическом море. Объем детектора предполагался более 10^8 м³ на глубине 3.5 – 4 км. Диапазон регистрируемых энергий – выше 10^{17} эВ. Тестовая конструкция была протестирована около Камчатки. Массив состоял из 2400 гидрофонов, установленных на морском шельфе и соединенных кабелем с электронным оборудованием на берегу. Угол обзора составлял 120 градусов. Регистрировались частицы с энергией больше

10^20 эВ в очень большом объеме воды. Главной задачей было составить алгоритмы выделения нейтринных событий, и для калибровки системы со специального корабля посылались акустические сигналы, симулирующие импульсы от нейтрино с разными пространственно-временными параметрами.

10.8.10. Ocean Noise Detection Experiment (NEMO-OvDE).

Детектирующая система в рамках проекта NEMO, работала с января 2005 по ноябрь 2006 года. Состояла из 4 синхронизированных гидрофонов на глубине 2000 м в 25 км от берега, детектировавших акустические волны в диапазоне 10 Гц — 40 кГц. По оптическим кабелям данные поступали на береговой центр, где анализировались в реальном времени. Сейчас проводятся исследования фона, биоакустических сигналов (песни китов, дельфинов и пр.) и проверка алгоритмов реконструкции событий.

10.8.11. NEMO Phase II – Acoustic Positioning and Acoustic Physics.

Детектор представляет собой вертикальную башню из 64 оптических элементов на 16 этажах общей высотой 750 м, помимо них содержал еще 34 гидрофона для системы акустического позиционирования.

10.9. О тёмной материи.

Несмотря на то, что конкретный состав темной материи сегодня остается открытым, ее природа предполагает, что кандидатами на эту роль должны быть массивные, нейтральные и стабильные в космологических масштабах времени частицы. Также ожидается, что они участвуют только в гравитационных (и, возможно, слабых) взаимодействиях. Казалось бы, нейтрино подходят под такие критерии. Однако, имея релятивистские скорости, нейтрино не могут быть привлечены для объяснения некоторых явлений, по предположению связанных с наличием темной материи: вращение спиральных рукавов галактик, слияние галактических кластеров и другие. Впрочем, не являясь непосредственно WIMP-ами (Weakly Interacting Massive Particles — Слабо Взаимодействующими Массивными частицами, составляющими темную материю), теоретически нейтрино могут с ними взаимодействовать.

Поиск аннигиляций частиц темной материи с образованием частиц Стандартной Модели: правополяризованных кварков и цветных скаляров (глюонов) тесно связан с наблюдением нейтринных потоков высокой энергии. Такой подход позволяет изучать захват и аннигиляцию частиц темной материи, получать информацию о ней - не прямым методом, но, тем не менее, рассчитываемым и обоснованным. На данный момент можно заключить, что в центре Солнца не достигается термического равновесия, если предполагать аннигиляцию частиц темной материи только с образованием b -кварков. Поэтому рассматриваются и учитываются другие каналы. Для условий в центре Земли, скорее всего, равновесия нет даже при условии аннигиляции в пары u -кварков и b -кварков. Однако, наблюдение высокоэнергетичных потоков нейтрино из центра Земли теоретически возможно, хотя и оказывается сильно подавленным из-за маленькой частоты аннигиляций. Сравнивая оценки с

данными, полученными в других экспериментах и наблюдениях (например, телескоп PAMELA, работающий на орбите и также собирающий информацию о темной материи), можно дополнять и совершенствовать модели. В частности, для константы взаимодействия частиц темной материи и u -кварков при маленьком отношении масс между частицами WIMP и скалярами, по результатам работы нейтринного телескопа IceCube можно дать более сильные ограничения, чем те, что следуют из наблюдений PAMELA

10.10. Майорановы нейтрино (проект GERDA).

Германиевый детекторный приемник, GERDA, предназначен для поиска двойного безнейтринного бета распада ^{76}Ge . Важность такого поиска придает особое значение доказательству ненулевой массы нейтрино с осцилляциями флэйворных нейтрино. Безнейтринный распад является одним из наиболее чувствительных щупов к пока еще неизвестным свойствам, таким как типы нейтрино и их масса.

Осцилляции нейтрино дают информацию только о Δm^2 — изменения квадратов масс нейтрино, но не собственные массы. Двойной безнейтринный бета-распад может дать информацию об абсолютном значении массы нейтрино.

