



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

# НЕВИДИМАЯ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА НЕЙТРИНО: УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И РОЛЬ В СТАНОВЛЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МАТЕРИИ

СТУДЕНИКИН  
АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

---

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).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА  
СТУДЕНТКУ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ  
**ГИРЕНКО ЕЛЕНУ ЮРЬЕВНУ**



## Содержание

<b>Лекция 1. Общая информация о нейтрино</b>	<b>5</b>
1.1. О курсе	5
1.2. Введение	5
1.3. Общая информация о нейтрино	5
<b>Лекция 2. Этапы становления представлений об устройстве мира, связанные с нейтрино</b>	<b>15</b>
<b>Лекция 3. Структура материи</b>	<b>19</b>
3.1. Лауреаты Нобелевской премии по физике	19
3.2. Структура материи	20
3.3. Типы взаимодействия	22
3.4. Историческая справка	25
<b>Лекция 4. История нейтрино: познание фундаментальных законов природы</b>	<b>28</b>
4.1. Открытие нейтрино	28
4.2. Несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях	29
4.3. Изучение нейтрино	31
4.4. Физика нейтрино	32
<b>Лекция 5. История изучения нейтрино</b>	<b>38</b>
5.1. Взаимодействие элементарных частиц	38
5.2. Бозон Хиггса	38
5.3. История изучения нейтрино	40
<b>Лекция 6. Свойства нейтрино</b>	<b>49</b>
6.1. Фундаментальные проблемы физики нейтрино	49
6.2. Типы нейтрино	50
6.3. Свойства нейтрино	51
<b>Лекция 7. Вклад Б. М. Понтекорво в физику нейтрино</b>	<b>58</b>
7.1. Решение проблем солнечного и атмосферного нейтрино	58
7.2. Основные достижения и открытия Бруно Максовича Понтекорво	59
<b>Лекция 8. Основные этапы жизни Бруно Понтекорво</b>	<b>64</b>
<b>Лекция 9. Явления смешивания и осцилляций нейтрино</b>	<b>66</b>
9.1. Явления смешивания и осцилляций нейтрино	66
9.2. Краткое визуальное введение в экспериментальную часть изучения физики нейтрино	69

---

**Лекция 10. Эксперимент JUNO.....74**

## Лекция 1. Общая информация о нейтрино

### 1.1. О курсе

#### Аннотация

Курс посвящен нейтрино, которое занимает особое место среди многих десятков других известных в настоящее время элементарных частиц. Если взглянуть в прошлое и на настоящее Вселенной, то мы убеждаемся, что даже в сумме количество обычных частиц, из которых состоит обычное вещество - электронов, протонов и нейтронов - значительно меньше, чем количество нейтрино.

Целью курса, который адресован всем студентам вне зависимости от факультета, вне зависимости от ваших интересов, является обсуждение уникальных свойств нейтрино.

В курсе будет продемонстрирована ключевая роль изучения нейтрино в становлении на протяжении последних ста лет современных представлений о структуре материи, а также для достижения в будущем более глубокого понимания устройства мира.

### 1.2. Введение

Михаил Васильевич Ломоносов является одним из инициаторов создания Московского государственного университета. Ниже приведены слова, принадлежащие М.В. Ломоносову:

«Создатель дал роду человеческому две книги.

В одной Он показал Своё величество, в другой – Свою волю.

Первая – видимый сей мир, Им созданный,

чтобы человек, смотря на огромность,

красоту и стройность его зданий,

признал Божественное всемогущество,

по мере себе дарованного понятия.

Вторая книга – Священное Писание.

В ней показано Создательво благоволение

к нашему спасению...

Обои обще удостоверяют нас не токмо

о бытии Божиим, но и о несказанных

к нам его благодеяниях.

Грех всевать между ними плевелы и раздоры».

Независимо от того, какого мировоззрения придерживается каждый человек, и независимо от представлений каждого о том, как устроен мир, квинтэссенцию слов Ломоносова можно отразить в следующем утверждении: «Окружающий нас мир прекрасен и познаваем».

### 1.3. Общая информация о нейтрино

*Общее замечание:* «Всё что нас окружает, весь материальный мир состоит из элементарных частиц».

*Нейтрино* – это элементарная частица.

Обозначение:  $\nu$  – греческая буква «ню», по-английски – neutrino [*nju: 'tri: nau*].

Этимология: название произошло от итальянского "*neutro*" – «нейтральный» + «но», как Чиполлино, Буратино или чинзано.

Нейтрино играет важнейшую роль во многих явлениях, происходящих в окружающем нас мире.

Без нейтрино невозможно объяснить:

- процессы на ранней стадии эволюции Вселенной;
- остывание звезд;
- возникновение и разнообразие химических элементов, из которых состоит все вещество;
- как работает Солнце, дающее нам энергию и делающее возможным само наше существование на Земле.

Нейтрино обладает уникальной проникающей способностью и пронизывает всё пространство.

Ниже приведены спектры энергий природных потоков нейтрино (рис. 1.1, график приведен из монографий по физике нейтрино). По вертикальной оси отмечено количество нейтрино, которые прилетают на Землю в 1 сек через  $1 \text{ см}^2$  – поток нейтрино в единицу времени через единицу поверхности. По горизонтальной оси отложена энергия (в условных единицах).

В физике элементарных частиц часто используется *универсальная система единиц*. Энергия нейтрино измеряется в единицах – eV (электронвольт), т.е. это энергия, которую приобретает электрон.

*Примечание:* электрон – элементарная частица; одна из первых частиц, предсказанных и обнаруженных теоретиками более 100 лет назад (в 1898 году). Электрон имеет массу. Если использовать условные единицы, то масса составляет около половины миллиона электронвольт. Эта информация позволяет оценить масштаб энергии нейтрино и сравнить с массой самой распространенной и известной для широкого общества элементарной частицей:

$$m_e = 0.5 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 0.5 \text{ МэВ}.$$

*Дополнение:* приведем единицы электронвольт – в обычные единицы:

$$1 \text{ эВ} = 2 \cdot 10^{-33} \text{ г}$$

В обычной жизни человек не сталкивается со столь малыми величинами. Однако при изучении фундаментального закона природы, в котором «живет и работает» наш материальный мир, эти величины приобретают свой смысл.

### Источники нейтрино

Рассмотрим шкалу энергий нейтрино по порядку – от самых малых значений.

Типы нейтрино в зависимости от источника:

1) Космологический нейтрино

$10^{-6} \mu\text{eV}$  – самое малое значение энергии спектра.

Космологический нейтрино имеет самый большой пик при энергиях от  $10^{-6} \mu\text{eV}$  до  $10^{-3} \text{ MeV}$ . Известно, что формирование мира начиналось со сгустка энергии, потом

произошел большой взрыв и материя до сих пор расширяется. Примерно через 1 секунду после большого взрыва из материи отделились нейтрино. По вертикальной шкале графика можно говорить о примерном порядке количества нейтрино: около  $10^{-20}$ . Экспериментально эти нейтрино еще не наблюдались. Открытие этих нейтрино является одной из задач фундаментальной физики.

*Примечание:* эксперименты по физике нейтрино невероятно сложные и время на их подготовку может занимать десятки лет.

- 2) Солнечный нейтрино. Солнце является одним из основных источников нейтрино. Энергия нейтрино от солнца имеет разные порядки: от  $10^3 keV$  до  $10^6 MeV$ . Их энергия примерно соответствует массе электрона. Солнечный нейтрино является одним из главных объектов исследования физики нейтрино. По результатам исследования свойств солнечных нейтрино уже были вручены по меньшей мере две нобелевские премии.
- 3) Реакторные нейтрино. В реакторах происходит процесс  $\beta$ -распада по схеме слабых взаимодействий. Из реакторов летят антинейтрино. Их энергия близка к энергии солнца.
- 4) Нейтрино, возникающие от звёзд. Существуют такие объекты как сверхновые звёзды. Они взрываются и выделяется огромное количество энергии. Носителями этой энергии являются нейтрино. До 99% энергии взрыва сверхновой звезды уносится именно нейтрино.

Механизм взрыва и остывания звёзд полностью обеспечен существованием нейтрино. Нейтрино вылетают, уносят энергию, температура падает.

- 5) Атмосферные нейтрино – нейтрино от верхних слоёв атмосферы. Процесс возникновения: космические лучи пронизывают космос, проникают на Землю и сталкиваются с плотными слоями атмосферы (около 10-20 км от поверхности). Там происходит процесс взаимодействия частиц и в результате возникают нейтрино, которые называются атмосферными.
- 6) Космогенные нейтрино. Обладают сверхвысокой энергией:  $10^{18} EeV$ .
- 7) Гео-нейтрино. Источник: центр Земли. Считается, что в недрах Земли существует «ядерный реактор», из которого идут нейтрино, которые были обнаружены в двух экспериментах несколько лет назад.

Сравним: количество космологического нейтрино составляет около  $10^{20}$ , а количество космогенных нейтрино составляет около  $10^{-28}$ . Т.е. их количество отличается на величину  $10^{48}$ .

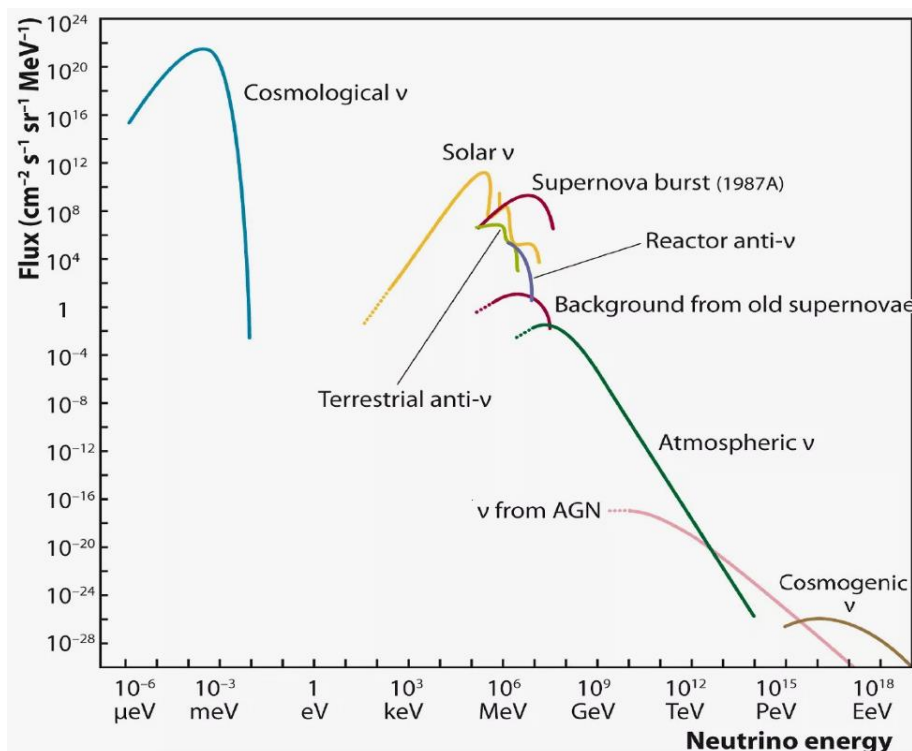


Рис. 1.1. Спектры энергий природных потоков нейтрино

### Уникальные свойства нейтрино

Нейтрино – уникальная частица. Как это ни кажется парадоксальным, нейтрино крайне слабо и редко взаимодействует с другими частицами: «обычное» (энергия составляет около одной массы электрона) нейтрино может свободно лететь в воде со скоростью света 300 лет!

Плотность воды, железа:

$$\rho_{\text{воды}} \sim 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3},$$

$$\rho_{\text{железа}} \sim 10 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Ключевой вопрос физики нейтрино – это вопрос о массе нейтрино. О массе нейтрино известно два факта:

- 1) Масса нейтрино не равняется нулю:

$$m_\nu \neq 0!$$

*Примечание:* единственная частица, масса которой равняется 0 – фотон (квант света):

$$m_\gamma = 0.$$

- 2) Масса нейтрино не больше 1 эВ:

$$m_\nu < 1 \text{ eV}$$

*Примечание:* результат получен в 2019 году в эксперименте *KATRIN Collaboration*. Эксперимент был проведен с участием представителя МГУ имени М. В. Ломоносова.



*Утверждение.* Энергия нейтрино всегда много больше массы нейтрино:

$$P_0^\nu \gg m_\nu.$$

Поэтому нейтрино могут беспрепятственно распространяться на громадные расстояния, принося с собой информацию как из недр звезд, так и из ранее недоступных и загадочных уголков нашей Вселенной.

*Задача:* какое расстояние пролетит нейтрино прежде, чем с чем-нибудь столкнется? Для этой задачи условно считаем, что нейтрино движется со скоростью света:

$$c = 300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^5 \text{ км/с}$$

Нейтрино используется как передатчик информации о том, как был устроен мир и что с ним происходит. Считается, что физика нейтрино одна из приоритетных отраслей современной фундаментальной науки открывает окно в новую «физику будущего».

### **Изучение нейтрино**

*Краткая историческая справка:* 23 сентября 2020 года В.В. Путин на заседании в Кремле, посвященном 75-летию юбилею атомной промышленности поднял вопрос о нейтрино.

Исследование нейтрино проводится в нескольких местах:

- 1) Национальный центр физики и математики (г. Саров) Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ)

Учредители:

- госкорпорация «РОСАТОМ»;
- Минобрнаука;
- МГУ;
- РАН;
- «Курчатовский институт».

В настоящее время в центре реализуется проект 8 «Физика изотопов водорода», куда включено направление «Изучение когерентного рассеяния  $\nu$  на атомах и ядрах и электромагнитных свойств  $\nu$  с использованием интенсивного тритиевого источника (анти)нейтрино»:

- проверка справедливости Стандартной модели
- измерение магнитного момента  $\nu$  с рекордной точностью (на два порядка лучше существующих измерений)

- 2) Филиал МГУ (г. Саров) (рис. 1.2)
- 3) Научно-образовательная школа МГУ (фундаментальные и прикладные исследования космоса)

Ссылка на регистрацию в международную школу по физике нейтрино:

[www.school.lomcon.ru](http://www.school.lomcon.ru)



Рис. 1.2. Филиал МГУ (г.Саров)

Физике нейтрино уделяется колоссальное внимание и со стороны МГУ имени М.В. Ломоносова. 9 октября 2020 года состоялось открытие 15-го Всероссийского фестиваля «*NAUKA 0+ Физика будущего*». На открытии выступил В.А. Садовничий, который в своем выступлении упомянул два из трех крупнейших научных проектов: проект ДЖУНО (Китай) (рис. 1.3) и проект Гипер-Камиоканде (Япония) (рис. 1.4). В 2024 году в ходе проекта ДЖУНО в Китае начнется сбор данных – регистрацию нейтрино. Проект Гипер-Камиоканде в Японии начнется ориентировочно в 2027 – 2030 годах.

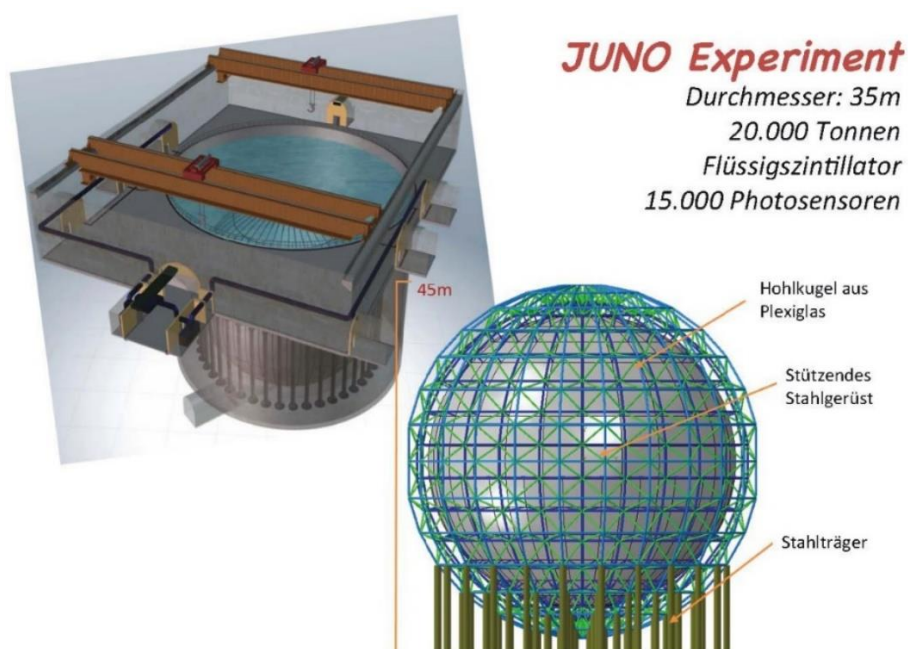


Рис. 1.3. Тело детектора проекта ДЖУНО (Китай)

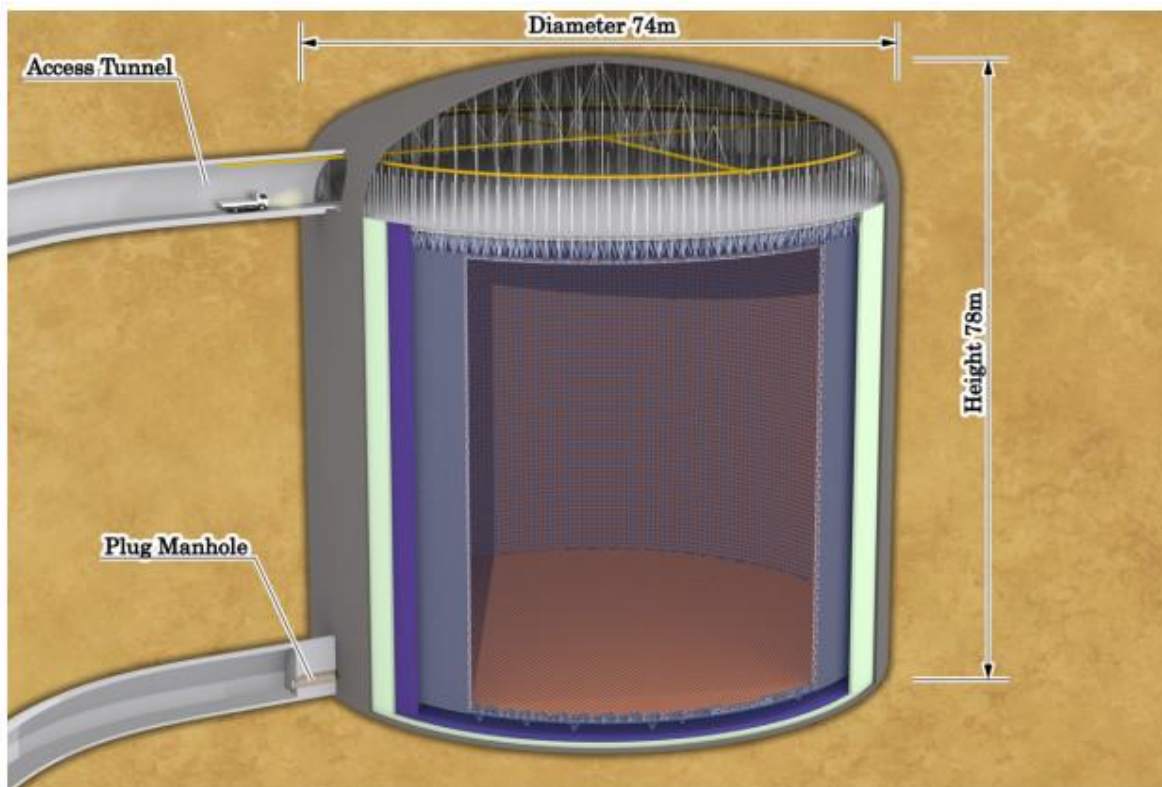


Рис. 1.4. Установка Гипер-Камиоканде (Япония)

Тело детектора проекта ДЖУНО (Китай) представляет собой акриловую сферу и расположено на глубине 700 метров под землёй. Диаметр сферы – 40 метров. Она удерживается специальными металлическими балками. Внутри шар будет залит специальным веществом, в которое будет прилетать нейтрино и ударяясь будет вызывать свет. Вес такой жидкости составит 20 000 тонн. В этом веществе возникают заряженные частицы, которые движутся в среде и излучают свет – «Черенковское излучение». На внешней поверхности расположены 53 000 преобразователей света в электрический сигнал. Они соединены проводами с суперкомпьютером.

Установка ДЖУНО расположена под землей с целью фильтрации ненужных частиц. По результатам расчетов 700 метров хватает для того чтобы отсеять мюонный фон.

Этот эксперимент начнет свою работу в конце 2024 года. В подготовку эксперимента было вложено около 0.5 млрд долларов.

*Примечание:* установка Гипер-Камиоканде в Японии имеет объем около 260 000 м<sup>3</sup>.

Ниже приведена схема нейтринного детектора Super-Kamiokande (рис.1.5), который содержит 50 тыс. тонн очищенной воды, бочка имеет параметры:  $h = 42$  м,  $d = 40$  м, расположен на глубине 1 км под землей, на стенах – 11146 фотоумножителей.



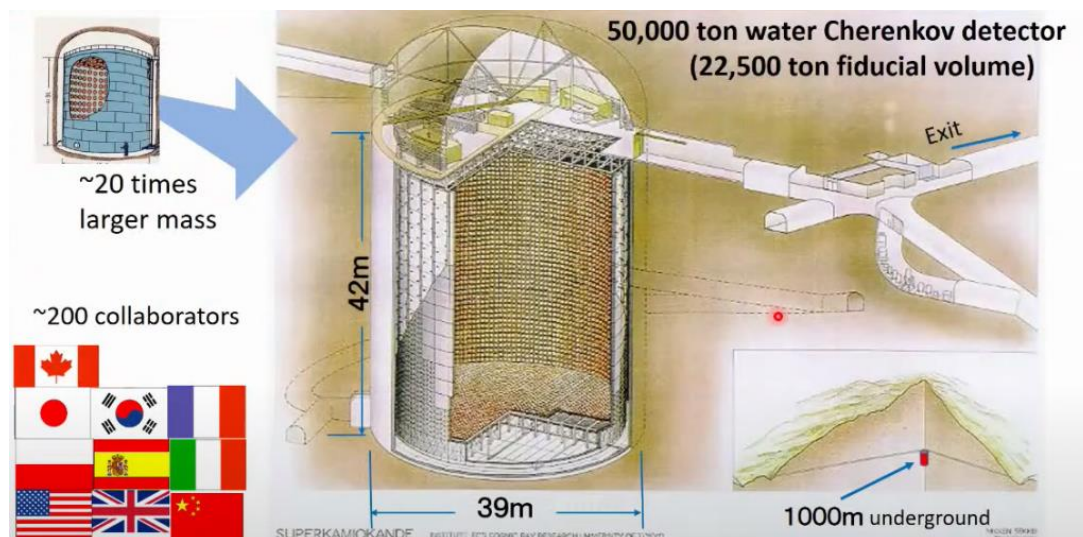


Рис. 1.5. Нейтринный детектор Super-Kamiokande

Важность исследования физики нейтрино подтверждается оценкой результатов Нобелевской премии:

- 2015 год – Нобелевская премия по физике «за открытие осцилляций нейтрино, что доказывает наличие у нейтрино ненулевой массы» – Такааки Каджита (1959 г.р.) (рис. 1.6); работает в Университете Токио (University of Tokyo, Kashiwa, Japan);
- 2015 год – Нобелевская премия по физике «за открытие осцилляций нейтрино, что доказывает наличие у нейтрино ненулевой массы» (рис. 1.8–1.9) – Артур Макдональд (1943 г.р.) (рис.1.7); работает в Королевском университете (Queen’s University, Kingston, Canada).