Кроме того, нейтрино (с заданными свойствами) само может быть античастицей. Фермионы этого типа называются майорановскими частицами, в отличие от дираковских частиц. Распад нарушает главное лептонное число на две единицы ($\Delta L = 2$), и это возможно только тогда, когда нейтрино является майорановской частицей. В Стандартной Модели нейтрино безмассовые частицы, однако, за пределами Стандартной Модели при включение массивных нейтрино возникают существенные различия между майорановскими и дираковскими нейтрино. Это означает, что наблюдение распада дает уникальную возможность для проникновения далеко за пределы Стандартной Модели.

Двойной безнейтринный бета-распада может совершаться с помощью различных процессов, но каждый из них требует, чтобы нейтрино обладало ненулевой массой и являлось майорановской частицей. Наиболее приближенной теоретической моделью является промежуточный безнейтринный двойной бета-распад с помощью обмена легкими Майорановскими нейтрино или смесь правых токов в слабом взаимодействии. Этот процесс может быть также инициирован обменом суперсимметричных частиц и рассматривается в некоторых суперсимметричных моделях. Распад является очень чувствительным датчиком для определения эффективной массы майорановского нейтрино

Принципиальная схема эксперимента GERDA основана на более раннем предложении расположить открытые Ge детекторы внутри криогенного щита большого объема. Эта идея основана на наблюдениях того, что фоновые сигналы в значительной мере контролируются внешним излучением. Открытые Ge детекторы будут погружены прямо в жидкий аргон. Криогенный объем окружен слоем сверхчистой воды, играющей роль дополнительного нейтронного и гамма щита, как показано на эскизе принципиальной схемы GERDA.

Такой распад (с двумя нейтрино) разрешен стандартной теорией слабых взаимодействий, хотя вероятность его сильно подавлена по сравнению с обычным бета-

распадом. Если же существует несохранение лептонного числа, то распад может происходить без испускания двух нейтрино. Тогда суммарная энергия двух электронов строго фиксирована: 2039 кэВ, что можно было бы увидеть в спектре распада.

Наблюдение данного эффекта может иметь достаточно серьезное значение, поскольку нарушение лептонного числа, хотя и не противоречит каким-то фундаментальным принципам, но должно было бы существенно повлиять на теорию слабых взаимодействий. Одним из возможных объяснений является вариант Стандартной Модели, в котором нейтрино являются истинно нейтральными (майорановскими) частицами, то есть, когда нейтрино и антинейтрино — это одно и то же. С этой точки зрения двойной безнейтринный бета-распад имеет тот же статус, что и осцилляции нейтрино - эффект, который давно ищут, и не исключено, что уже нашли.

Еще одним результатом такого эксперимента может быть определение верхнего порога на массу нейтрино из оценки времени полураспада.



Рис. 54. Схема эксперимента, система синхронизации и карта, на которой показаны расположение ЦЕРН, Гран-Сассо и траектория нейтрино.