Рис. 1.6. Такааки Каджита



Рис. 1.7. Артур Макдональд

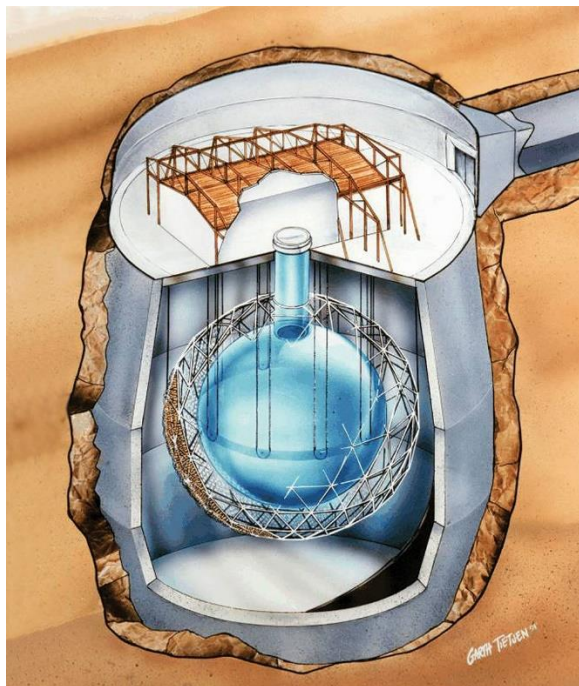


Рис. 1.7. Нейтринный детектор SNO 1000 тонн тяжелой воды, акриловый шар ( $R = 12$  м) на глубине 2 км под землей, на стенах – 10 000 фотоумножителей

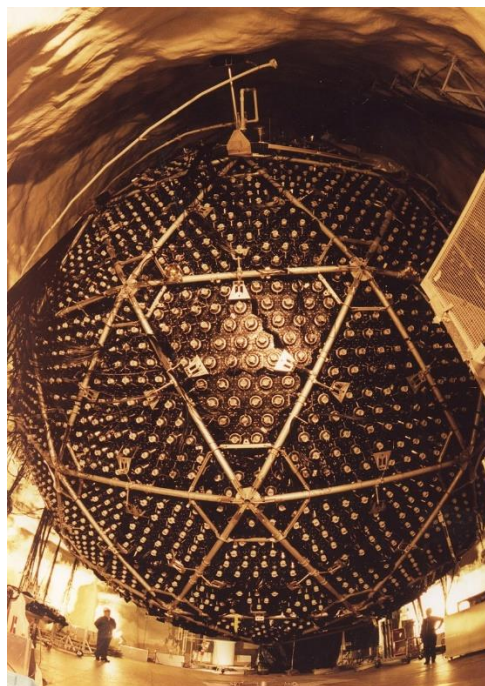


Рис. 1.8. Нейтринная обсерватория, Канада

### Эффект смешивания и эффект осцилляций нейтрино

В физике нейтрино существует два главных эффекта: эффект смешивания и эффект осцилляций нейтрино.

Типы нейтрино:

- 1) Электронное нейтрино – нейтрино, связанные с электроном:  
электрон  $e \rightarrow \nu_e$  (электронное нейтрино  $\nu$ )
- 2) Мюонное нейтрино:  
мюон  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu$  (мюонное нейтрино  $\nu$ )
- 3)  $\tau$  – нейтрино  
тау – лептон  $\tau^- \rightarrow \nu_\tau$  ( $\tau$  – нейтрино  $\nu$ )

Эти нейтрино могут взаимодействовать между собой.

### Другой взгляд на нейтрино

Все эти частицы являются суперпозициями более фундаментальных нейтрино. Рассмотрим нейтрино с другой стороны – как нейтрино типа 1  $\nu_1$ , типа 2  $\nu_2$  и типа 3  $\nu_3$  со своей массой:

$$\begin{aligned}\nu_1 &\rightarrow m_1 \\ \nu_2 &\rightarrow m_2 \\ \nu_3 &\rightarrow m_3\end{aligned}$$

Оказывается, что:

$$\nu_e = a_1 \nu_1 + b_1 \nu_2 + c_1 \nu_3$$

$$\nu_\mu = a_2 \nu_1 + b_2 \nu_2 + c_2 \nu_3$$

$$\nu_\tau = a_3 \nu_1 + b_3 \nu_2 + c_3 \nu_3$$

Из вышеприведённых уравнений нельзя строго определить массу мюонного нейтрино и  $\nu_\mu$   $\tau$  –нейтрино  $\nu_\tau$ .

При одинаковой энергии нейтрино будут двигаться с разной энергией и разной скоростью. Из этого следует существование *эффекта осцилляций нейтрино*.

#### Историческая справка

Эффект смешивания и эффект осцилляций нейтрино был предсказан Бруно Максимовичем Понтекорво, который с 1950 жил в Дубне и работал в Объединенном институте ядерных исследований, а с 1966 по 1986 год возглавлял кафедру физики элементарных частиц физического факультета МГУ и был членом Ученого совета физического факультета МГУ.

#### Рекомендация от преподавателя:

- А.И. Студеникин «Сага о нейтрино», журнал «Знание – сила», №8 (август) 2013 г., с.24 -32.

## Лекция 2. Этапы становления представлений об устройстве мира, связанные с нейтрино

Основные вехи в развитии современных представлений об устройстве мира, связанные с нейтрино:

1. Предыстория современной физики – электромагнитные волны и уравнения Максвелла (1865 год). Окончательно сформулированы основы электродинамики.

2. Открытие первых элементарных частиц – электрон (Дж.Дж. Томсон, 1897 год), фотон (М. Планк, 1900-1918, А. Эйнштейн, 1905-1921, Г. Льюис, 1926 год) и становление квантовой механики (первая четверть XX века). В отличие от электрона – фотон является безмассовой частицей:

$$m_e = 0.5 \cdot 10^6 eV$$
$$m_\gamma^a = 0 \text{ (в вакууме)}$$

Планк утверждал, что у фотона  $\gamma$  существует энергия, которая равняется некоторой постоянной умноженной на характерную частоту фотона:

$$E_\gamma = h\omega_\gamma.$$

Это заложило основу в теорию волнового-корпускулярного дуализма: в некоторых случаях волны ведут себя как волны, а в некоторых их нужно рассматривать как совокупность частиц – фотонов.

Идеи Планка были подкреплены открытием Эйнштейна, который построил теорию фотоэффекта – возникновение электронов и позитронов при взаимодействии объекта с фотонами.

М. Планк получил Нобелевскую премию в 1918 году, а А. Эйнштейн в 1921.

Эти этапы заложили основы квантового описания электромагнитных взаимодействий.

3. Проблема радиоактивного распада ядер и предсказание В. Паули существования нейтрино (1930 – 1945).

В. Паули не смог участвовать в конференции по атомной ядерной физике и написал письмо участникам, в котором он сформулирован возможное существование еще одной элементарной частицы. В 1945 году Паули получил Нобелевскую премию за его фундаментальный вклад в основание квантовой теории взаимодействия частиц. Он сформулировал, что невозможно, чтобы две элементарные частицы находились в одном квантовом состоянии – *принцип запрета Паули*.

*Примечание: взаимосвязь классических и квантовых законов на примере движения.*

*Рассмотрим движение материального тела (элементарной частицы) с массой  $m$ . В рамках классической физики мы можем решить задачу о перемещении данного объекта в пространстве и времени. Классические законы механики – это три закона Ньютона:*

$$F = ma,$$

*где  $F$  – сила,  $m$  – масса,  $a$  – ускорение.*

Решая данное уравнение мы можем найти зависимости координаты и скорости от времени:

$$X = X(t)$$

$$V = V(T)$$

Рассмотрим принципиальную разницу в подходах к описанию движения с использованием квантовой теории.

Рассмотрим электрон массой  $m$ . Если мы хотим описать движение электрона с точки зрения квантовой физики, мы будем использовать совершенно другое уравнение – уравнение Дирака:

$$(\hat{p} - m_e)\Psi(x)$$

Формулировка задачи о том, что происходит с объектом – изменяется: в классической физике можно определить траекторию движения материального объекта (существуют понятия координаты и скорости), в квантовом подходе информация о том, что происходит с объектом содержится в волновой функции  $\Psi_e(x)$ , которая зависит от координаты и времени. В процессе развития квантового представления дуализм был перенесен и на описание корпускул (элементарных частиц).

Смысл волновой функции:

$$|\Psi(x)|^2 \rightarrow$$

вероятность нахождения электрона в заданном квантовом состоянии

Квадрат модуля дает вероятность того, что элементарная частица находится в состоянии, которое характеризуется набором квантовых чисел, т.е. происходит переход от непрерывного описания характеристиками (координата, скорость) к описанию частицы и заданию состояния ее движения в зависимости от квантованных дискретных значений тех или иных характеристик частицы.

#### 4. Открытие нейтрона (Дж. Чедвик, 1932 – 1935)

Дж. Чедвик получил Нобелевскую премию в 1935 году.

#### 5. Теория Э. Ферми слабых взаимодействий (бета-распад нейтрона) и роль нейтрино (1933 – 1938).

Э. Ферми использовал гипотезу Паули о существовании нейтральной частицы и построил новую теорию связи между элементарными частицами – *слабые взаимодействия*.  $\beta$ -распад:

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

Реакция  $\beta$ -распада: один из нейтронов материнского ядра превращается в протон, вылетает электрон и антинейтрино.

Он получил Нобелевскую премию за создание новых радиоактивных элементов при облучении нейтронами.

#### 6. Охлаждение нейтронных звезд – «урка-процессы» Гамова-Шёнберга и роль нейтрино (1940 год).

Гамов и Шёнберг рассмотрели критическую роль, которую играет нейтрино в эволюции звёзд.



Нейтронные звезды имеют колоссальную плотность  $\rho_{NS} \sim 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>, радиус около 10 км, массу  $m_n \sim 1m_s$ , где  $m_s$  — масса Солнца. Они эволюционируют и остывают за счет потока нейтрино. Охлаждение происходит в результате резкого выделения энергии и так как вещество очень плотное, никакой свет / фотон не может пробиться. Этот процесс получил название: «урка-процесс».

История появления термина: Гамов путешествовал по Латинской Америке. Однажды в Буэнос-Айресе он зашел в казино, основанное эмигрантами из России и которое называлось Casino de Urca. Гамов наблюдал, как в казино у людей улетучиваются деньги и он сравнил это с процессом излучения нейтрино, которые приводят к такому же эффективному выносу энергии из недр звездного объекта подобно тому, как люди теряют деньги.

Латинский термин: Urca-processes.

7. Потоки нейтрино от земных и астрофизических источников

8. Реликтовые нейтрино в модели горячей Вселенной (Дж. Гамов, 1940 год).

Дж. Гамов рассматривая модель горячей Вселенной предсказал, что на определенной ранней стадии, когда начинается расширение, плотность вещества падает и нейтрино может высвечиваться. После этого оно идет с учетом уникальной проникающей способности не взаимодействуя ни с какими другими частицами и доходит до нашего времени.

9. Предсказание Б.М. Понтекорво о принципиальной возможности экспериментального наблюдения «неуловимых» нейтрино от Солнца и ядерных реакторов (1946 год).

В середине 1940-х годов Б.М. Понтекорво настоятельно рекомендовал поставить задачу экспериментального наблюдения нейтрино и сказал, откуда нейтрино приходит на Землю и какие потоки нейтрино наиболее перспективны с точки зрения открытия.

10. Экспериментальное открытие существования нейтрино (Ф. Райнес и К. Коуэн, 1956 год).

11. Экспериментальное открытие несохранения пространственной четности в слабых взаимодействиях (опыты Ву, 1957 год) и роль нейтрино (теория Л.Д. Ландау и Ли-Янга-Салама, 1957 год).

12. Предсказание смешивания и осцилляций нейтрино как эффект ненулевой массы частицы (Б.М. Понтекорво, 1957 год)

В 1957 году Бруно Понтекорво предсказал, что нейтрино не является обычной частицей и что существует смесь между различными типами нейтрино, которые при распространении в пространстве и времени переходят из одного типа в другой. Это явление называется осцилляцией.

13. Экспериментальное открытие нейтрино второго и третьего типа: мюонного и тау-нейтрино (Л. Лейдерман, М. Шварц и Дж. Стейнбергер) в 1962 и 2000 годы

14. Теория слабых взаимодействий Фейнмана-Гелл-Манна и Маршака-Садаршана (1958 год) и роль нейтрино.

15. Современная Стандартная модель взаимодействий частиц (Вайнберг-Салам-Глэшоу, 1965 год) и роль нейтрино.

*Стандартная модель* – современная теория, которая описывает все взаимодействия, превращения и свойства элементарных частиц, кроме гравитации.

В рамках этой теории был предсказан целый набор новых частиц.

16. Открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе (2012 год) – триумф Стандартной модели взаимодействия частиц – нейтрино как посланник «новой физики».

Нейтрино – единственная из всех элементарных частиц, которая экспериментально подтверждена и демонстрирует экспериментально подтвержденные свойства и которая не описывается стандартной моделью.

17. Стандартная солнечная модель (Дж. Бокал) и подавление потока нейтрино от Солнца, «проблема солнечных нейтрино» (Р. Дэвис, 1965 год).

Стандартная солнечная модель – модель Солнца, которая описывает все свойства Солнца. В рамках этой модели можно посчитать какое количество нейтрино выделяется в недрах Солнца и приходит на Землю.

Для решения «проблемы солнечных нейтрино», которая возникла в середине 1960-х годов, использовалась идея Понтекорво 1957-ого года о том, что нейтрино – смесь и что нейтрино, которое выходит от Солнца приходит на Землю в другой фазе.

18. Подавление потока нейтрино от верхних слоев атмосферы, «проблема атмосферных нейтрино».

По стандартной теории взаимодействия элементарных частиц можно рассчитать какое количество нейтрино и каких типов должно прийти на Землю от верхних слоев атмосферы. Проблема: в ходе экспериментов было измерено меньшее количество нейтрино. По идеям Понтекорво была построена теория: часть нейтрино переходят в другую фазу до пересечения с детектором, который измеряет только мюонную составляющую. Поэтому и количество нейтрино было меньшим.

19. Осцилляции и смешивание нейтрино различных типов – предсказание физики за пределами Стандартной модели.

20. Решение проблемы солнечных и атмосферных нейтрино на основе нейтринных осцилляций.

21. Принципы детектирования нейтрино от различных источников (солнечные, атмосферные, реакторные, ускорительные и астрофизические потоки нейтрино) и важнейшие нейтринные экспериментальные установки.

22. Использование современных промышленных атомных станций для изучения фундаментальных свойств нейтрино.

23. Нейтрино и безопасность атомной энергетики и будущие нейтринные технологии.

## Лекция 3. Структура материи

### 3.1. Лауреаты Нобелевской премии по физике

Нобелевские премии связаны с именем Альфреда Нобеля.

Альфред Нобель (рис. 3.1) – знаменитый изобретатель динамита и создатель целой империи по производству взрывчатых веществ. Большую часть Своего состояния он завещал для ежегодного присуждения пяти премий «за научные достижения, приносящие наибольшую пользу человечеству»

Нобелевская премия состоит из золотой медали (рис. 3.2), диплома и чека на установленную сумму, размер которой зависит прибылей Нобелевского фонда.

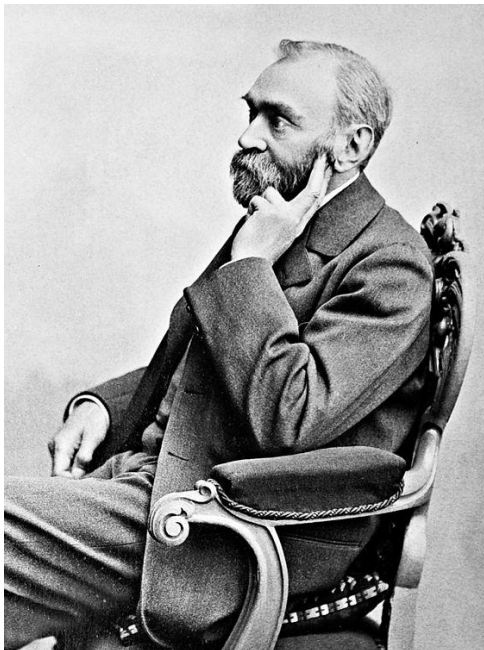


Рис. 3.1. Альфред Нобель

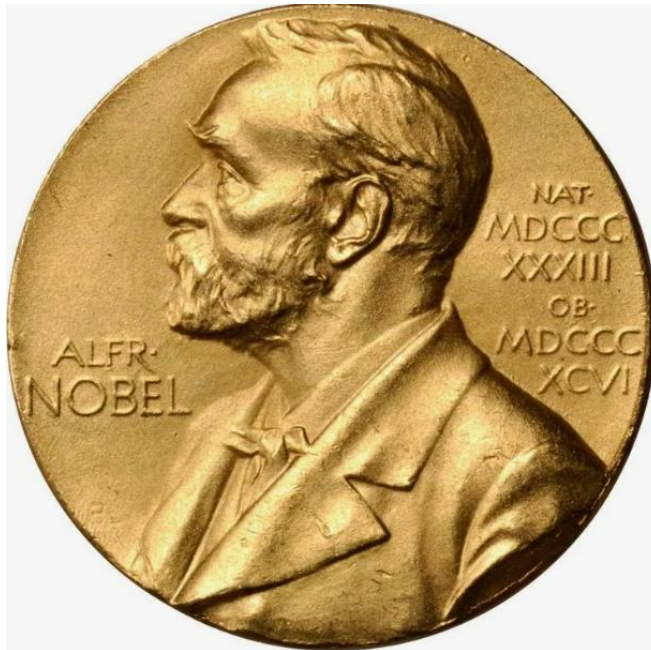


Рис. 3.2. Золотая медаль Нобелевской премии

Завещание Альфреда Нобеля:

< ... обдумав и решив, настоящим объявляю мое завещание по поводу имущества, нажитого мною к моменту смерти. Все остающееся после меня реализуемое имущество необходимо распределить следующим образом: капитал мои душеприказчики должны перевести в ценные бумаги, создав фонд, проценты с которого будут выдаваться в виде премии тем, кто в течение предшествующего года принес наибольшую пользу человечеству ...»

Париж, 27 ноября 1895 г, Альфред Бернхард Нобель  
(перевод Студеникин А.И.)

Пять премий за:

- 1) открытие или изобретение в области физики,
- 2) крупное открытие или усовершенствование в области химии,
- 3) выдающиеся успехи в области физиологии или медицины,
- 4) создание наиболее значительного литературного произведения,

5) весомый вклад в сплочение народов, уничтожение рабства, снижение численности существующих армий и содействие мирной договоренности.

### Эксперименты Артура Макдональда и Такааки Каджита

Эксперимент Артура Макдональда заключался в регистрировании нейтрино от Солнца.

Эксперимент Такааки Каджита заключался в фиксировании нейтрино от верхних слоев атмосферы.

Эксперименты Артура Макдональда и Такааки Каджита фиксировали не то количество нейтрино, которое ожидается, если верна стандартная модель взаимодействия элементарных частиц.

### Лауреаты Нобелевской премии

А. Макдональд и Т. Каджита получили четвертую Нобелевскую премию за всё время изучения физики нейтрино. До них были вручены следующие Нобелевские премии:

- 1988 – «за открытие мюонного нейтрино» (Л. Ледерман, Дж. Стейнбергер, М. Шварц, 1962);

Разница электронного нейтрино  $\nu_e$  и мюонного нейтрино  $\nu_\mu$  обусловлена разницей масс:

$$m_e = 0.5 \text{ МэВ}$$

$$m_\mu \sim 200 \cdot m_e$$

Из этого следует:

$e \rightarrow$  стабильная частица

$\mu \rightarrow$  нестабильная частица

Мюон за долю секунды ( $10^{-9}$ с) распадается:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

где  $\bar{\nu}_e$  – электронное антинейтрино,  $\nu_\mu$  – мюонное нейтрино.

- 1995 – «за доказательство существования нейтрино» (Ф. Райнес, К. Коуэн, 1956);

Теоретически нейтрино было предсказано в 1930-ом году, а эксперимент был проведен в 1956-м году.

- 2002 – «за выдающийся вклад в астрофизику и детектирование космических нейтрино» (Р. Дэвис и М. Кошиба, 60- и 90-е годы XX века).

Петр Леонидович Капица: «Несмотря на большие изменения в жизни науки, одна вещь осталась неизменной – это Нобелевская премия : другой такой премии, пользующейся подобным международным авторитетом, не существует». В 1978 году Петр Леонидович Капица получил Нобелевскую премию «за фундаментальные изобретения и открытия в области физики низких температур» (совместно с Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном).

### 3.2. Структура материи

Всё что нас окружает, весь материальный мир состоит из элементарных частиц.

На рисунке 3.3 показана структура материи: имеем вещество, которое состоит из атомов (ядро, которое состоит из протонов и нейтронов, вокруг которого движутся по круговым орбитам электроны). Эта структура описывается квантовыми законами. В квантовой физике никаких траекторий у частиц быть не может.

Обычный человек воспринимает мир с точки зрения классических закономерностей. Но на самом деле, с точки зрения современной фундаментальной физики – мир состоит из квантовых объектов. Т.е. всё сводится к квантовым закономерностям, где совершенно другие законы и другие представления о причинах изменения и о том, как описывать состояние движения.

Так, например, в классической физике имеем предмет, который передвигается по определенной траектории, т.е. мы в каждый момент времени можем определить точку, в которой находился объект. Сказать подобное про электрон или любую другую элементарную частицу мы не имеем права. Движение электрона – это квантовая механика, где нет траекторий и всё описывается вероятностью обнаружить данный квантовый объект в том или ином квантовом состоянии, которое в свою очередь определяется набором характеристик – квантовых чисел.

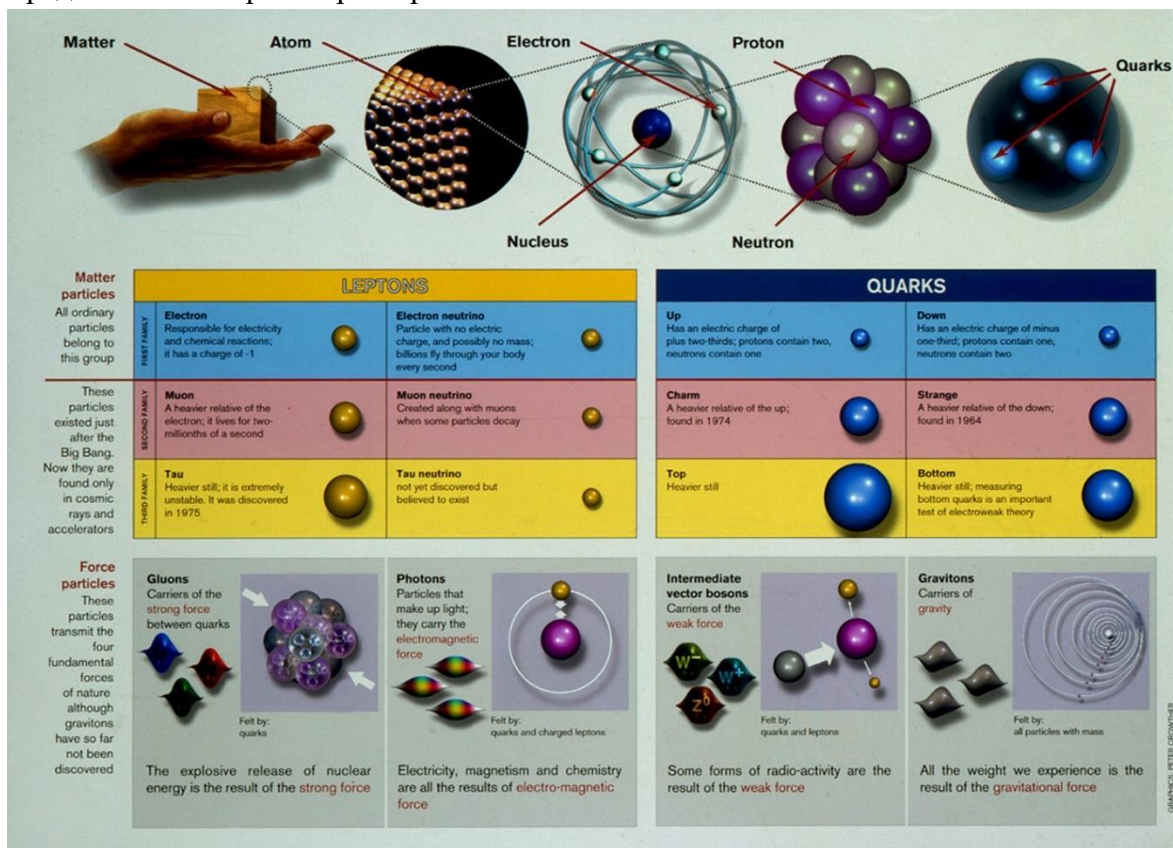


Рис. 3.3. Структура материи

**Волновая функция** – величина, которая зависит от квантовых чисел и которая определяет вероятность того, что данная частица находится в том или ином квантовом состоянии.

Рассмотрим ядро атома: оно состоит из нейтронов и протонов, которые являются элементарными частицами. Протоны и нейтроны, в свою очередь, состоят из более фундаментальных частиц, которые называются *кварками*.

Виды частиц:

- электроны;
- мюоны;
- тау-лептон.

*Примечание:* синхротронное излучение – явление перехода одного электрона в другой с испусканием кванта света в магнитном поле.

Тау-лептон имеет отрицательный знак и может распасться по двум каналам распада:

- на мюон, мюонное нейтрино и тау-нейтрино:

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

- на электрон, электронное антинейтрино и тау-нейтрино:

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

Частицы между собой взаимодействуют и сталкиваются, превращаются одна в другую. Причина: взаимодействие. Все распады происходят по схеме слабых взаимодействий.

Пример – распад нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

В грубом представлении нейтрон можно рассматривать как элементарную частицу.

### 3.3. Типы взаимодействия

В природе существуют 4 типа взаимодействия:

- 1) Слабые взаимодействия
- 2) Электромагнитные
- 3) Гравитационные
- 4) Сильные взаимодействия (удерживают кварки)

Время жизни нейтрона примерно 8 минут. В квантовой физике все понятия размыты (вероятностны). Возьмем 1 миллион нейтронов и понаблюдаем за ним. Какая-то часть нейтронов распадется мгновенно, какая-то – через минуту, а основная – ~ на 8-10 минуте. Некоторые нейтроны могут прожить и два дня.

Вся логика развития физики элементарных частиц показывала, что должна существовать единая теоретическая модель, объединяющая возможно большее число различных типов взаимодействий.

Как известно, существуют электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное взаимодействия элементарных частиц (рис. 3.4).

#### Электромагнитное взаимодействие

В правом углу показана диаграмма Фейнмана: стрелками показан электрон в некотором начальном состоянии – до того, как он почувствовал присутствие второго электрона. Взаимодействие двух электронов – это закон Кулона. Переносчиком



электромагнитных сил выступает фотон (квант света). Т.е. наступает момент, когда между одним электроном в начальном состоянии и вторым электроном в начальном состоянии осуществляется связь благодаря излучению одним из электронов фотона.

Квантовая теория электромагнитного взаимодействия – это испускание и поглощение фотонов.

Фейнман – нобелевский лауреат, который придумал иллюстративную запись сложных формул. Каждый элемент графика – это некоторая математическая формула / структура.

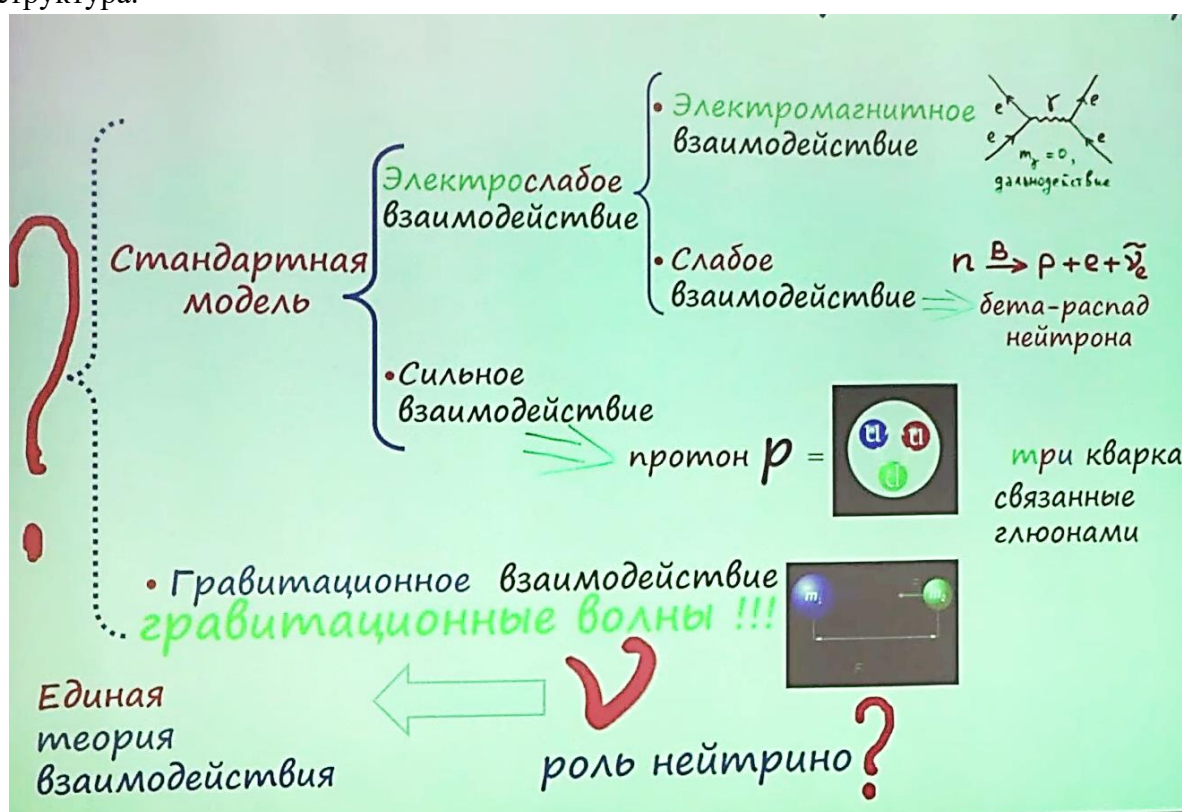


Рис. 3.4. Взаимодействия элементарных частиц

### Слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие обуславливает нестабильность мюона и тау-лептона и в частности распад нейтрона:

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

Силы называются слабыми, так как они действуют на короткие расстояния и менее заметные.

Существует цель создания единой теории для объяснения происходящего в мире. По этой причине ученые объединяют электромагнитное взаимодействие и слабое взаимодействие в *электрослабое взаимодействие*.

### Сильные взаимодействия

К этому можно подключить и сильные взаимодействия – силы, которые объясняют структуру протона. Протоны и нейтроны – это связанные состояния кварков. Переносчиками этой связи являются глюоны.

Электрослабое взаимодействие и сильное взаимодействие объединены в *Стандартную модель* взаимодействия элементарных частиц.

### Гравитационное взаимодействие

В настоящее время перед учеными стоит вопрос: как объединить стандартную модель и гравитационное взаимодействие.

*Главная цель:* создание единой теории взаимодействия.

### Нейтрино

Нейтрино – единственная из известных элементарных частиц, свойства которой подтвержденные достоверно экспериментально, не укладываются в рамках стандартной модели. Эффекты за пределами стандартной модели: ненулевая масса и эффекты смешения и осцилляции.

Возникновение нейтрино связано с тем, что ученые пытались объяснить  $\beta$ -распад электромагнитными силами.

### Элементарные частицы стандартной модели

Фундаментальные частицы (рис. 3.5): заряженные лептоны (электрон, мюон, тау). Трактовка стандартной модели: каждому из заряженных лептонов соответствует свой тип нейтрино (электронный, мюонный, тау).

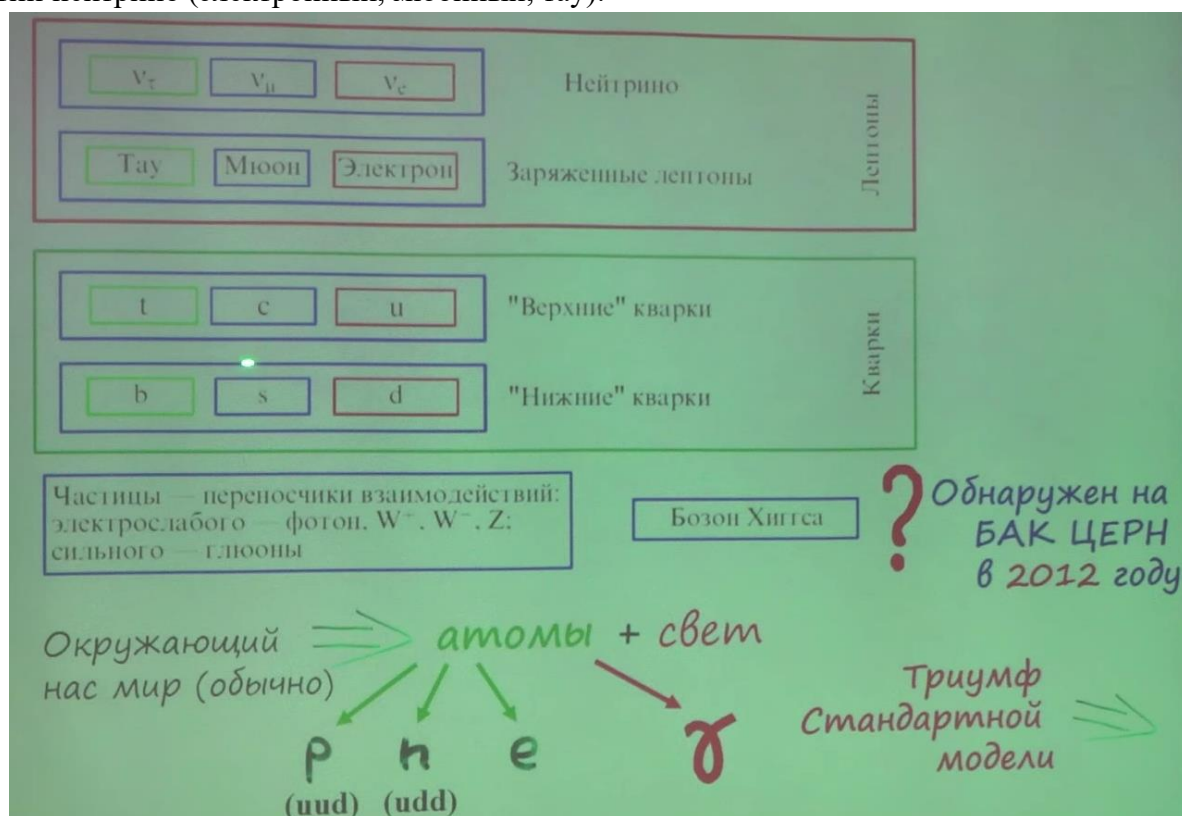


Рис. 3.5. Элементарные частицы стандартной модели



*Лептоны* – это элементарные частицы со своими свойствами (заряды, спины и т.д.). У нейтронов спин равняется  $\frac{1}{2}$ , у бозонов – целый спин.

*Кварки* – элементарные частицы, из которых состоят в частности нейтроны и протоны. Каждой частице соответствуют античастицы.

*Частицы* – переносчики взаимодействий: электрослабого – фотон  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ ; сильного – глюоны.

*Бозон Хиггса* – особая частица, которая была предсказана на самых ранних этапах формирования теории, которая лежит в основе стандартной модели. Работы были опубликованы примерно в 1964-65х гг. Бозон Хиггса – уникален и играет важную роль во всей структуре Стандартной модели.

### 3.4. Историческая справка

К началу 60-х годов были предложены несколько различных теоретических моделей, которые объединяли электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия. Но все указанные модели обладали фатальным недостатком.

Как только рассматривались взаимодействия массивных частиц, модели теряли предсказательную силу и смысл, в их рамках обнаруживались непреодолимые трудности, возникновение при проведении конкретных расчетов наблюдаемых в экспериментах характеристик элементарных частиц бессмысленных выражений, содержащих бесконечные большие величины так называемые «расходимости», а соответствующие модели называются «ненормируемыми».

Тогда существовала проблема непротиворечивой перенормируемой модели взаимодействия массивных частиц.

Важно, в случае безмассовых частиц проблема перенормируемости (т.е., непротиворечивости) благополучно решается.

Основной принцип: заложить минимальное количество допущений, взять минимальное количество объектов и построить теорию, которая по известным правилам давала бы предсказания. Следует разделить (упорядочить) процедуры введения взаимодействия частиц и возникновения у частиц масс: при построении теоретической модели частиц изначально вводится взаимодействие безмассовых частиц, а затем модель дополняется механизмом генерации масс.

Конкретная реализация данного механизма и является открытием новых (2013) нобелевских лауреатов Хиггса и Энглера (и соавтора последнего Брата).

Бозон Хиггса был обнаружен на Большом адронном коллайдере В ЦЕРН в 2012 году.

Нобелевская премия по физике 2013 года присуждена бельгийцу Франсуа Энглеру и британскому ученому Питеру Хиггсу (рис.3.6) за теоретическое обоснование существования бозона Хиггса – частицы, благодаря которой остальные элементарные частицы обретают массу.

Питер Хиггс родился в 1929 году в Великобритании, член Лондонского королевского общества, сейчас является почетным профессором Эдинбургского университета.

Франсуа Энглер родился в 1932 году в Бельгии, многие годы работал в Брюссельском свободном университете, где и сейчас является почетным профессором.



Рис. 3.6. Франсуа Энглер и Питер Хиггс

Суть предложенного механизма: механизм реализуется за счёт введения в теоретической модели взаимодействия с полем Хиггса («пятая сила») и эффекта спонтанного нарушения симметрии, в результате чего образуются безмассовые частицы, которые носят название «голдстоуновские бозоны».

Эффект спонтанного нарушения симметрии: имеем две формы, которые обладали некоторой симметрией (были симметричны относительно некоторых преобразований). После включения силы происходило спонтанное изменение самой структуры.

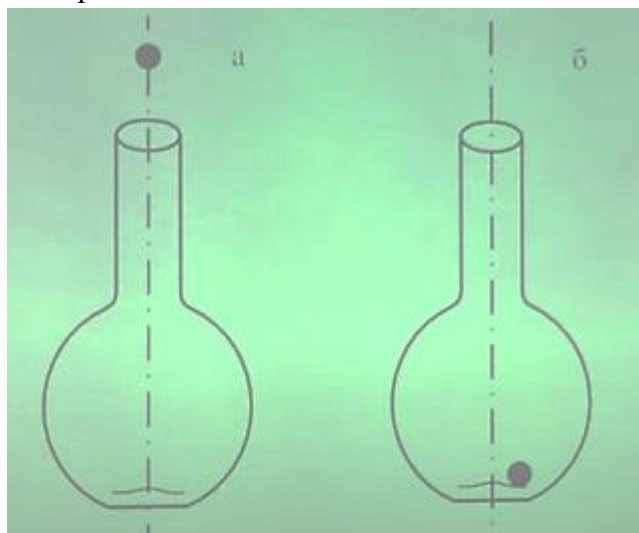


Рис. 3.7. Эффект спонтанного нарушения симметрии

В результате действия этой силы безмассовые частицы приобретали нужную массу. Кроме того, оставалась еще одна степень свободы, которая была интерпретирована Хиггсом как новый бозон. Т.е. введение поля приводило к тому, что реализовывался механизм предания массы частицы и в теории возникал бозон.

*Примечание:* П. Хиггс и Ф. Энглер получили Нобелевскую премию за создание основ Стандартной модели и механизма генерации массы частиц.

Важность открытия :

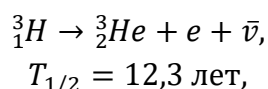
- открытие новой частицы,
- правильность идеи построения Стандартной модели взаимодействия,
- правильность механизма, по которому частицы (лептоны, кварки и векторные бозоны) получают свою массу путем взаимодействия с полем Хиггса,
- поле Хиггса – переносчик «пятой силы» (дополнительное взаимодействие).

Отметим, что голландские ученые Герард 't Хоофт (Gerardus't Hooft) Мартин Вельтман еще до открытия бозона получили Нобелевскую премию по физике за доказательство перенормируемости теории взаимодействия частиц в 1999 году.

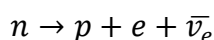
## Лекция 4. История нейтрино: познание фундаментальных законов природы

### 4.1. Открытие нейтрино

В 1930-м году В. Паули предсказал существование нейтрино. Это было стимулировано мнением, которое было распространено среди многих ученых, в том числе и среди основателей квантовой теории (квантовой механики). Проблема заключалась в том, что до 1930-го года – до предсказания антинейтрино внутри реакции распада трития:



где ядро трития распадается в ядро гелия и возникает электрон и антинейтрино. Фактически  ${}^3_1\text{H}$  имеет два нейтрона и протон. Один из нейтронов распадается:



и так как масса нейтрона и протона больше массы нейтрино, то вся энергия:

$$Q = M(A, Z) - M(A, Z + 1) = 18.6 \text{ keV}$$

уносится более легкими частицами.

Распределение количества электронов с определенным значением энергии при наблюдении за распадом большого количества трития будет монохроматическим – все электроны должны иметь строго фиксированную энергию. На графике (рис. 4.1) по вертикальной оси отложено количество электронов, а по горизонтальной оси – энергия. В эксперименте наблюдалось, что электроны имеют широкий диапазон энергии. Это противоречит фундаментальному закону сохранения энергии.

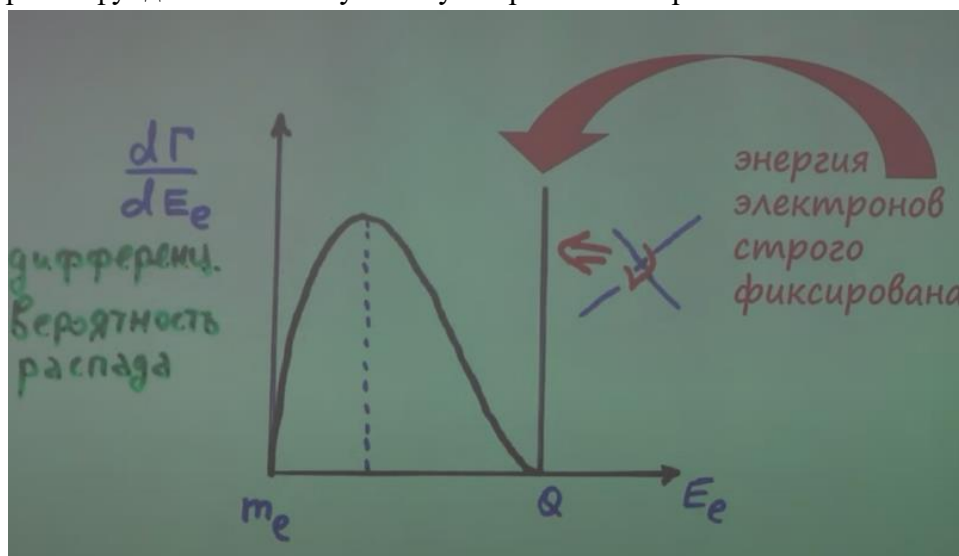


Рис. 4.1. Спектр энергий электронов распада

Указанная проблема повергла в смятение лучшие умы, так что даже один из основоположников квантовой теории и уже ставший к тому времени лауреатом Нобелевской премии Нильс Бор писал, что «на современном этапе развития теории

атома нет оснований придерживаться концепции сохранения энергии при ядерных распадах».

В декабре 1930 года В. Паули написал письмо участникам Международной конференции по ядерной физике:

«Я рассмотрел возможность сохранить справедливость закона сохранения энергии. А именно, предлагаю существование нейтральной частицы и называю её «нейтроном»... Эта частица рождается при бета-распаде вместе с электроном таким образом, что сумма их энергий остаётся постоянной. Допускаю, что моё предложение может выглядеть сомнительным. Но выигрывает только тот, кто рискует!».