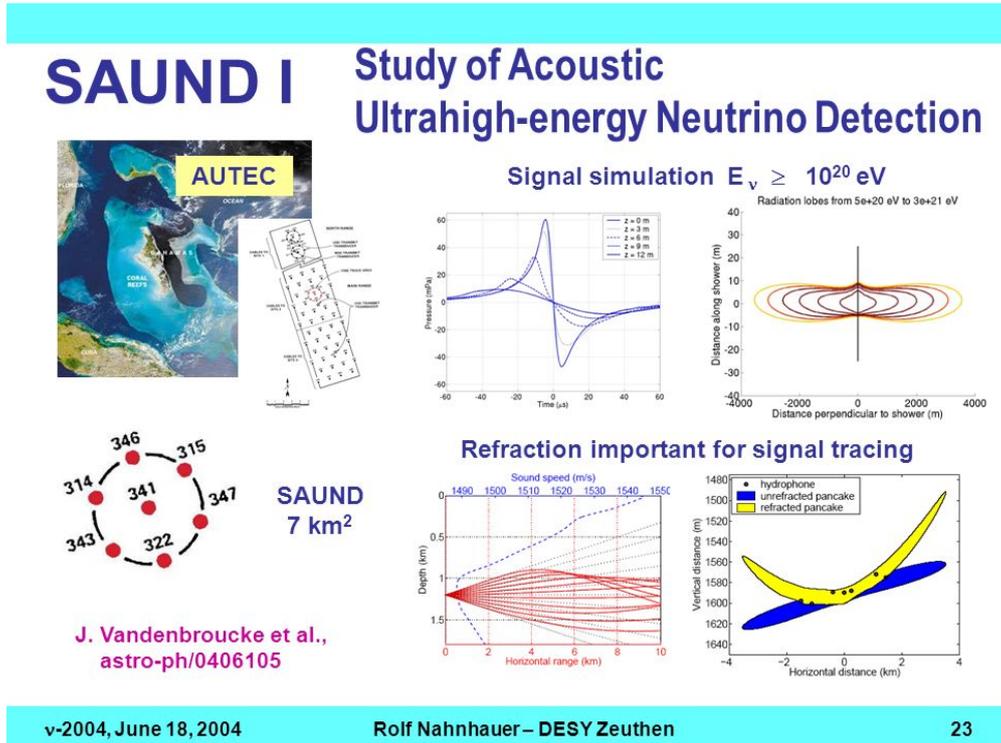


Рис. 55. Детектор из семи гидрофонов первой стадии эксперимента SAUND.

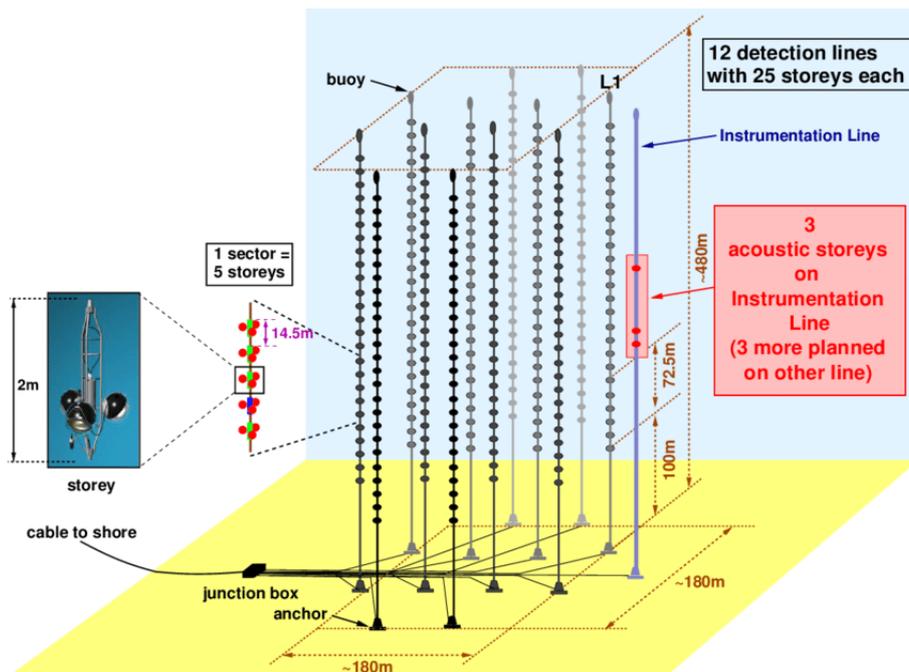


Рис. 56. Схема детектора ANTARES и системы акустических модулей в нем.

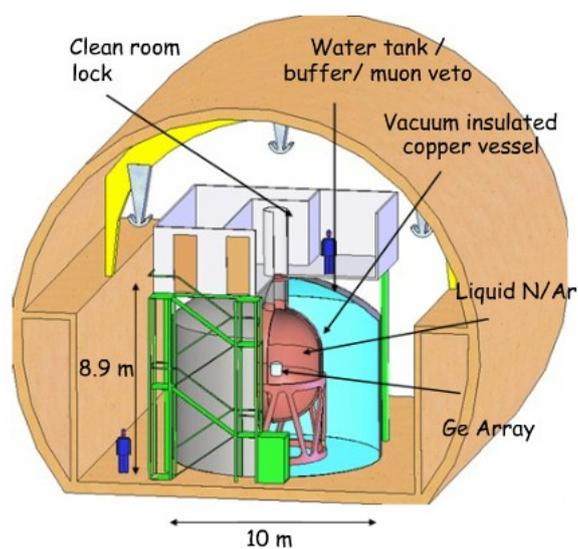


Рис. 57. Эскиз принципиальной схемы GERDA.



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА



teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