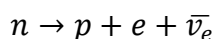
История нейтрино – это познание фундаментальных законов. Тем самым, осознание того факта, что в природе существует нейтрино фактически спасло справедливость закона сохранения энергии. Это было первым ярким примером того, как нейтрино внесло существенный вклад в понимание того, как устроен наш мир. Если бы нейтрино не существовало, ученым и всему миру пришлось бы смириться с тем, что энергия не сохраняется и мир устроен по-другому.

### Теория слабых взаимодействий

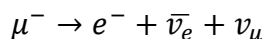
В скором времени после того, как было предсказано существование нейтрино, Э. Ферми предложил новую теорию, которая описывала  $\beta$ -распад. До 1930-го года описание  $\beta$ -распада строилось на теории электромагнитных взаимодействий.

Появление нейтрино и необходимость правильно описать закономерность  $\beta$ -распада ядер и нейтронов привело к тому, что Ферми создал новую теорию, получившую название *теория слабых взаимодействий*. Теория описывает не только распад ядер и нейтронов, но и распад мюонов. Существует множество процессов, в которых изменяется состав частиц:

- распад нейтрона:



- распад мюона:



В настоящее время известен и 4-й тип взаимодействий – сильные взаимодействия, которые описывают как удерживаются кварки.

### 4.2. Несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях

За счет уникальных свойств нейтрино реализуется еще один фундаментальный принцип того, как организована наша природа – это *несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях*.

В 1957 году Ву и его коллеги провели эксперимент Ву: рассматривался распад кобальта (рис. 4.2) – один из нейтронов ядра кобальта превращается в протон и получается ядро никеля. В этой схеме прикладывалось слабое магнитное поле, которое ориентировало момент ядра. В процессе наблюдались результаты распада – улавливались электроны, которые возникают при распаде ядра кобальта с излучением электрона, нейтрино и образованием никеля. Ученые наблюдали в какую сторону и с какой скоростью (с каким моментом) движутся электроны.

*Собственный момент* – это одна из важных характеристик элементарной частицы.

Если ядро было поляризовано в одном направлении (например вверх), то количество электронов, которые движутся вдоль направления поляризации будет значительно меньше, чем количество электронов, которые движутся в противоположную сторону.

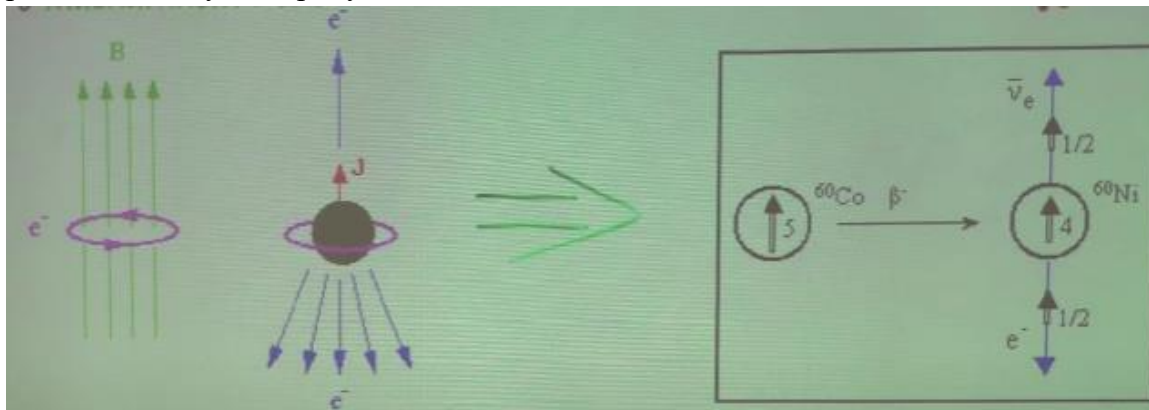


Рис. 4.2. Бета-распад ядер радиоактивного кобальта в магнитном поле

Если мы имеем поляризованный кобальт, то с использованием лагранжиана, предложенного Ферми, можно провести расчеты. Гипотетически представим, что мы наблюдаем аналогичную картину в зеркале.

«Зеркало» с точки зрения физики – это некоторое преобразование. Когда человек смотрит в зеркало, сложно отличить лево и право, если нет точной видимости в границах этого зеркала. Преобразование, которое осуществляет зеркало – это изменение направления осей координат пространства. Математическое описание преобразования:

$$X = -X$$

В математике два таких объекта – это векторы, которые при отражении в зеркале меняют направление, и аксиальные векторы, которые ведут себя противоположным образом, т.е. они не меняют своего направления. Скорости движения электронов / импульсы движения электронов относятся к категории векторов, а то, что характеризует поляризацию распадающегося ядра, описывается аксиальным вектором. Это значит, что направление поляризации не изменяется при отражении в зеркале.

Взглянув на процесс через зеркало – такого процесса нет в природе (поляризация не изменила своего направления и теперь большее количество электронов летит по направлению поляризации распадающегося ядра кобальта), что показывает несохранение четности. Если бы пространственная четность сохранялась (симметрия относительно зеркального отражения), то одинаковое количество электронов по и против магнитного поля.

Таким образом, присутствие нейтрино позволило ученым открыть еще одну фундаментальную закономерность: в природе не сохраняется пространственная

четность за счет слабых взаимодействий и за счет свойств элементарных частиц и нейтрино.

Аналогичная ситуация наблюдается при распаде мюона, реакция распада которого протекает при слабых взаимодействиях. Если рассматривать распад мюона и каждой частице написать свой собственный спин и в ходе процесса измерять направление поляризации (направление спинов), то в зеркале спины не изменят направления движения, а направления скорости и частиц изменится.

#### 4.3. Изучение нейтрино

В 1930 году Вольфганг Паули отправил письмо астрофизику Вальтеру Бааде:

*"Today I did something a physicist should never do. I predicted something which will never be observed experimentally..."*

*«Сегодня я совершил то, то физик не должен делать никогда. Я предсказал нечто, что никогда не будет наблюдаться экспериментально»*

*(Перевод: Студеникин А.И.)*

Это мнение существовало многие годы.

#### Бруно Понтекорво

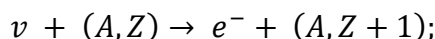
Определяющий вклад в физику нейтрино внес Бруно Понтекорво (1913 – 1993) (рис. 4.3), который на протяжении многих лет жил и работал в СССР. В течение 20 лет 1966 по 1986 он был сотрудником МГУ и возглавлял кафедру физики элементарных частиц.



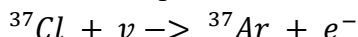
Рис. 4.3. Бруно Понтекорво

В 1946 г. Б.М. Понтекорво внес фундаментальный вклад в физику нейтрино:

- показал, что вопрос об обнаружении нейтрино в эксперименте следует ставить в практической плоскости
- предложил для детектирования нейтрино использовать процесс обратного бета-распада:



- предложил в качестве источников нейтрино Солнце и реактор;
- среди возможных мишеней предложил  $^{37}\text{Cl}$ :



(радиохимический хлор-аргоновый метод детектирования нейтрино)

В середине 1970х годов Дэвис реализовал идею радиохимического хлор-аргонового метода детектирования нейтрино и померил поток нейтрино от Солнца.

Эксперимент: была поставлена бочка (600 тонн вещества, содержащего хлор). После многих часов / дней наблюдения в этой бочке возникло 6 атомов аргона, что подтвердило реакцию.

Нобелевские премии, выданные людям, использовавшим и реализовавшим идеи Понтекорво:

- 1995 г – регистрация (анти)нейтрино от реактора – доказательство существования нейтрино – Ф. Райнес и К. Коуэн (эксперимент 1956 г. по идеям 1 и 2)
- 2002 г. – регистрация нейтрино от Солнца - поток солнечных нейтрино на Земле в 3 раза меньше теоретических предсказаний – Р. Дэвис (эксперимент в 1970 г. по 3-м идеям Понтекорво)

Впервые на подавление потока солнечных нейтрино указано Б. Понтекорво в 1967 г.

#### 4.4. Физика нейтрино

Виды нейтрино в природе (Райнес, Коуэн, 1956 г.):

- заряженные лептоны (электрон, мюон, тау-лептон);
- нейтрино (электронное нейтрино, мюонное нейтрино, тау-нейтрино).

Каждому из заряженных лептонов соответствует свой тип нейтрино:

$$e \leftrightarrow \nu_e$$

$$\mu \leftrightarrow \nu_\mu$$

$$\tau \leftrightarrow \nu_\tau$$

Три типа нейтрино называются *флейворами*.

##### Солнечный нейтрино

Солнце – один из основных источников нейтрино.

Характеристики Солнца:

- Радиус:  $R = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$
- Масса:  $M = 2 \cdot 10^{33} \text{ г/см}^3$
- Плотность ядра:  $\frac{1}{4} R$
- $r = 20 - 158 \text{ г/см}^3$

На рисунке 4.4 показаны области генерации нейтрино. Нейтрино генерируется во внутренней части, которая составляет примерно 10% внутренней области Солнца. После этого нейтрино выходят на поверхность и разлетаются в разные стороны, в том числе попадают и на Землю.

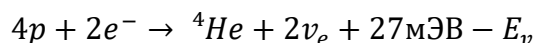


Нейтрино обладает большой энергией и малой массой, поэтому нейтрино является быстролетающей, распространяющейся (релятивистской) частицей. Скорость движения нейтрино приближается к скорости света.



Рис. 4.4. Области генерации нейтрино

Стандартная модель работы Солнца предсказывает, что четыре протона взаимодействуют с двумя электронами и возникает два нейтрино, гелий и выделяется энергия:



$E_\nu$  – энергия, которую уносят нейтрино, со средним значением  $(E_\nu) \sim 0.5$  МэВ

На рисунке 4.5 приведены расчеты механизма генерации энергии и нейтрино в Солнце. Красными кружками обозначены те реакции, в результате которых образуется нейтрино.

Это было развито выдающимся американским ученым – Джоном Бакаллом (1934 – 2005). Он является создателем большой теоретической модели, которая получила название «Стандартная солнечная модель», которая учитывает все свойства (размер, химический состав, светимость, время жизни, процессы, которые происходят на Солнце и др.). В том числе, в Стандартную солнечную модель входит Стандартная

модель взаимодействия частиц, по которой считается процесс возникновения нейтрино.

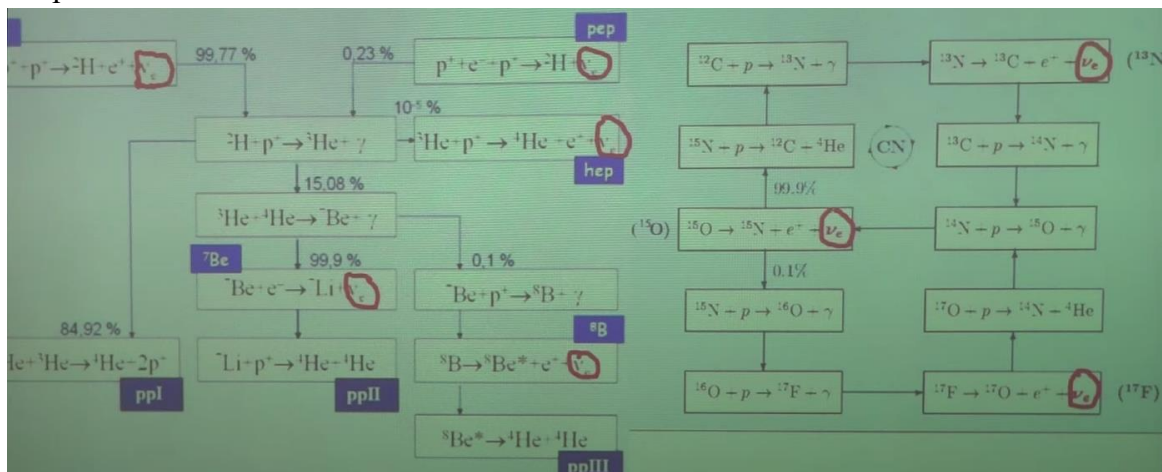


Рис. 4.5. Цепочка реакций (расчет механизма генерации энергии и нейтрино в Солнце)

На графике (рис. 4.6) предсказаны различные типы (потoki) нейтрино, которые генерируются в недрах Солнца и которые прилетают на Землю. По вертикали отложено количество нейтрино (в условных единицах), которое в единицу времени приходит на поверхность. По горизонтали показана энергия. Все масштабы – логарифмические.

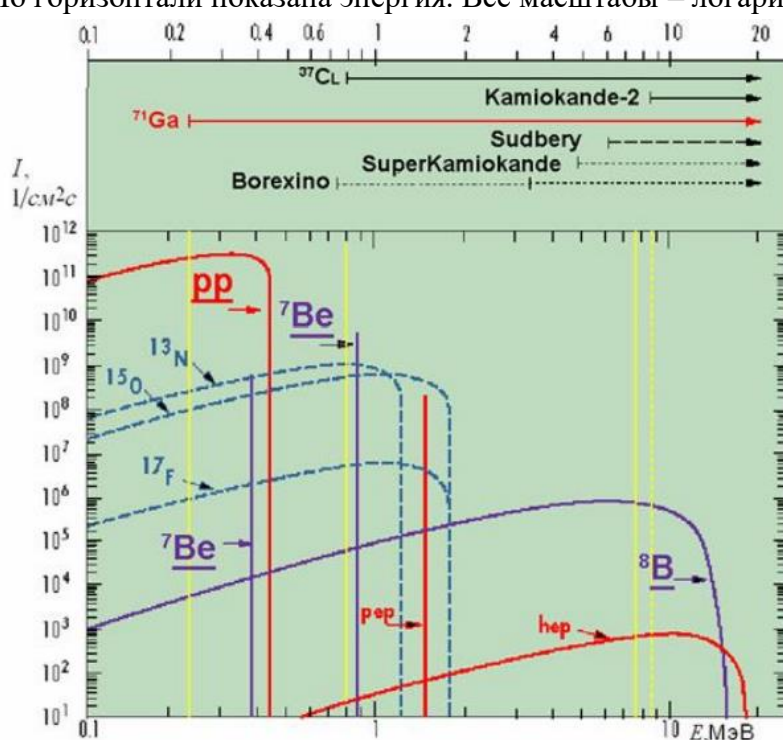


Рис. 4.6. График генерации потоков нейтрино в зависимости от различных параметров

Борные нейтрино возникают при взаимодействии с бором в недрах Солнца. Их энергия может быть больше 10 МэВ. С уменьшением энергии количество нейтрино уменьшается.

*Задача:* рассчитайте количество нейтрино, которое проходит через человека за 1 секунду.

*Ответ:* 60 000 000 000 нейтрино проходит через 1 см<sup>2</sup> на Земле в секунду или 100 000 000 000 000 (сто триллионов!) нейтрино в секунду через каждого из нас.

Опасность от проникающего нейтринного излучения отсутствует. Практически все солнечные нейтрино пронизывают нас не причиняя никакого вреда: только один человек (через которого прошло нейтрино) в 10 000 000 000 000 000 000 = 10<sup>19</sup> почувствует это.

Вероятность солнечному нейтрино оказать воздействие на нас равна 1 / 10 000 000 000 000 000 000.

### Проблема солнечных нейтрино

В XX веке Рей Дэвис (1914 – 2006) сравнил число нейтрино от Солнца в детекторе и число нейтрино, которое предсказывает Стандартная солнечная модель:

$$\frac{\text{Число } \nu_s \text{ в детекторе}}{\text{Число } \nu_{\text{ССМ}}} = \frac{1}{3}$$

где  $\nu_s$  – солнечный нейтрино,  $\nu_{\text{ССМ}}$  – нейтрино Стандартной солнечной модели.

Результат в 1/3 и называется проблемой солнечных нейтрино. Если считать, что весь мир организован и подчиняется тем закономерностям, которые описываются Стандартной моделью взаимодействия частиц, то это парадокс, который невозможно решить в рамках стандартной теории взаимодействия элементарных частиц.

Только особые специфические свойства нейтрино способны объяснить результат в 1/3. Эти свойства – это смешивание и осцилляции нейтрино.

На рисунке 4.7 показана бочка для эксперимента нейтрино, в которой нашли 6 атомов аргона (эксперимент был описан выше).



Рис. 4.7. Эксперимент. Бочка для осцилляции нейтрино

В ИЯИ РАН также проводились эксперименты: недалеко от Баксанского ущелья на Чегете существует тоннель и крупнейшая подземная лаборатория, где в том числе исследуются свойства нейтрино.

Эксперимент SAGE: измерение потока нейтрино

$$SAGE: [pp + {}^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{per} + {}^8\text{B}|Ga] = 64.6 \pm 3.8 \text{ SNU}$$

В эксперименте измерялось соотношение того количества нейтрино, которое предсказывает стандартная теория (около  $127.8^{+8.1}$  усл. единиц). По результатам эксперимента вышло в 2 раза меньше. Т.е. обнаружено существенное подавление.

### Проблема атмосферных нейтрино

Проблема: недостаток нейтрино, которые должны были бы приходить в детектор, если все описывается правильно в Стандартной теории взаимодействия элементарных частиц.

Генерация атмосферных нейтрино происходит следующим образом (рис 4.8): желтой пунктирной линией показано начало плотных слоев атмосферы (15-20 км над Землей), куда прилетают космические лучи (протоны). Они, по теории слабых взаимодействий генерируют пионы  $\pi^+$ , которые распадаются на мюоны  $\mu^+$  и нейтрино  $\nu_\mu$ . Мюоны распадаются на электроны и пару нейтрино – антинейтрино.

После этого нейтрино, обладающие уникальной проникающей способностью, ничего не задевая пролетают 10 км до детектора.

Тогда в детекторе измеряются нейтрино: мюонное, анти и электронное. Каждому электронному нейтрино соответствуют два мюонных события, если верна стандартная модель взаимодействия.

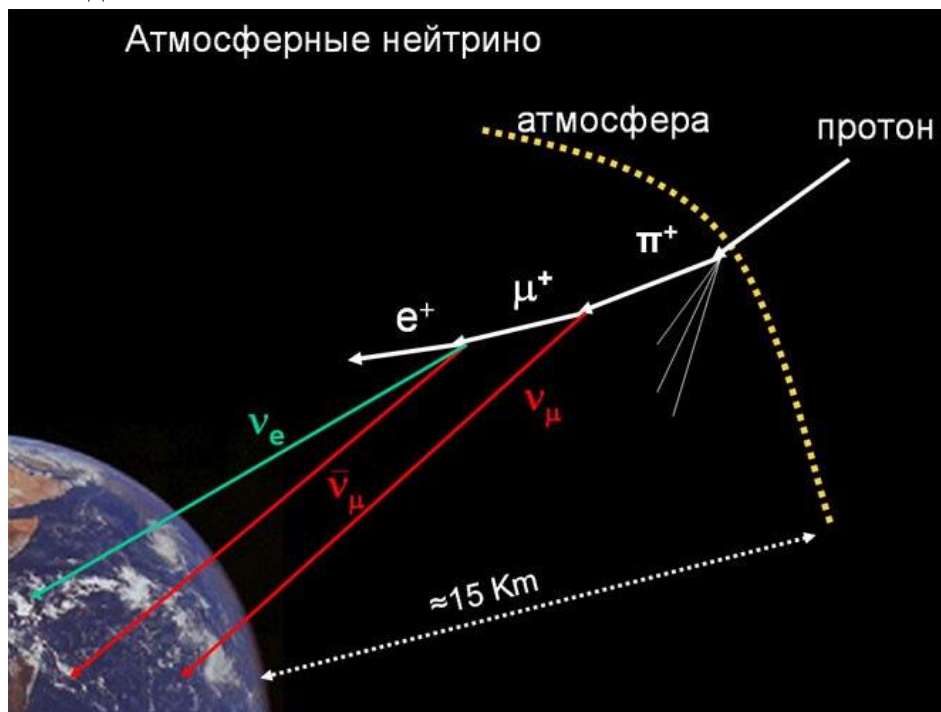


Рис. 4.8. Генерация атмосферных нейтрино

---

Проблема:

$$R = \frac{\text{Число } \nu_{\mu} \text{ в детекторе}}{\text{Число } \nu_e \text{ в детекторе}} < 2$$

В рамках стандартной модели взаимодействия элементарных частиц ответ должен быть равен 2. В результате эксперимента результат значительно отличался от предсказанного. Это парадокс.

Решение проблемы заключается в том, что нейтрино является не обычной частицей, а смесью разных типов нейтрино. При рождении нейтрино – электронное. Перемещаясь от Солнца в своем пути оно переходит в разные типы, т.е. при распространении пучка нейтрино происходит периодическое изменение типа нейтрино.



## Лекция 5. История изучения нейтрино

### 5.1. Взаимодействие элементарных частиц

Существует четыре типа взаимодействия:

1. Электромагнитное взаимодействие (взаимодействие заряженных частиц или электрических токов);
2. Слабое взаимодействие (распады частиц: превращение нейтрона в протон; электрона в антинейтрино);
3. Сильное взаимодействие (объясняет тот факт, что протон и нейтрон состоят из более элементарных частиц – кварков);
4. Гравитационное взаимодействие

Стандартная модель объединяет электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие и описывает все превращения и взаимодействия элементарных частиц. В настоящее время нет отклонений от данной теории, за исключением гравитационного взаимодействия, которое рассматривается отдельно.

Нейтрино, как элементарная частица, входит в состав Стандартной модели, но демонстрирует однозначно подтвержденные экспериментально свойства, которые не описываются этой Стандартной моделью.

### 5.2. Бозон Хиггса

В 2013 году была вручена нобелевская премия П. Хиггсу и Ф. Энглеру. Открытие и подтверждение существования бозона Хиггса ознаменовало триумфальное завершение истории, связанной с формированием и развитием представлений современных ученых о том, как устроен микромир на основе Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц.

*Причины названия бозона именем «Хиггс»*

В 2013 году в Стокгольме прошла конференция Европейского физического общества по физике высоких энергий. На этой конференции П. Хиггс рассказывал о том, как случилось открытие бозона.

В 1964-м году П. Хиггс опубликовал краткую статью, в которой он изложил основы своей новой теории. Более развернутый вариант статьи он послал в другой авторитетный журнал и получил на нее отрицательную рецензию.

*Примечание:* ученый, который хочет опубликовать статью связывается с редактором, который отправляет его статью на экспертизу специалисту в данной области. Мнение специалиста сообщается анонимно. Критика заключалась в том, что теория Хиггса была подвергнута сомнениям, потому что по результатам следовало существование бозона, которого «нет в природе».

После отрицательной рецензии Питер Хиггс дописал статью, где указал, что из его теории следует существование новой скалярной частицы. После этого он отправил статью в журнал еще раз. Уже в этот момент там находилась статья Браута и Энглера, которые применили немного другой подход к этому вопросу, но суть была идентичной теории Хиггса. Тогда редакторы журнала опубликовали две статьи сразу в одном

номере. По этой причине бозон получил название бозон Хиггса, так как в его статье было указано существование данной частицы.

До 2012 года частица была «неуловимой». В 2012 году в ЦЕРНе в двух экспериментах с использованием большого адронного коллайдера окончательно были получены результаты. После был собран семинар, где было объявлено, что эксперимент прошел удачно и частица найдена.

*Примечание:* основной ускоритель – большой адронный коллайдер – находится на глубине около 100 метров под землей. Его можно сравнить с тоннелем московского метро. Радиус тоннеля сравним с радиусом кольцевой линии московского метрополитена. Длина кругового ускорителя в ЦЕРНе составляет 27 км.

На рисунках 5.1 – 5.2 показан процесс увеличения информации о возникновении частиц. Красным цветом отражена информация о разных частицах, а синим цветом показан бозон Хиггса. По вертикальной оси отложены события, по горизонтальной – массы частиц.

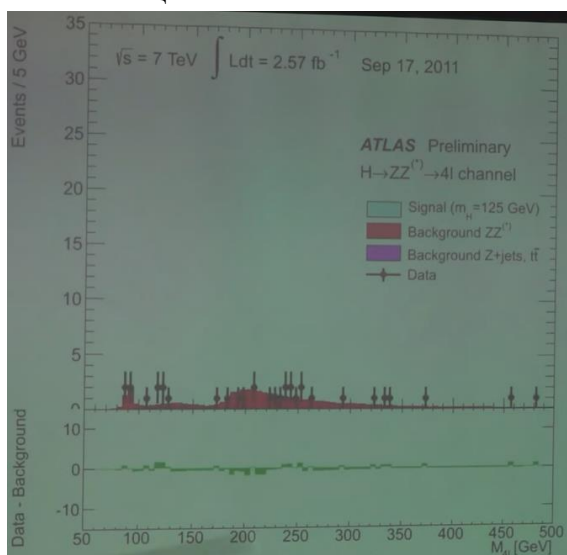


Рис. 5.1. График событий и появления частиц

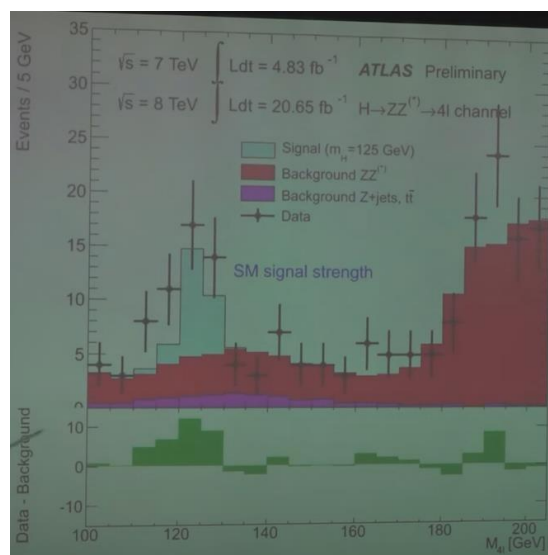


Рис. 5.2. График событий и появления частиц

Рассмотрим массы различных частиц.

Масса электрона:

$$m_e = 0.5 \text{ MeV}$$

Масса фотона (переносчик электромагнитных взаимодействий) в вакууме:

$$m_\gamma = 0$$

Масса нейтрона:

$$m_n > m_p \sim 938 \text{ MeV} \sim 1 \text{ GeV}$$

Масса переносчиков взаимодействий Z и W:

$$m_{Z,W} \sim 80 - 90 \text{ GeV}$$

Т.е. переносчики слабых взаимодействий примерно в 100 раз тяжелее протонов и нейтронов.

Масса бозона Хиггса:

$$m_H \sim 125 \text{ GeV}$$

Масса бозона Хиггса близка к массе Z и W-бозона, но в 1.5 раза больше.

*Причины, по которым бозон Хиггса был обнаружен последним*

Частицы связаны между собой и их взаимодействие описывается определенными константами. Связь бозона Хиггса с другими частицами (например, с электронами) пропорциональна отношению массы лептона к массе W-бозона. Масса лептона у электрона  $m_e = 0.5 \text{ MeV}$ , у мюона – в 200 раз больше, а масса W-бозона составляет около  $100 \text{ GeV}$ . Поэтому бозон Хиггса связан с другими частицами и константа связи, которая определяет насколько его легко обнаружить – крайне мала. Поэтому частицу было трудно обнаружить.

Проект и строительство большого адронного коллайдера готовился около 20 лет. Его одобрили еще в конце 1980-х годов. Стоимость проекта составляет не менее 10 млрд долларов. Главная цель большого адронного коллайдера – обнаружение частицы и окончательное подтверждение того, что Стандартная модель – верна.

### 5.3. История изучения нейтрино

Нейтрино – одна из самых загадочных и уникальных элементарных частиц. В настоящее время из всех известных частиц только нейтрино обладает свойствами, которые не описываются Стандартной моделью. Теоретики и экспериментаторы рассматривают возможность существования других гипотетических частиц.

История развития теории микромира связана с историей становления и развития знаний о нейтрино.

Свойства нейтрино:

- очень легкая  $m_{\nu_f} \ll m_f, f = e, \mu, \tau$
- нейтральная  $q_\nu = 0, q_\nu < 4 \cdot 10^{-17} e$
- магнитный момент  $\mu_\nu$
- очень слабо связана (взаимодействует) с окружающим миром (другими частицами)
- демонстрирует свойства, не укладывающиеся в Стандартную модель.

Существует теория, по которой нейтрино обладает нетривиальным электрическим зарядом.

В 1930-м году Вольфганг Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино, назвав эту частицу «нейтроном». Он отправил это в открытом письме Тюбнгенскому физическому обществу, в котором говорилось:

- о существовании  $\nu$  как нейтроне, с массой  $m_\nu < m_e$  или равной 0;
- существование  $\nu$  «спасает» закон сохранения энергии в  $\beta$ -распаде ядер

Н.Бор.

Это предсказание Паули играло существенную роль в понимании того, как устроен наш мир. Без нейтрино казалось, что при исследовании ядерных распадов нарушается закон сохранения энергии.



Рассмотрим распад одного из нейтронов, который входит в ядро трития. Тритий – это связанное состояние двух нейтронов и протона. Один из нейтронов ядра трития может распасться по схеме слабых взаимодействий в протон, электрон и нейтрино:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 1) + e^{\mp} + \nu(\bar{\nu})$$

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

$${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e + \bar{\nu},$$

$$T_{1/2} = 12,3 \text{ лет},$$

Однако до 1930-ого года у ученых не было понимания, что при  $\beta$ -распаде возникает четвертый объект. Если не учитывать, что при распаде трития возникает нейтрино, то получается парадоксальная ситуация. Так как масса распадающегося ядра на несколько порядков превосходит массу электрона, то получается (без учета нейтрино), что тяжелый объект распадается в другой тяжелый объект, но чуть более легкий:

- масса протона и нейтрона носит порядка  $10^9$  эВ;
- масса электрона  $0.5 \cdot 10^6$  эВ.

Таким образом, вся энергия, которая освобождается (разница масс нейтрона и протона):

$$Q = M(A, Z) - M(A, Z + 1) = 18.6 \text{ keV}$$

Если ядро распадается в «покое», то вся энергия уносится электроном, т.к. протон тоже находится в покое. Эта энергия у электрона равняется разности масс нейтрона и протона.

Без существования нейтрино при распаде электроны будут иметь одну энергию, которая равняется разнице масс (распадающегося и дочернего ядра). Однако, к 1930-му году ученые измеряли множество различных радиоактивных распадов. Экспериментаторы заметили, что у электронов распада изменяется энергия в широком диапазоне: от некоторого минимального значения, которое не может быть меньше, чем масса до некоторого максимального значения, которое равняется разности масс распадающегося ядра и дочернего ядра.

Указанная проблема повергла в смятение лучшие умы, так что даже один из основоположников квантовой теории и уже ставший к тому времени лауреатом Нобелевской премии Нильс Бор писал, что «на современном этапе развития теории атома нет оснований придерживаться концепции сохранения энергии при ядерных распадах».

Письмо В. Паули участникам Международной конференции по ядерной физике (декабрь 1930 г., Тюбинген, на рис. 5.3):

*«Я рассмотрел возможность сохранить справедливость закона сохранения энергии. А именно, предлагаю существование нейтральной частицы и называю её «нейтроном»... Эта частица рождается при бета-распаде вместе с электроном таким образом, что сумма их энергий остаётся постоянной. Допускаю, что моё предложение может выглядеть сомнительным. Но выигрывает только тот, кто рискует!»*

(перевод, Студеникин А.И.)

Отметим, что Паули в своем письме называет еще неизвестный «нейтрино» - «нейтроном». Но реальный нейтрон был открыт в 1932 году ученым Джеймсом Чедвиком.

*Handwritten:* Original - Wolfgang Pauli - 1930  
Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Uraniastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst  
ansprechen bitte, Ihnen das näherem auseinanderzusetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Kerne, sowie  
des kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselwitz" (1) der Statistik und den Energiesatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche  
 $\beta$ -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
 $\beta$ -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

Рис. 5.3. Письмо Вольфганга Паули в Тюбингенский университет

После этого письма 3-4 года В. Паули не публиковался. В начале 1930х годов он писал своему другу:

«Сегодня я совершил то, что физик не должен делать никогда. Я предсказал нечто, что никогда не будет наблюдаться экспериментально».

(перевод, Студеникин А.И.)

Действительно, нейтрино – крайне уникальная частица, которую тяжело наблюдать. В настоящее время ученые не обладают информацией, чтобы обобщить всё Стандартной моделью, которая описывает все, на тот уровень, чтобы она описывала и все свойства нейтрино.

До Второй Мировой войны регулярно проводились Сольвеевские конгрессы в Брюсселе (рис. 5.4), где собирались выдающиеся физики: экспериментаторы и теоретики, которые занимались ядерной физикой, физикой элементарных частиц и обсуждали другие различные вопросы.



Рис. 5.4. 7-ой Сольвеевский конгресс в Брюсселе, октябрь 1933 г.

Сидят (слева направо): Erwin Schrödinger, Irène Joliot, Niels Bohr, Abram ioffe, Marie Curie, Paul Langevin, Owen Richardson, Lord Ernest Rutherford, Théophile de Donder, Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Lise Meitner, James Chadwick. Стоят (слева направо): Emile Henry, Francis Perrin, Frédéric Joliot, Werner Heisenberg, Hendrik Kramers, E. Stahel, Enrico Fermi, Ernest Walton, Paul Dirac Peter Debye, Nevill Mott, Blas Cabrera, George Gamov, Walther Bothe, Patrick Blackett, M.S. Rosenblum, Jacques Errera, Ed. Бэуэр, Вольфганг Pauli, Jules-Emile Verschaffelt, M. Cosyns, E. Herzen, John Cockcroft, Charles Ellis, Rudolf Peierls, Auguste Piccard, Ernest Lawrence, Léon Rosenfeld Absents: Albert Einstein and Charles Eugène Sue

Спустя 23 года в 1956 году нейтрино был экспериментально обнаружен.

Сложность понимания и восприятия этой идеи была подчеркнута и в статье Н. Bethe и R. Peierls, Nature 133 (1934) 532:

*«There is no practically possible way of observing the neutrino».*

*«Не существует никакой возможности наблюдать нейтрино».*

Развитие теории взаимодействия элементарных частиц, т.е. теории описания фундаментальных закономерностей микромира, можно рассматривать как развитие представлений о нейтрино:

*Шаг 1. Возникновение нейтрино*

Ознаменовался с фундаментальным вкладом в общее понимание устройство природы. Возникновение нейтрино позволило сохранить в умах справедливость закона сохранения энергии импульса при описании явлений природы.

### Шаг 2.

В 1933 году Энрико Ферми – один из главных деятелей ядерной физики и физики элементарных частиц – используя предсказание Понтекорво, создал третью теорию взаимодействия элементарных частиц. До 1933 года считалось, что гравитационные и электромагнитные взаимодействия описывают все связи между объектами и элементарными частицами. К тому времени уже были известны фотон, электрон и нейтрон и существовали различные попытки построить теорию ядра исходя из электромагнитных сил: модель атома Бора (1913) – усовершенствованная модель Резерфорда (положительно заряженное ядро + электроны на стационарных орбитах, не падают на ядро и не излучают излучение – при переходах электронов с орбиты на орбиту. Паули дополнил эту модель ядра: на каждой орбите может находиться только один электрон (принцип запрета Паули). Энрико Ферми построил новую теорию взаимодействия частиц, которая объясняет каким образом нейтрон превращается в протон, электрон и антинейтрино – *теория слабых взаимодействий*.

До Ферми существовала теория, которая описывает как взаимодействуют две заряженные частицы (два электрона) (рис. 5.5). По квантовой теории два электрона в какой-то момент времени обмениваются фотоном (переносчиком электромагнитного взаимодействия). Т.е. первый электрон испускает фотон, а спустя какое-то время второй электрон подцепляет этот фотон.

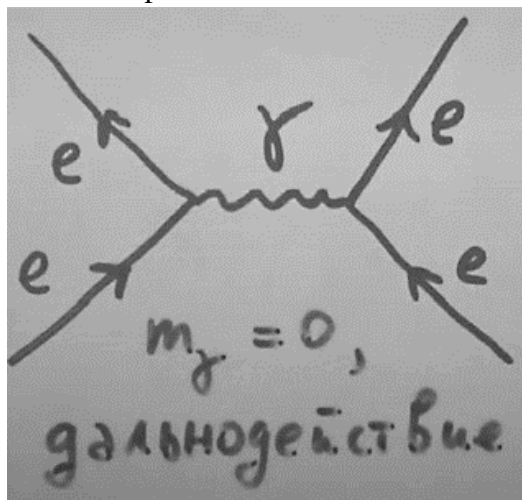


Рис. 5.5. Диаграмма Фейнмана. Взаимодействие двух заряженных частиц

В 1934 году построил первую теорию радиоактивного бета- распада, включив в рассмотрение новую частицу, которую назвал на итальянский манер «нейтрино».

Ферми добавил в диаграмму Фейнмана заштрихованную область и сказал, что это некоторая константа:

$$G_F = \frac{1}{(16 \text{ eV})} = 10^{-5}$$

$i$  – начальное состояние ядра,  $f$  – конечное состояние ядра.

Ферми взял схему, которая соответствовала описанию электромагнитного взаимодействия, и применил ее для описания теории слабых взаимодействий.

$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \Psi_p^+ O_\mu \Psi_n \Psi_e^+ O^\mu \Psi_\nu$$

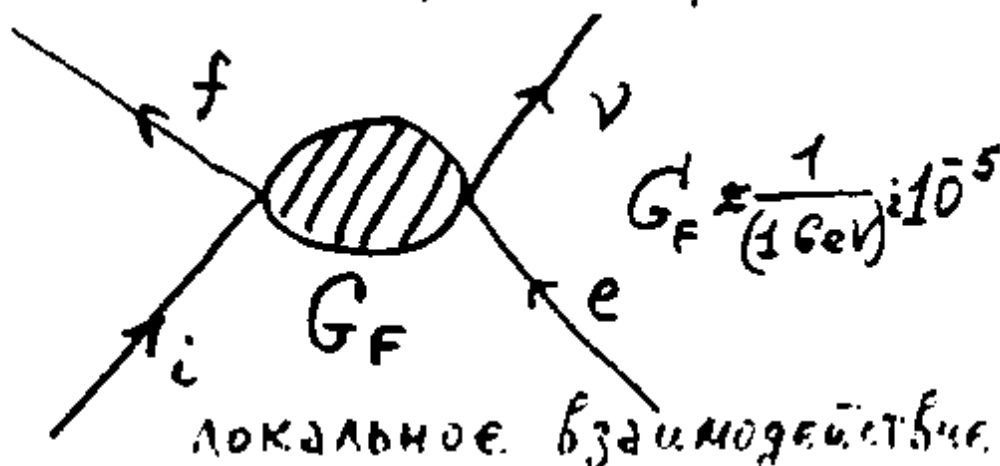


Рис. 5.6. Описание теории слабых взаимодействий

Еще один процесс, который происходит по схеме слабых взаимодействий – превращение тяжелого мюона:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Т.е. теория Ферми действует не только для описания превращения нейтрона в протон, но и в частности для превращения мюона в более легкий нейтрон и пару нейтрино-антинейтрино.

Рассмотрим важнейший открытый вопрос в физике нейтрино – масса нейтрино  $m_\nu = ?$ . Известно, что нейтрино имеет подтвержденные экспериментально свойства, которые не укладываются в стандартную модель взаимодействия частиц, т.к.:

$$CM \rightarrow m_\nu = 0$$

Если масса нейтрино равна 0, то релятивистское соотношение между энергией и импульсом:

$$E_\nu = \sqrt{vp_\nu^2 + m_\nu^2} (c = \hbar = 1)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.

Экспериментально по детектированию потоков нейтрино от Солнца следует, что масса нейтрино не равна 0.

Существует теория того, как работает Солнце, которая учитывает размер, светимость, химический состав, температуру и другие параметры. В рамках этой теории и теории стандартного взаимодействия элементарных частиц, которая объясняет, как частицы связаны между собой, можно посчитать сколько электронных

нейтрино образуется в недрах Солнца. Тогда можно рассчитать количество электронных нейтрино приходит на детектор каждую секунду. Парадокс заключается в том, что начиная с 1970-х годов, когда ученый Дэвис начал первым измерять поток нейтрино от Солнца (и получил за это Нобелевскую премию) и получал количество нейтронов равное  $1/3$  от ожидаемого теоретически потока.

Нейтрино – это не обычная элементарная частица, а смесь различных типов нейтрино. В детекторе измеряются электронные нейтрино – их  $1/3$ , а оставшаяся часть –  $2/3$  – составляют мюонные нейтрино и тау-нейтрино. А детектор заточен только на измерение электронных нейтрино. На протяжении десятилетий выдвигались различные предположения о том, что происходит с нейтрино (например, распад на другие частицы). Но все эти варианты исключались путем экспериментов на большом адронном коллайдере. Единственно возможным вариантом оставалась только одна гипотеза – превращение нейтрино в другой тип.

В 1957 году Бруно Понтекорво высказал идею: «Если нейтрино имеет массу, то существуют переходы между разными типами нейтрино». Факт того, что нейтрино является массивной частицей подкрепляется тем, что существует необходимость объяснить почему в экспериментах по детектированию нейтрино от Солнца наблюдается только  $1/3$  нейтрино. Если бы масса нейтрино равнялась нулю, то не было бы такой возможности, что электронный нейтрино переходит в два других типа. По этой причине это установленный факт, который выходит за пределы Стандартной модели.

*Примечание:* в рамках Стандартной модели нейтрино – нейтральная безмассовая частица (доказано, что это не так).

Таким образом, одна из ключевых проблем – открытый вопрос о массе нейтрино.

Ниже на рисунке 5.7 приведен график: по вертикальной оси отложена величина  $A$ , которая характеризует количество электронов при  $\beta$ -распаде:

$$A = \sqrt{\frac{N(p_e)}{p_e^2 F(z, E_e)}} = B \cdot (Q - E_e)$$

по горизонтальной оси отложена энергия электронов. График представляет собой прямую, которая пересекает ось  $X$  в точке  $Q$ , если масса нейтрино равна 0:  $m_\nu = 0$ . Если масса нейтрино не равняется 0  $m_\nu \neq 0$ , то часть энергии нейтрино должна быть заморожена в массе, поэтому кинетическая энергия нейтрино будет меньше. Т.е. общая энергия, которая выделяется при  $\beta$ -распаде распределяется между энергией, которая необходима, чтобы компенсировать массу нейтрино и движение. Так как нейтрино имеет массу, максимальная энергия движения будет меньше, чем максимально доступная энергия.

Экспериментаторы, которые нацелены на определение реального значения массы, исследуют ту часть электронов распада, энергия которых очень близка к максимально возможной.

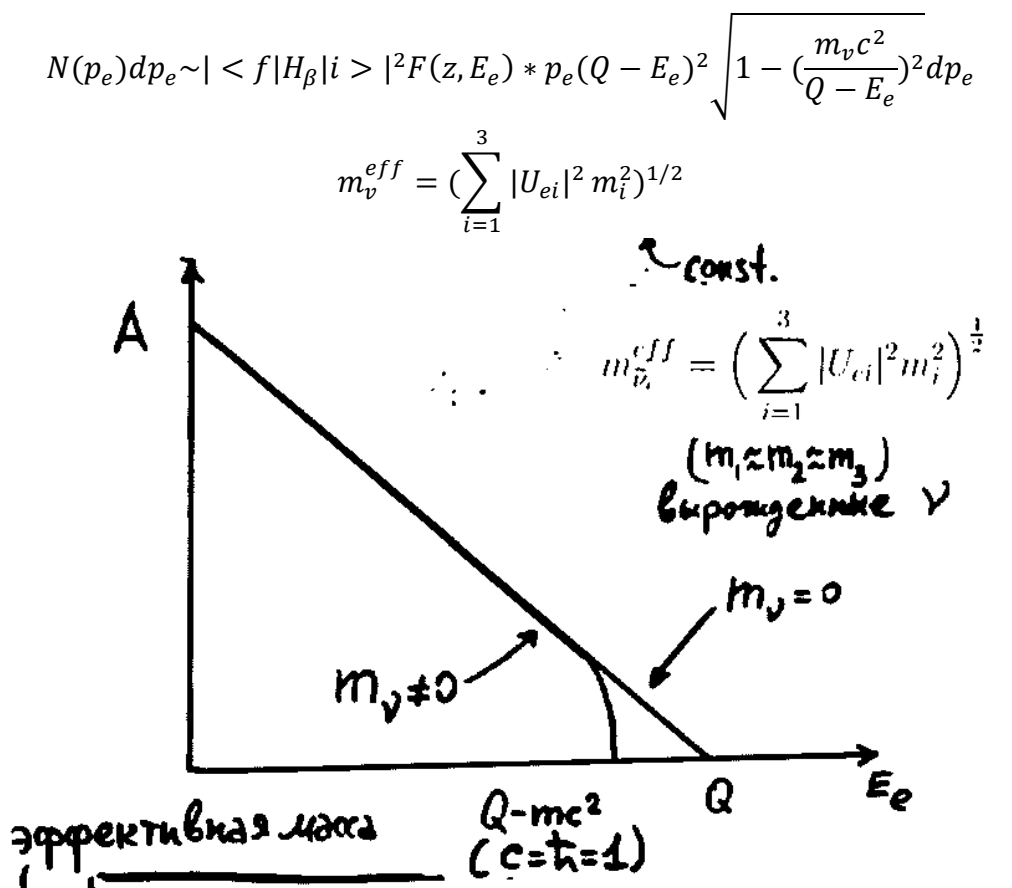


Рис. 5.7. Диаграмма Кюри (спектр электронов распада)

В настоящее время существуют ограничение на массу нейтрино: масса нейтрино  $m_\nu < 0.8 \text{ eV}$ .

Уже более 5 лет в Германии проводится эксперимент *KATRIN* по прямому измерению массы нейтрино. В 2019 году Гвидо Дрекслин (Guido Drexlin) сделал доклад на 16-й международной конференции по физике астрочастиц и подземной физике (Тояма). В своем докладе он впервые обнародовал первые результаты:

$$m_\nu < 1.1 \text{ eV}$$

Выпускник МГУ А. Лохов и его коллега из института ядерных исследований – Л. Ткачев – разработали мощный метод статистического анализа. Этот метод позволил обработать данные эксперимента *KATRIN* и получить ограничение на массу нейтрино.

### Несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях

Важная часть физики нейтрино – это открытие несохранения четности в природе (в слабых взаимодействиях). Оказалось, мир устроен так, что «левое» отличается от «правого».

Информация от зеркала, которая воспринимается обычным человеком, происходит за счет электромагнитных волн, которые описываются электромагнитными взаимодействиями. В электромагнитных взаимодействиях четность сохраняется, а в слабых взаимодействиях четность не сохраняется. Слабые взаимодействия возникли



благодаря тому, что существует нейтрино. Таким образом, нарушение четности связано с нейтрино.

Эксперимент по изучению несохранения пространственной четности был проведен Ц. Ву в 1957 году. В эксперименте рассматривался распад радиоактивного кобальта: измерялось количество электронов, которые направлялись вдоль или против одного выделенного направления. Ученые наблюдали, что большее количество электронов летит против выделенного направление. Если мысленно поставить зеркало и посмотреть на отражение данного экспериментального факта, то в зеркале будет видно то, что не описывается теорией, которая описывает реальный процесс. Если бы пространственная четность сохранялась (симметрия относительно зеркального отражения), то одинаковое количество электронов по и против магнитного поля.

## Лекция 6. Свойства нейтрино

### 6.1. Фундаментальные проблемы физики нейтрино

Существуют две фундаментальные проблемы физики нейтрино:

1. Проблема солнечных нейтрино
2. Проблема атмосферных нейтрино

#### Проблема солнечных нейтрино

Рей Дэвис в середине 1970-х годов впервые зафиксировал поток нейтрино от Солнца:

$$\frac{\text{Число } \nu_s \text{ в детекторе}}{\text{Число } \nu_{\text{ССМ}}} = \frac{1}{3}$$

где  $\nu_s$  – солнечный нейтрино,  $\nu_{\text{ССМ}}$  – нейтрино Стандартной солнечной модели.

По стандартной теории Солнца, зная какие реальные физические и химические условия реализуются на Солнце, можно посчитать сколько нейтрино рождается на Солнце. Кроме того, зная какое расстояние нейтрино проходит от Солнца до Земли можно рассчитать количество нейтрино, которые должны прийти на Землю. Проблема солнечных нейтрино заключается в том, что детектором фиксируется только 1/3 нейтрино от общего количества.

#### Проблема атмосферных нейтрино

Проблема атмосферных нейтрино – это недостача нейтрино в потоках от атмосферы.

Космические лучи (в большей степени протоны) взаимодействуют с верхними слоями атмосферы. Результат этого процесса – появление пионов – процесс, происходящий по схеме слабых взаимодействий в рамках Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц. Пионы распадаются на мюоны и мюонное нейтрино. Далее пролетает мюон и распадается на электрон и электронное нейтрино. В результате в детектор (на Землю) приходит одно электронное нейтрино и два мюонных нейтрино и антинейтрино.

Сравним относительное содержание мюонных нейтрино в детекторе к числу электронных нейтрино в детекторе:

$$R = \frac{\text{Число } \nu_\mu \text{ в детекторе}}{\text{Число } \nu_e \text{ в детекторе}} < 2$$

Предсказание: на каждое электронное нейтрино существует два мюонных нейтрино. Т.е.  $R = 2$ . Однако по результатам эксперимента  $R = 2$  получено не было. Ученые выяснили, что  $R < 2$ . Т.е. природа устроена по-другому.

Проблема солнечных нейтрино и проблема атмосферных нейтрино простимулировали развитие науки в области физики элементарных частиц. Так в 2015 году Артур Макдональд и Такааки Каджита получили Нобелевскую премию «за открытие осцилляций нейтрино, что доказывает наличие у нейтрино ненулевой массы». Отметим, что выдающуюся роль в «обеспечении» данной Нобелевской премии сыграл Бруно Максимович Понтекоров, которые долгие годы был сотрудником физического

факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и возглавлял кафедру физики элементарных частиц. Его предположения:

- если  $m_\nu \neq 0$  существует смешивание различных типов нейтрино  $\nu \leftrightarrow \bar{\nu}$
- осцилляции нейтрино – возможны.

Статьи Б. Понтекорво:

1) Б. Понтекорво, «Мезоний и антимезоний», ЖЭТФ 33 (1957) 549-551:

«Выше предполагалось, что имеет место закон сохранения нейтринного заряда... Этот закон пока не установлен... Если теория двухкомпонентного нейтрино оказалась бы неверной... и если бы не имел место закон сохранения нейтринного заряда, то в принципе переходы нейтрино  $\rightarrow$  антинейтрино в вакууме возможны».

Из этого следует, что предположение, о котором говорит Понтекорво, о несохранении типа нейтрино является возможностью переходов между различными типами нейтрино.

2) В. Pontecorvo, «Inverse B processes and nonconservation of leptonic charge», JINR Preprint P-95, Dubna, 1957, 3 pages :

*«Neutrinos in vacuum can transform themselves into antineutrino and vice versa. This means that neutrino and antineutrino are particle mixtures... So, for example, a beam of neutral leptons from a reactor which at first consists mainly of antineutrinos will change its composition and at a certain distance R from the reactor will be composed of neutrino and antineutrino in equal quantities».*

В этой статье Б. Понтекорво говорит о переходах между различными типами нейтрино. Он отмечает, что нейтрино и антинейтрино являются смешанными частицами. Т.е. разные типы нейтрино не существуют отдельно, а являются частью общей смеси. Понтекорво приводит в качестве примера следствие: поток нейтрино от реактора, который в начале в основном состоит из антинейтрино, изменит свой состав и на определенном расстоянии R от реактора этот поток будет состоять равного количества частиц нейтрино и антинейтрино.

Т.е. Бруно Понтекорво предсказал два фундаментальных явления природы:

- если у нейтрино ненулевая масса, то нейтрино не существуют по отдельности;
- явление осцилляций в результате смешивания различных типов нейтрино.

## 6.2. Типы нейтрино

В физика элементарных частиц существует три заряженных лептона (точечные объекты с некоторой массой и зарядом):

- электрон;
- мюон;
- тау-лептон.

Вспомним основные значения масс элементарных частиц:

- масса электрона:

$$m_e = 0.5 \text{ MeV}$$

- масса нейтрино:

$$m_v^{eff} < 0.8 \text{ eV}$$

Таким образом, эффективная масса нейтрино примерно в полмиллиона раз меньше массы электрона, но точно не равняется 0.

Необходимо различать два типа нейтрино (рис. 6.1). В некоторых ситуациях нейтрино себя проявляет как флейворный нейтрино – эти нейтрино непосредственно связаны с заряженными лептонами. Их наличие или возникновение всегда сопровождается возникновением электронов / мюонов / тау.

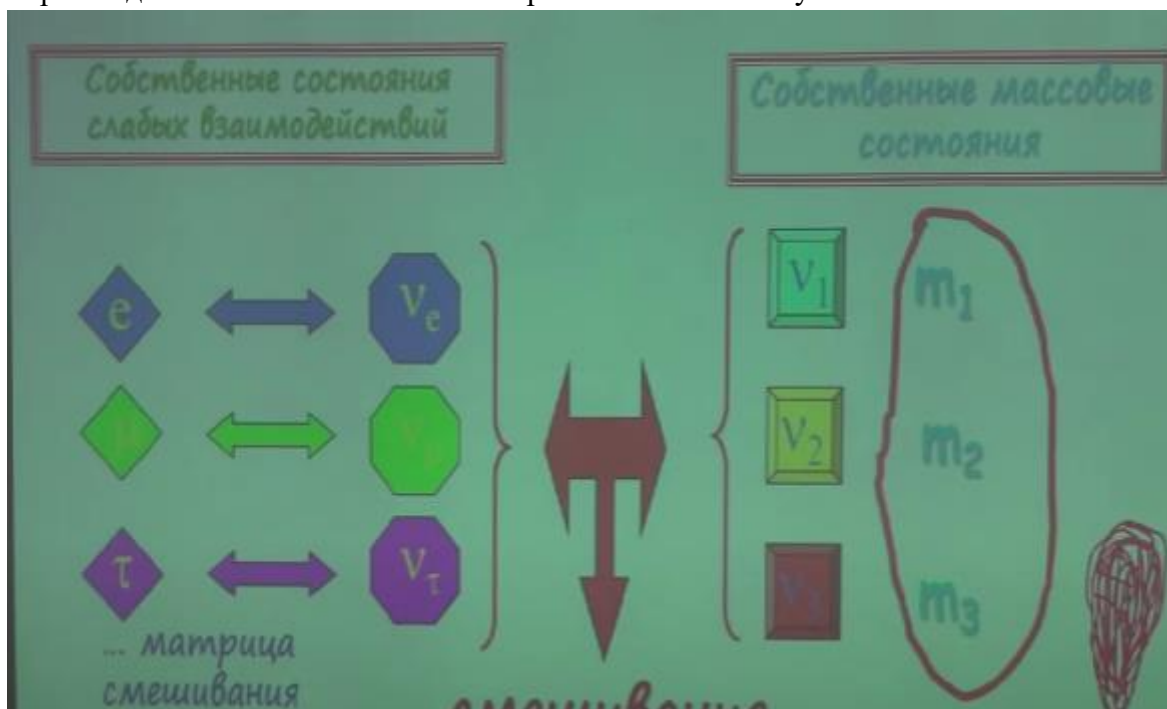


Рис. 6.1. Нейтринные состояния

### 6.3. Свойства нейтрино

В настоящее время известна Стандартная модель взаимодействия элементарных частиц (SM):

- $\nu_e$  – электронное нейтрино  $\nu_e \leftrightarrow e^-$ ;
- $\nu_\mu$  – мюонное нейтрино  $\nu_\mu \leftrightarrow \mu^-$ ;
- $\nu_\tau$  – тау-нейтрино  $\nu_\tau \leftrightarrow \tau^-$

#### Подход теоретиков к описанию нейтрино

Лагранжиан – математическая конструкция, которая описывает все свойства частиц и их взаимодействие. В данном случае в лагранжиане присутствуют такие математические конструкции (рис. 6.2), которые объясняют связь между электронным нейтрино и электроном. Т.е. по возникновению нейтрона можно говорить о появлении электронного нейтрино.

Аналогичный блок в лагранжиане описывает взаимодействие нейтрино другого типа (рис. 6.3): мюонного нейтрино и мюона.

Аналогичный блок в лагранжиане описывает взаимодействие нейтрино другого типа (рис. 6.4): тау-нейтрино и тау-лептона.

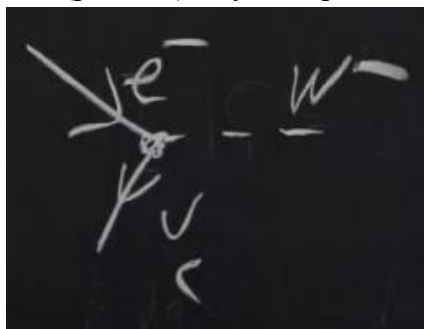


Рис. 6.2. Взаимосвязь электронного нейтрино и электрона

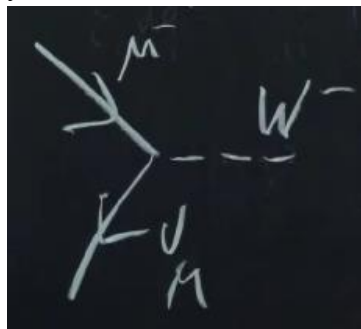


Рис. 6.3. Взаимосвязь мюонного нейтрино и мюона

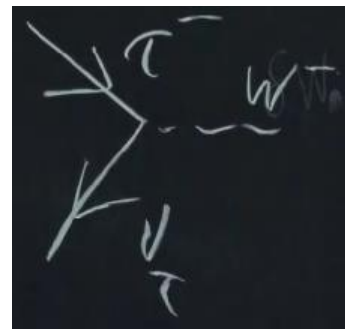


Рис. 6.4. Взаимосвязь тау-нейтрино и тау-лептона

Эти взаимодействия объясняют процесс появления нейтрино и его детектирования. Лагранжиан содержит в себе характеристики частиц, которые живут и взаимодействуют между собой.

Так как существуют две проблемы, которые не разрешимы в рамках стандартной теории элементарных частиц, необходимо отказаться от самого естественного и обычного способа описания перемещений нейтрино. Отказавшись от такого описания вводятся другие нейтрино:  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ . Ученые не знают, как три данных типа нейтрино взаимодействуют с другими частицами, но знают, что они имеют массу:  $m_1, m_2, m_3$ .

Рассмотрим уравнение движения в классической механике – второй закон Ньютона:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

где  $F$  – сила,  $a$  – ускорение.

Рассмотрим уравнение движения в квантовой физике, которое лежит в основе Стандартной модели – уравнение Дирака:

$$(\hat{p} - m)\Psi(X) = 0$$

где  $\Psi(X)$  – волновая функция (характеристика нейтрино),  $\hat{p}$  – импульс.

Ключевым объектом и в классической, и в квантовой физике является масса, без которой невозможно поставить вопрос о перемещении объекта.

Ученые, описывая нейтрино говорят о том, что существуют нейтрино, о которых известно как они рождаются и как уничтожаются, и существуют нейтрино с точечной массой, для которых можно написать уравнение траектории движения нейтрино из одной точки (недр Солнца) в другую точку (детектор).

Важно понимать, что флейворные нейтрино используются для описания возникновения и детектирования нейтрино, а  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  используются для понимания и описания движения от Солнца до детектора. Фактически, это применение корпускулярно-волнового дуализма. Восстановим единство: между двумя взглядами и

подходами к описанию нейтрино должна быть связь. Эта связь устанавливается явлением смешивания:

$$|v_f\rangle = \sum_i U_{fi} |v_i\rangle$$

$$U_{fi} = \begin{pmatrix} a_e & b_e & c_e \\ a_\mu & b_\mu & c_\mu \\ a_\tau & b_\tau & c_\tau \end{pmatrix}$$

*Гипотеза Понтекорво:* каждое флейворное нейтрино – это сумма с определенным весом  $v_1, v_2, v_3$ :

$$v_e = a_e v_1 + b_e v_2 + c_e v_3$$

$$v_\mu = a_\mu v_1 + b_\mu v_2 + c_\mu v_3$$

$$v_\tau = a_\tau v_1 + b_\tau v_2 + c_\tau v_3$$

Отметим, что вклады  $a, b, c$  – числа, которые могут сильно различаться.

Проведем мысленный эксперимент: предположим, мы имеем несколько маленьких шариков разного размера, в которых внутри замешано немного краски. Возьмем колбу и положим туда три шарика разной массы. После этого сделаем резкое движение рукой так, чтобы шарики полетели. Эти шарики имеют три разные массы:  $m_1, m_2, m_3$ . После выкидывания шариков вероятно один из них (самый легкий) улетит дальше всех и ударится об стену, второй останется где-то на полу посередине, а третий и вовсе может упасть на ноги. Т.е. этот эксперимент фактически доказывает, что нельзя ввести понятие массы для электронного, мюонного и тау-нейтрино – невозможно написать уравнение Дирака.

### Решение проблемы недостатка солнечного нейтрино в детекторе

Рассмотрим схематическое решение проблемы недостатка солнечного нейтрино в детекторе на Земле и недостатка мюонных нейтрино в эксперименте по детектированию потоков нейтрино из атмосферы (рис. 6.5)

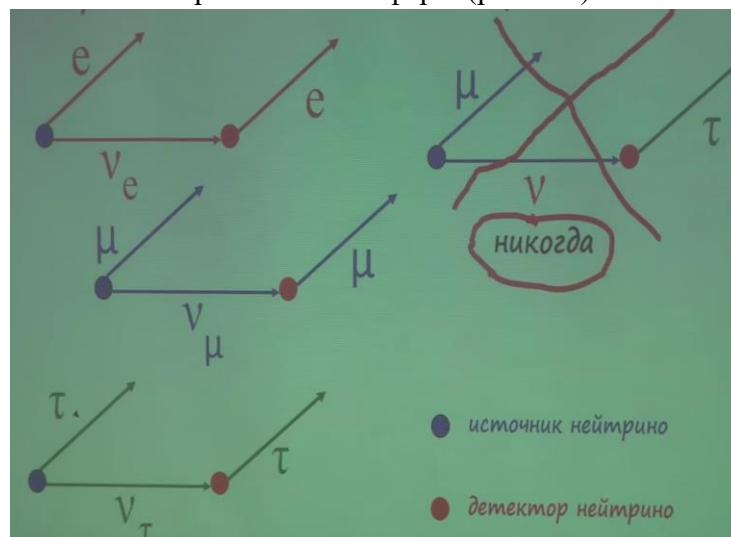


Рис. 6.5. Схематическое изображение взаимодействия элементарных частиц



Синими точками на схеме отмечены источники, красными точками – детекторы.  
Ситуации:

- 1) Если в источнике возникает электронное нейтрино – это значит, что где-то существует и электрон, как индикатор появления нейтрино. Если бы нейтрино было обычной частицей, тогда бы она долетела до детектора, провзаимодействовала бы и появился бы электрон.
- 2) Если в источнике возникает мюонное нейтрино – это значит, что где-то существует и мюон, как индикатор появления нейтрино. Если бы нейтрино было обычной частицей, тогда бы она долетела до детектора, провзаимодействовала бы и появился бы мюон.
- 3) Если в источнике возникает тау-нейтрино – это значит, что где-то существует и тау-лептон, как индикатор появления нейтрино. Если бы нейтрино было обычной частицей, тогда бы она долетела до детектора, провзаимодействовала бы и появился бы тау-лептон.

Данные три ситуации описывают одинаковое взаимодействие, что является неверным.

Решение проблемы: пусть источник нейтрино – Солнце (рис. 6.6). При этом нейтрино является смесью  $\nu_1$  с массой  $m_1$ ,  $\nu_2$  с массой  $m_2$ ,  $\nu_3$  с массой  $m_3$ . Считается, что энергия у  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  приблизительно одинаковая. Частица с меньшей массой будет лететь быстрее. В природе нейтрино «разваливается» и далее распространяется по квантовому закону движения. Каждая из компонент летит с разной скоростью. Когда частицы доходят в детектор, они имеют иную суперпозицию – возникает новая «смесь».

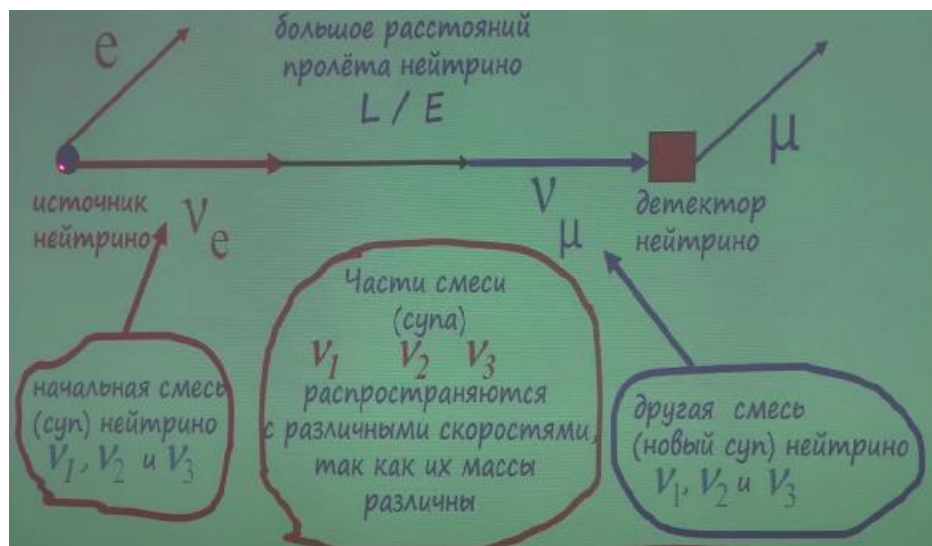


Рис. 6.6. Явление смешивание и осцилляции

### Осцилляции нейтрино в вакууме

Авторы трудов по явлениям осцилляции:

- В. Грибов, Б. Понтекорво (1965 г.);

- С. Биленский, Б. Понтекорво (1976г.).

Рассмотрим явление осцилляции – переход нейтрино из одного типа в другой происходит по гармоническому закону.

Рассмотрим электронное и мюонное нейтрино:

$$\nu^f = \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \neq \nu^f = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

где  $\nu^f = \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$  – состояние взаимодействия,  $\nu^f = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$  – массовые состояния.

Запишем частный случай:

$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta$$

где  $\theta$  – угол смешивания нейтрино в вакууме.

Типы экспериментов – детектирование осцилляций по:

- возникновению  $\nu$  «нового» флейвора ( $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ );
- исчезновению  $\nu$  «начального» флейвора ( $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ ).

Вероятность флейворных осцилляций (рис. 6.7) рассчитывается следующим образом:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E}$$

$$l_{osc} = 4\pi \frac{E}{\Delta m^2} = 2.5 \text{ м} \frac{E}{1 \text{ MeV}} \cdot \frac{1 \text{ eV}^2}{\Delta m^2}$$

При заданных  $E$  и  $L$  (расстояние от точки рождения до детектора) эксперимент чувствителен к:

$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

$$|\Delta m^2| \sim \frac{E}{L}$$

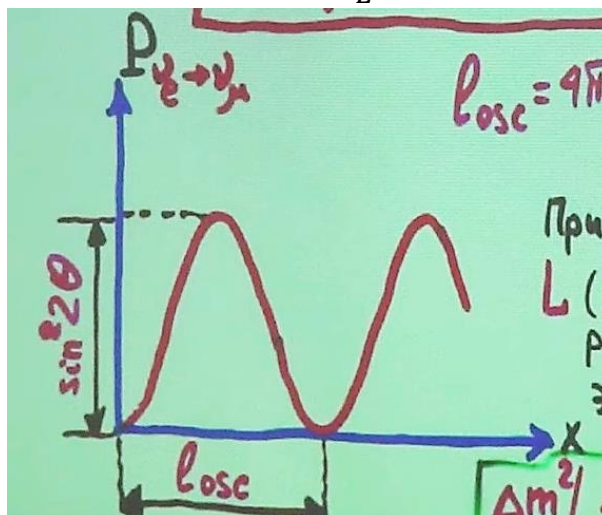


Рис. 6.7. График вероятности флейворных осцилляций

Таким образом, количество мюонных нейтрино зависит от пройденного расстояния как функция  $\sin^2 x$ . Гармонический закон объясняет каким образом по мере того, как исходный поток нейтрино движется в пространстве по координате  $X$  и времени, изменяется состав потока.

Ключевые явления физики нейтрино:

- 1) Дуализм (необходимо по-разному подходить к описанию нейтрино: при рождении нейтрино стоит рассматривать как флейворное нейтрино, которое описывается лагранжианом; если речь идет о распространении нейтрино, тогда его стоит описывать в терминах массового состояния нейтрино)
- 2) Смешивание
- 3) Осцилляции

Таким образом, решение проблемы солнечного нейтрино:

$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2: \theta_{1,2}$$

решение проблемы атмосферного нейтрино:

$$\Delta m_{\text{атм}}^2 = m_3^2 - m_2^2: \theta_{2,3}$$

Фактически, имеем два набора:

$$\Delta m_{21}^2 \theta_{21}$$

$$\Delta m_{32}^2 \theta_{32}$$

Из этого следует, что массы не могут быть одинаковыми и не могут быть равны 0.

### Резонансное усиление осцилляций

Рассмотрим еще одно свойство нейтрино, выходящее за рамки Стандартной модели взаимодействия частиц и связанное с осцилляциями нейтрино. В 1985 году был открыт эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна – резонансное усиление осцилляций нейтрино в веществе.

Флейворные осцилляции в покоящейся среде – нейтрино летит, ударяется о частицы среды, что влечет за собой изменение состояния движения и изменению угла смешивания нейтрино (рис. 6.8):

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_{eff} \sin^2\left(\frac{\pi x}{L_{eff}}\right)$$

где  $x$  – расстояние от источника нейтрино до детектора.

Тогда синус угла смешивания начинает зависеть от  $A$ :

$$\sin^2 2\theta_{eff} = \frac{\Delta^2 \sin^2 2\theta}{(\Delta \cos 2\theta - A)^2 + \Delta^2 \sin^2 2\theta}$$

$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta$$

$$\Delta = \frac{\delta m_v^2}{2E}$$

Величина  $A$  зависит от плотности:

$$A = \sqrt{2} G_F n_{eff}$$

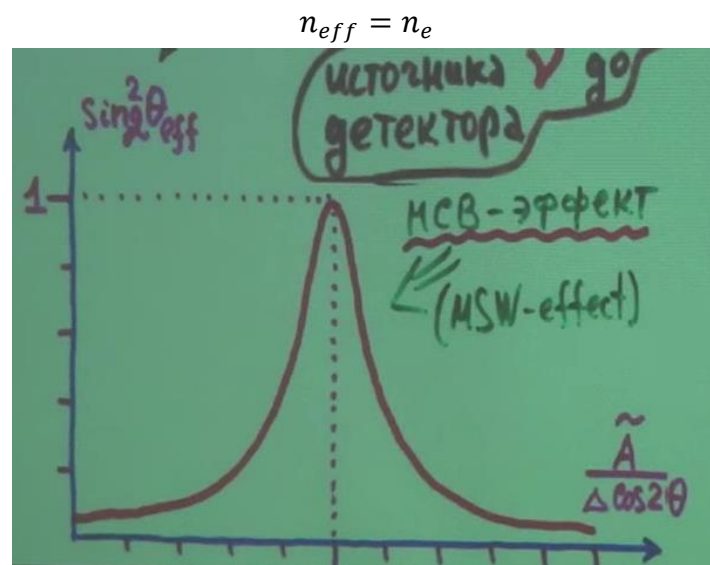


Рис. 6.8. Резонансное усиление осцилляций нейтрино

При определенной энергии, если:

$$\Delta \cos 2\theta = A$$

значение синуса становится максимально большим. За счет взаимодействия нейтрино, которое летит через среду, может возникнуть такой эффект.

Это явление получило название резонансное усиление нейтрино в среде. Решение проблемы солнечного нейтрино подразумевает учет того, что нейтрино на первых стадия движения их центра Солнца движется через очень плотную материю.

## Лекция 7. Вклад Б. М. Понтекорво в физику нейтрино

В физике нейтрино существует две проблемы: проблема солнечных нейтрино и проблема атмосферных нейтрино. Для решения данных проблем ученые вынуждены модифицировать, обобщать и дополнять материалы таким образом, чтобы расширить свойства и углубить Стандартную модель, не отвергая ее постулаты. Вместе с тем ученые открывают для себя множество новых различных явлений, которые не предсказываются в рамках теории взаимодействия элементарных частиц.

Бруно Максимович Понтекорво (1913 – 1993) – выдающийся советский (российский) ученый, с 1950 года до последних дней своей жизни он жил и работал в нашей стране, был научным сотрудником лаборатории ядерных проблем в Дубне и 20 лет возглавлял кафедру физики элементарных частиц на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

В 1957 году Бруно Понтекорво сказал, что если нейтрино обладает массой, то существует смешивание между различными типами нейтрино. В то время считалось, что существует один тип нейтрино и о нескольких типах никто всерьез не говорил. Исходно считалось, что нейтрино – безмассовая частица, но это мнение не было ничем подтверждено.

*Примечание:* физики-теоретики всегда рассматривают любой вариант, который не исключается действующим экспериментом. В этом заключается основной механизм получения новых знаний.

### 7.1. Решение проблем солнечного и атмосферного нейтрино

С точки зрения современной науки – физики элементарных частиц – необходимо различать два типа нейтрино:

- нейтрино, взаимодействующие с заряженными лептонами:
  - электронное нейтрино;
  - мюонное нейтрино;
  - тау-нейтрино.

Зачастую данный тип нейтрино называют *нейтрино состояния взаимодействия*. Эти нейтрино связаны с другими частицами посредством слабых взаимодействий.

Флейворные типы нейтрино не имеют массы, так как каждое флейворное нейтрино – это сумма суперпозиций нейтрино с фиксированными массами:

$$|v_f\rangle = \sum_i U_{fi}|v_i\rangle$$

- Нейтрино собственного массового состояния. Для описания процесса распространения нейтрино необходимо вводить понятия о массе. Для этого вводятся  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  – каждый со своей массой:  $m_1, m_2, m_3$ .

В этом заключается гениальное предсказание Понтекорво. Он сказал, что существует необходимость разделения описания подходов к процессам рождения и уничтожения нейтрино, которые описываются в терминах состояния слабых взаимодействий, и к процессам распространения нейтрино.

Решение проблемы солнечных и атмосферных нейтрино заключается в том, что родившись в недрах Солнца как электронное нейтрино, что означает наличие электрона, это нейтрино полетело и по пути начальная смесь изменялась и к детектору прилетела другая смесь с другими массами. Экспериментально это выглядит так, что часть электронных нейтрино в детекторе ведет себя как мюонные нейтрино.

Все эти факты позволяют объяснить два главных парадокса физики нейтрино:

1) Вопрос: куда «улетучиваются»  $2/3$  электронных нейтрино

Ответ:  $2/3$  электронных нейтрино в детекторе ведут себя как мюонные и тау-нейтрино. А детектор Дэвиса чувствителен только к электронной компоненте.

2) Аналогичная ситуация и с атмосферными нейтрино: часть мюонных нейтрино переходят в тау-нейтрино.

На данный момент нет возможности обобщить все подходы из-за отсутствия достаточного количества экспериментальных фактов (как из физики нейтрино, так и из областей теории взаимодействия частиц). Если в будущем появятся более точные измерения по смешиваниям, по ограничениям на массу нейтрино, то это может пролить свет на то, каким образом концепцию смешивания и осцилляций нейтрино можно будет гармонично включить в Стандартную модель не добавляя при этом дополнительных постулатов.

В 1969 году В. Грибов и б. Понтекорво рассмотрели как выражаются электронное и мюонное нейтрино:

$$\begin{aligned}v_e &= v_1 \cos \theta + v_2 \sin \theta \\v_\mu &= -v_1 \sin \theta + v_2 \cos \theta\end{aligned}$$

В результате смешивания происходит эффект выравнивания количества разных нейтрино в потоке. Это результат осреднения формулы для осцилляций нейтрино во времени.

В результате элементарных расчетов в рамках квантовой механики можно рассчитать вероятность обнаружения другого типа нейтрино в потоке, изначально состоящем из электронных нейтрино:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{x \Delta m^2}{4E}$$

где  $\sin^2 2\theta$  — амплитуда осцилляций, фиксированная величина,  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$  — разность квадратов масс, величину  $x$  — можно изменять. В разных точках (в зависимости от расстояния), где находится детектор, будет разное количество электронных и мюонных нейтрино.

Отметим, что амплитуда осцилляций определяется двойным углом смешивания, а сама структура определяется как  $\sin^2 \frac{x \Delta m^2}{4E}$  (рис. 6.7).

## 7.2. Основные достижения и открытия Бруно Максовича Понтекорво

22 августа 2013 года исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося отечественного ученого итальянского происхождения Бруно Максимовича



Понтекорво, который внес фундаментальный вклад в физику элементарных частиц и физику нейтрино.

### Ломоносовские конференции

С 1992 года в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова организуются Ломоносовские конференции. Они проводят один раз в два года в нечетные года.

По результатам конференции издаются печатные книги – сборники статей (рис. 7.1).

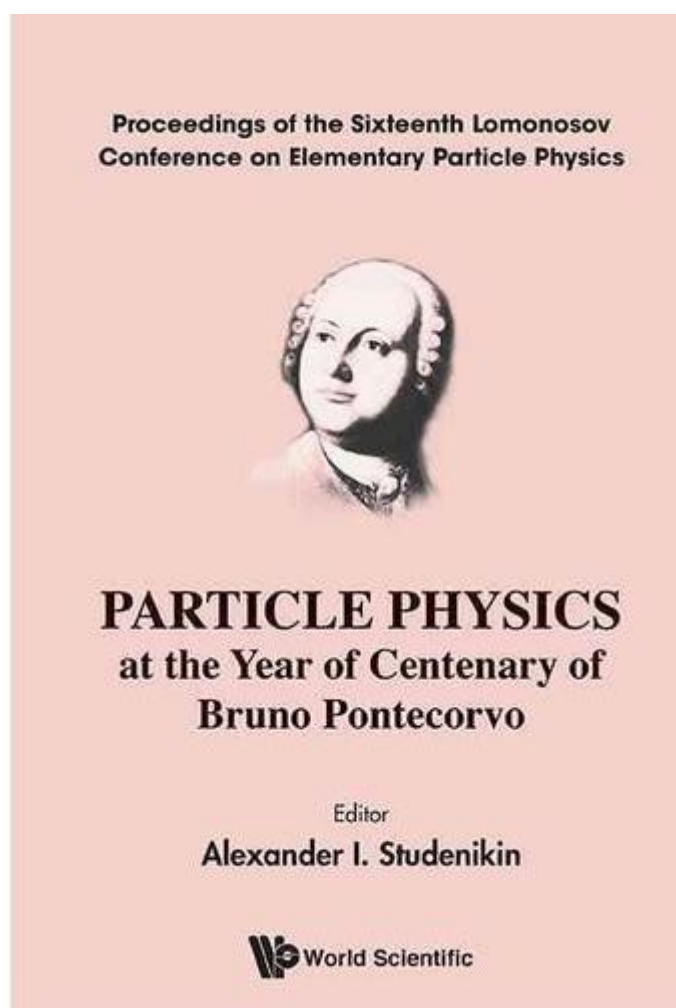


Рис. 7.1. Обложка сборника статей на Ломоносовских конференциях

Ссылка на сайт:

[www.lomcon.ru](http://www.lomcon.ru)

### «Maksimovic. The Story of Bruno Pontecorvo»

А.И. Студеникин рекомендует к просмотру научно-публицистический фильм «Maksimovic. The Story of Bruno Pontecorvo»

Идея и сценарий:

- Giuseppe Mussardo

- Historical research:
- Luisa Bonolis
- Directed by:
- Diego Centeno

Фильм важен не только с точки зрения нейтрино, но и с точки зрения ментальности коллег из Европы. Фильм иллюстрирует доброжелательное отношение к России. Кроме того, в фильме проведен краткий срез социально-экономического и политического развития Европы с начала 20 века до настоящего времени. Последние кадры фильма связаны с празднованием 100-летия Бруно Понтекорво.

Фильм содержит фотографии Бруно Понтекорво, документальные кадры, а также небольшие видео сюжеты, где Б. Понтекорво объясняет фундаментальные свойства нейтрино.

### Проблемы физики нейтрино:

1 проблема: масса нейтрино:  $m_\nu = ?$  Известно:  $m_\nu \neq 0$

### 2 проблема

Для электрона существует античастица – позитрон:  $e^- \rightarrow \bar{e} \equiv e^+$

Электрон описывается волновой функцией  $\Psi(x)$ . Позитрон описывается волновой функцией  $\bar{\Psi}(x)$ .

Заряд  $q_{e^-} \neq 0$  и  $q_{e^-} < 0$ . Заряд  $q_{e^+} \neq 0$  и  $q_{e^+} > 0$ . Тогда:

$$q_{e^-} \neq q_{e^+}$$

В аналогичном эксперименте невозможно отличить нейтрино и антинейтрино. В связи с этим возникает вопрос: волновая функция нейтрино и волновая функция антинейтрино равны?

$$\Psi_\nu = \Psi_{\bar{\nu}} \text{ или } \Psi_\nu \neq \Psi_{\bar{\nu}} ?$$

С точки зрения современного состояния ученые не могут ответить на вопрос: нейтрино тождественно своей античастице или нет. Варианты:

А)  $\nu \neq \bar{\nu}$  – дираковское нейтрино

В)  $\nu = \bar{\nu}$  – майорановское нейтрино

Разница: если нейтрино – майорановское, то прямой  $\beta$ -распад:

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

обратный  $\beta$ -распад:

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

Если нейтрино – дираковского типа, то такой процесс обратного  $\beta$ -распада – запрещен, так как с нейтроном взаимодействует только электронное нейтрино. Антинейтрино не взаимодействует с электроном.

Экспериментально это может проявиться следующим образом: в недрах звезды рождаются нейтрино и антинейтрино. Предположим, нейтрино по природе является дираковской частицей с высокой плотностью. Тогда процесс обратного  $\beta$ -распада будет существенно затруднять вылет нейтрино на поверхность. При этом вылетать будет антинейтрино. Если нейтрино майорановского типа, то и нейтрино, и антинейтрино будет задерживаться нейтронами.

Еще один пример реального процесса: двойной безнейтринный  $\beta$ -распад, который происходит в случае, если нейтрино является майорановской частицей. В настоящее время такой процесс пытаются найти экспериментально.

3 проблема – электромагнитные свойства нейтрино

Если у нейтрино ненулевая масса, тогда у него есть магнитный момент.

Магнитный момент – характеристика, которая обуславливает взаимодействие с магнитным полем.

Т.е. есть энергия взаимодействия с магнитным полем. Энергия взаимодействия пропорциональна произведению магнитного момента на напряженность поля:

$$W \sim \mu B$$

В Стандартной модели масса нейтрино равна 0 – это значит, что магнитный момент нейтрино в Стандартной модели равняется 0.

Обнаружение магнитного момента будет являться доказательством ненулевой массы нейтрино и подтверждением физики за пределами Стандартной модели.

Магнитный момент майорановского нейтрино равен 0:

$$\mu_v^M = 0$$

Магнитный момент дираковского нейтрино не равен 0:

$$\mu_v^D \neq 0$$

Кроме того, в настоящее время рассматривается возможность, что нейтрино имеет заряд:

$$q_v - \text{миллизаряд}$$

При этом:

$$\frac{q_{p^+}}{q_{e^-}} \sim 10^{-21} e - \text{точность}$$

С экспериментальной точки зрения допустимо, что заряд нейтрино имеет порядок  $10^{-21} e$ .

### Основные достижения и открытия Б. Понтекорво

В 1946 г. Б.М. Понтекорво внес фундаментальный вклад в физику нейтрино:

- показал, что вопрос об обнаружении нейтрино в эксперименте следует ставить в практической плоскости
- предложил для детектирования нейтрино использовать процесс обратного бета-распада:

$$\nu + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z + 1);$$

*Примечание:* прямой  $\beta$ -распад – это переход нейтрона в протон и электрон:

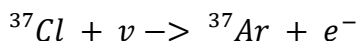
$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

Любое превращение элементарных частиц имеет «родственников» (принцип кросс симметрии). При этом, частицу нужно будет заменить на античастицу.

Обратный  $\beta$ -распад:

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

- предложил в качестве источников нейтрино Солнце и реактор;
- среди возможных мишеней предложил  $^{37}\text{Cl}$ :



(радиохимический хлор-аргоновый метод детектирования нейтрино)

Все эти открытия ознаменовались нобелевскими премиями:

1. Регистрация (анти)нейтрино от реактора – доказательство существования нейтрино – Ф. Райнес и К. Коуэн (1956 г.).

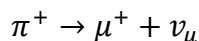
Нобелевская премия получена в 1995 г.

2. Регистрация нейтрино от Солнца – поток солнечных нейтрино на Земле в 3 раза меньше теоретических предсказаний – Р. Дэвис (1970 г.).

Нобелевская премия была получена в 2002 г.

*Примечание:* впервые на подавление потока солнечных нейтрино было указано Б. Понтекорво в 1967 г.

3. Обнаружение нейтрино 2-го типа:



Авторы: Л. Ледерман, М. Шварц, Дж. Стейнбергер

Нобелевская премия была получена в 1988 г.

Идея и схема проведения эксперимента с использованием потока нейтрино на ускорителе, позволившая доказать, что:

$$\nu_{\mu} \neq \nu_e$$

принадлежит Бруно Понтекорво (1959 г.).

Мировую славу Понтекорво принесли его фундаментальные исследования и результаты по физике нейтрино – всеобщий интерес:

*«Нет, не поймаешь нейтрино за бороду  
И не посадишь в пробирку.  
Но было бы здорово, чтоб Понтекорво  
Взял его крепко за шкуру!»  
Владимир Высоцкий,  
«Марш студентов-физиков»*

## Лекция 8. Основные этапы жизни Бруно Понтекорво

Выдающийся вклад Бруно Понтекорво физику нейтрино - «Мистер нейтрино»

Бруно Понтекорво родился в Пизе в 1913 году, в семье богатых промышленников. Его родители управляли сетью текстильных фабрик. У него было 5 братьев и 3 сестры, из которых некоторые стали широко известны публике:

- Гуидо Понтекорво – старший брат Бруно Понтекорво, британский генетик (процесс генетической рекомбинации),
- Джилло Понтекорво – итальянский кинорежиссёр («Битва за Алжир», победитель Венецианского фестиваля, 1966)

*Интересный факт:* в школе Бруно самым важным делом считал теннис. В Советском Союзе Бруно Понтекорво был чемпионом Дубны по теннису.

В детстве Бруно не имел особых успехов в школе. Его отец Массимо Понтекорво говорил о нём:

*«... наш младший не обладает  
особыми талантами,  
но очень  
отзывчив и добр...»*

После школы Понтекорво поступил на Инженерный факультет университета Пизы, а затем перешел на третий курс Факультета физики и математики Римского университета, где с 1931 по 1936 год под руководством лауреата Нобелевской премии итальянского физика Энрико Ферми исследовал свойства медленных нейтронов и взаимодействия нейтронов с ядрами. Тогда это было центром мирового исследования физики элементарных частиц.

Имя Бруно Понтекорво постоянно связано с Нобелевскими премиями, но сам, к сожалению, премии не получил.

В 1936 – 1940 гг. в ходе Второй Мировой войны из-за претеснений Бруно Понтекорво переехал в Париж, где впоследствии работал в Институте радия под руководством нобелевского лауреата Ф. Жолио-Кюри. Он выполнил большой цикл работ по исследованию ядерной изомерии, предсказал существование изомерных состояний бета-стабильных атомных ядер и экспериментально нашел первый такой изотоп – кадмий.

Эти исследования привели Б. Понтекорво к открытию явления ядерной фосфоресценции (возбуждения метастабильных состояний В-стабильных изотопов  $\gamma$ -квантами), за которое он получил премию Кюри-Карнеги.

В период 1940 - 1942 гг. Б. Понтекорво работал в США и занимался геофизическими методами зондирования нефтяных скважин.

Большой опыт работы с медленными нейтронами помог ему предложить и разработать новый геофизический метод разведки нефти – метод нейтронного каротажа, суть которого состоит в измерении наведенной нейтронами радиоактивности пород, в которых пробурена скважина. Такая радиоактивность сильно зависит от присутствия водородосодержащих веществ в породах, и по ее величине можно судить

о наличии нефти. Этот метод широко применяется в настоящее время, является исторически первым практическим использованием нейтронов.

В период 1943 – 1948 гг. Б. Понтекорво работал в Канаде и участвовал в разработке и запуске самого мощного в то время исследовательского реактора на тяжелой воде в Чок-Ривере начал исследования по физике элементарных частиц. Он выполнил пионерские эксперименты по изучению фундаментальных свойств мюона. Опираясь на замеченную им глубокую аналогию между мюоном и электронном впервые высказал гипотезу о существовании единого электрон-мюонного  $\mu$ - $e$  универсального слабого взаимодействия

Словосочетание «слабые взаимодействия» принадлежит именно перу Понтекорво (1947 г.).

С 1950 года Бруно Понтекорво жил в Дубне и работал в Объединенном институте ядерных исследований. В институте сохранился кабинет и табличка с именем Бруно Максимовича Понтекорво. Кроме того, в декабре 2013 года Европейское физическое сообщество объявило рабочий кабинет Б. Понтекорво историческим местом.

С 1966 по 1986 год возглавлял кафедру физики элементарных частиц физического факультета МГУ и был членом Ученого совета физического факультета МГУ.

Бруно Понтекорво умер в 1993 году.



## Лекция 9. Явления смешивания и осцилляций нейтрино

### 9.1. Явления смешивания и осцилляций нейтрино

Уникальными и важными явлениями в физике нейтрино являются явления смешивания и осцилляций нейтрино. До настоящего момента явления смешивания и осцилляций рассматривались для случаев, когда мы имеем два типа нейтрино: электронное и мюонное. В природе же существует три типа нейтрино: электронное, мюонное и тау-нейтрино, которым соответствуют нейтрино  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  с массами. Второй тип нейтрино был обнаружен в 1962-м году, третий тип (тау нейтрино) – в 2000 году.

Каждое флейворное нейтрино обладает суперпозицией массовых нейтрино.

PMNS – матрица смешивание нейтрино Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Б. Понтекорво и Грибов сделали вывод, что флейворный состав в потоке нейтрино меняется по гармоническому закону:

$$c = \cos\theta$$

$$s = \sin\theta$$

$\theta_{23} \approx (45 \pm 9)^\circ$  – смешивание атмосферных нейтрино

$\theta_{13} \approx (8.9 \pm 1.4)^\circ$  – смешивание реакторных нейтрино

$\theta_{12} \approx (34 \pm 3)^\circ$  – смешивание солнечных нейтрино.

Оказалось, что матрицу можно использовать не целиком, а например взять матрицу, описывающую смешивание первого и второго нейтрино, и описать модификацию электронного потока нейтрино, который рождается на Солнце, приходит на землю, где значительная часть – это уже мюонные нейтрино.

Смешивание между вторым и третьим типами нейтрино – переход из мюонного нейтрино в тау-нейтрино характеризуется первой частью матрицы. С ее помощью можно изучать решение проблемы атмосферных нейтрино.

Однако, в настоящее время точность измерений такова, что лучше использовать всю матрицу целиком для полноты результата.

Каждое флейворное нейтрино (электронное, мюонное, тау-нейтрино) являются смесью  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ . И наоборот, каждое массовое нейтрино  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  являются смесью электронного, мюонного и тау-нейтрино с разным весом. Ниже (рис. 9.1) представлено графическое изображение, иллюстрирующее пропорции смешивания нейтрино 3 типа. Например, при угле смешивания в 40 градусов нейтрино 3-го типа состоит в основном из тау-нейтрино, мюонного нейтрино и в меньшей степени – из электронного нейтрино. При увеличении угла преобладать в составе нейтрино 3-го типа начнет мюонное нейтрино, электронных нейтрино в составе будет по-прежнему мало.

Таким образом, состав смеси тесно связан с углом смешивания.

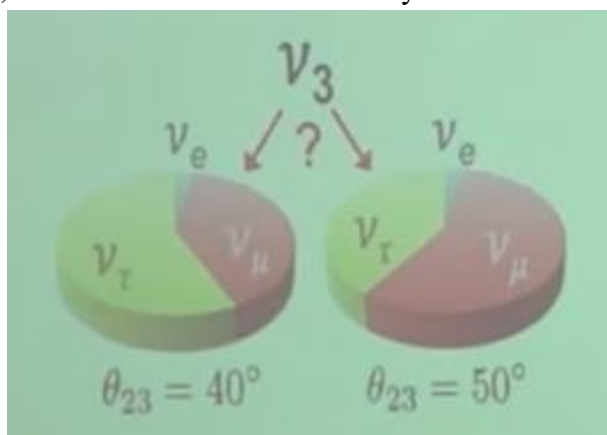


Рис. 9.1. Смешивание нейтрино

Вероятность обнаружить в детекторе электронное нейтрино  $\nu_e$ , если исходный пучок состоял из  $\nu_\mu$ :

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}(t > 0) = |\langle \nu_e | t > 0 \rangle|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{4E}\right)$$

Это зависит от элементов матрицы смешивания и разности квадратов масс массовых состояний нейтрино:

$$\Delta m_{kj}^2 = m_k^2 - m_j^2$$

Осцилляции нейтрино – изменение типа (флейвора) нейтрино:

$$\begin{array}{cccc} \nu_e \rightarrow \nu_\mu & \nu_e \rightarrow \nu_\tau & \nu_\mu \rightarrow \nu_e & \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau \\ \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau & \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau \end{array}$$

Нейтрино является суперпозицией массовых нейтрино:

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= U_{e1}|\nu_1\rangle + U_{e2}|\nu_2\rangle + U_{e3}|\nu_3\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= U_{\mu1}|\nu_1\rangle + U_{\mu2}|\nu_2\rangle + U_{\mu3}|\nu_3\rangle \\ |\nu_\tau\rangle &= U_{\tau1}|\nu_1\rangle + U_{\tau2}|\nu_2\rangle + U_{\tau3}|\nu_3\rangle \end{aligned}$$

Матрица смешивания имеет 9 элементов.

Пусть в начале было  $\nu_\mu$  (рис 9.2):

$$|\nu(t=0)\rangle = |\nu_\mu\rangle = U_{\mu1}|\nu_1\rangle + U_{\mu2}|\nu_2\rangle + U_{\mu3}|\nu_3\rangle$$

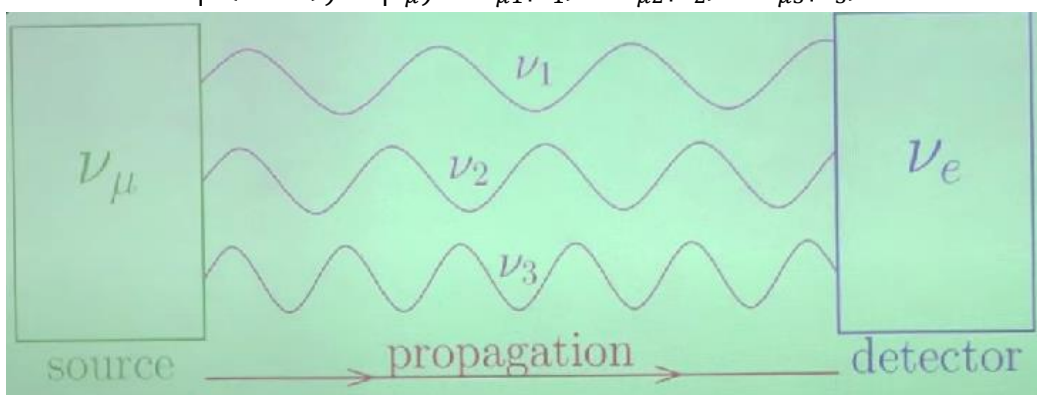


Рис. 9.2. Процесс смешивания

Период колебания волн соответствует периоду колебаний масс нейтрино.

В детекторе можно обнаружить другие типы нейтрино из-за измененности смешивания, так в детекторе стало  $\nu \neq \nu_\mu$ :

$$|\nu(t > 0)\rangle = U_{\mu 1} e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + U_{\mu 2} e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle + U_{\mu 3} e^{-iE_3 t} |\nu_3\rangle \neq |\nu_\mu\rangle$$

$$E_k^2 = p^2 + m_k^2$$

Это связано с тем, что мы считаем, что у нейтрино одинаковая энергия и разная масса.

Ниже (рис. 9.3) приведен фрагмент доклада С. Джиунти, который в 2015 году подготовил материалы по текущим экспериментам по физике нейтрино.

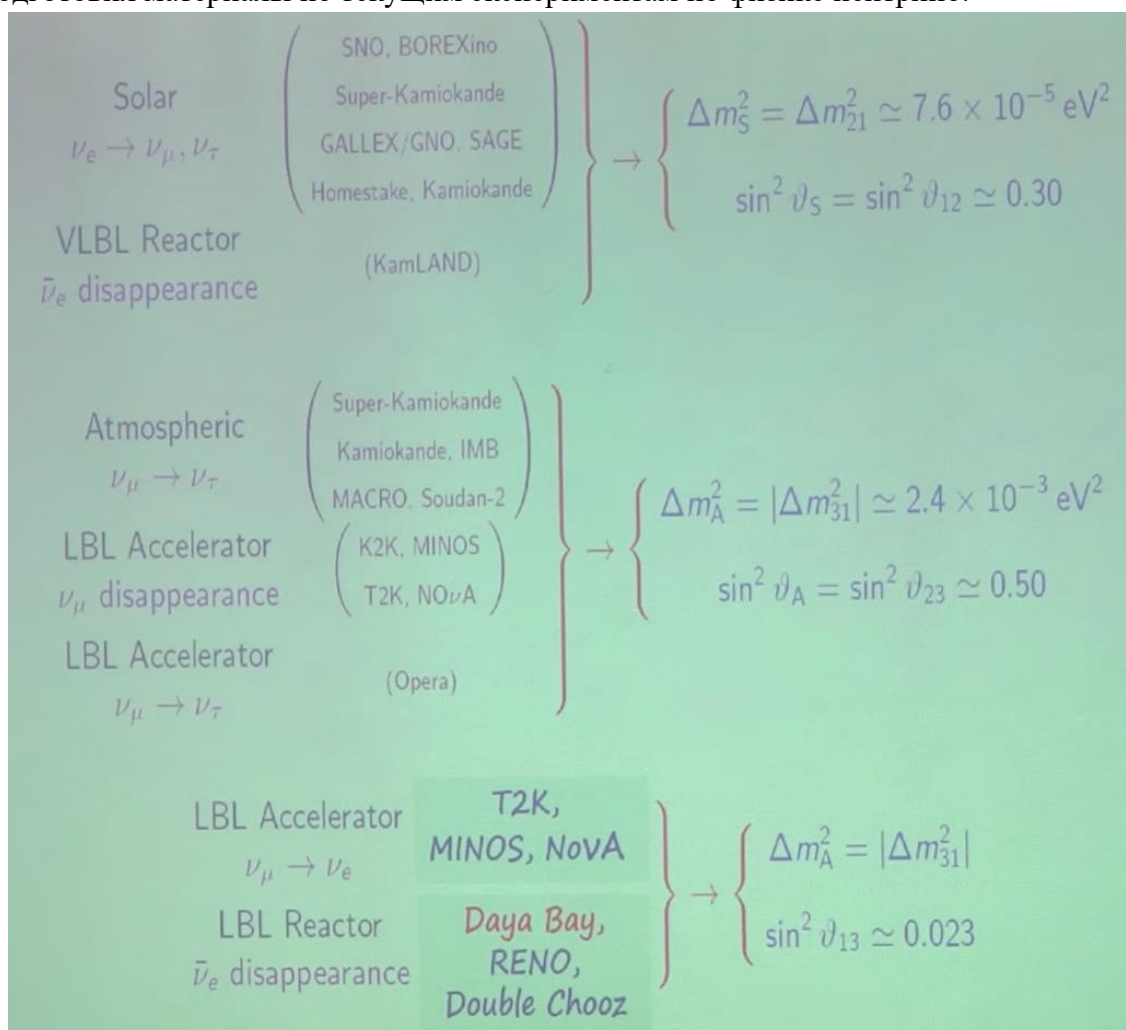


Рис. 9.3. Смешивание осцилляций и нейтрино. Обзорный доклад С. Джиунти, август 2015 г.

Факт экспериментального доказательства существования осцилляций, как следствие, имеет утверждение и доказательство того, что у трех нейтрино ненулевые массы и кроме того, не существует двух нейтрино с одинаковыми массами.

Эксперименты:

- 1) Эксперимент Галлекс (GALLEX) (Италия),
- 2) Эксперимент SAGE (советско-американский галиевый эксперимент), посвященный доказательствам существования смешивания и осцилляций нейтрино.

## 9.2. Краткое визуальное введение в экспериментальную часть изучения физики нейтрино

### Эксперимент ICE CUBE

На южном полюсе  $1 \text{ км}^3$  используется как детектор – тело, в котором фиксируется факт прилета нейтрино, используется лед. На глубине от 1.5 км до 2.5 км выбрали место с наиболее чистым льдом. Далее происходит просверливание дырок, куда вставляются фотоумножители на тросах (рис. 9.4, 9.5).

Регистрация нейтрино производится следующим образом: прилетает нейтрино, ударяется в заряженные частицы, которые начинают двигаться в прозрачном теле льда. Там возникает свет (Черенковское излучение). Этот свет улавливается фотоумножителями.

Детектор нацелен на детектирование нейтрино сверх высоких энергий – те нейтрино, которые прилетают из неизвестных источников, расположенных далеко от нас во Вселенной. Энергии могут достигать порядка  $10^{15}$  эВ.

В 2012 – 2013 гг. впервые обнаружены нейтрино сверхвысоких энергий.

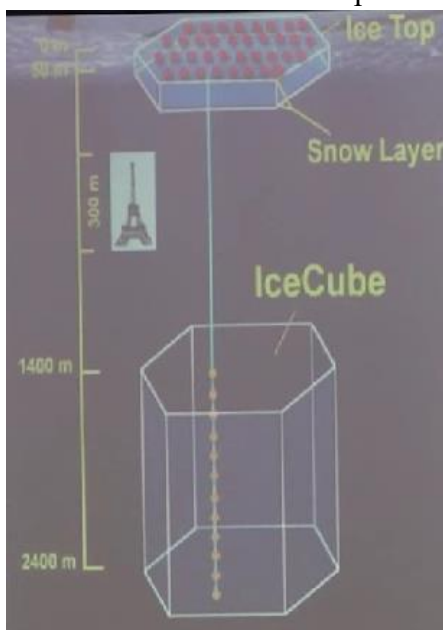


Рис. 9.4. Модель ICE CUBE

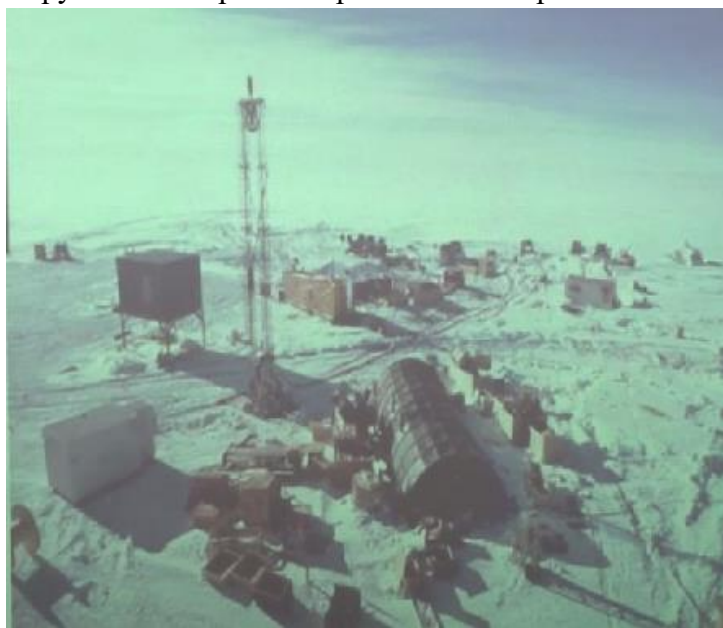


Рис. 9.5. База эксперимента ICE CUBE на Южном полюсе

В России уже много лет работает аналогичная система, улавливающая Черенковский свет. Данный эксперимент проводится в водах Байкала на базе нейтринной обсерватории. В ближайшие 10 лет Байкальский эксперимент достигнет



того же объема. Эксперименты проводятся в сезон с февраля по март. Около года назад здесь было обнаружено аналогичное событие.

### Нейтринные подземные лаборатории

Подземная лаборатория Гран-Сассо в Италии расположена внутри горы на глубине примерно 3 км.

В 1970-х годах сделали два автомобильных тоннеля длиной около 11 км. Один известный физик предложил одновременно с двумя автомобильными тоннелями вырыть пещеры с залами, в которых будут находиться установки, которые улавливали бы поток нейтрино, идущий от ЦЕРНа.



*Рис. 9.6. Подземная лаборатория Гран-Сассо*

На рисунке 9.7 показано схематическое моделирование пролета нейтрино от ЦЕРНа до лаборатории Гран-Соссе, которые расположены на расстоянии в 730 км. Максимально поток нейтрино углубляется на 11 км. Скорость потока составляет примерно 2.5 мс.

На рисунке 9.8 изображен источник нейтрино в ЦЕРНе: система ускорителей.

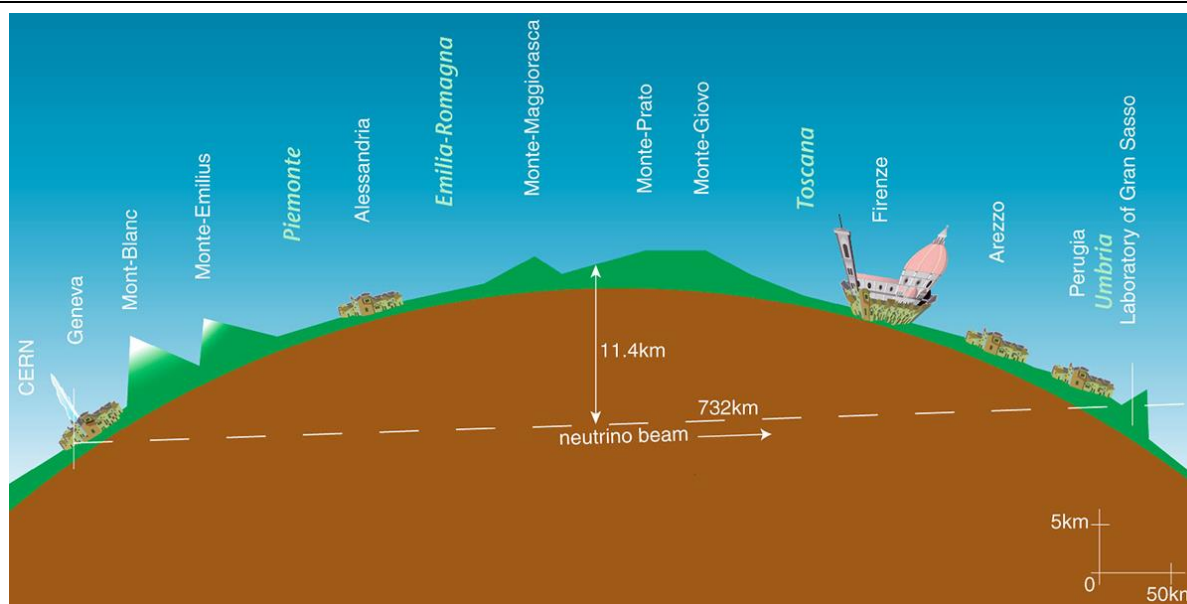


Рис. 9.7. Схема распространения нейтрино от ЦЕРНа до лаборатории Гран-Соссе

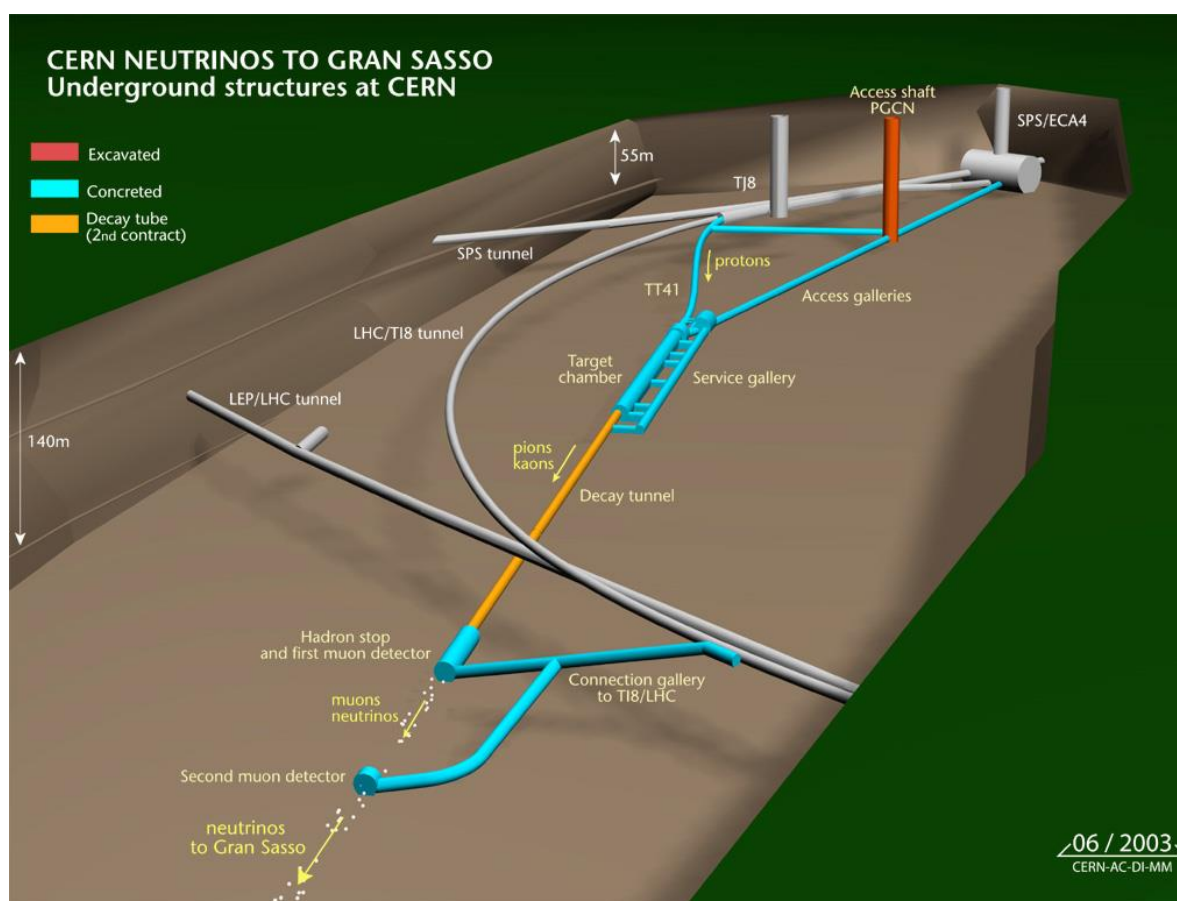


Рис. 9.8. Источник нейтрино в ЦЕРНе

Название: эксперимент ОПЕРА (OPERA)

Руководитель эксперимента: Антонио Эредитато.

Цель: обнаружение тау-нейтрино  $\nu_\tau$  в потоке, которые идет из ЦЕРНа. Из ЦЕРНа вылетает мюонное нейтрино и после пролета в 730 км необходимо обнаружить другой тип флейворного нейтрино.

Результаты: было подтверждено превращение мюонного нейтрино в тау-нейтрино.

Этот эксперимент подтвердил правильность предположение о существовании смешивания между различными типами нейтрино, что приводит к осцилляциям. Результат – появление тау нейтрино в исходном потоке, который 100% был мюонный.

На рисунках 9.9, 9.10 показана реальная установка. Огромный блок состоит из ячеек, подобно библиотеке, но вместо книг там расположены небольшие блоки размером с кирпич. Каждый блок может фиксировать возникновение тау-нейтрино. Здесь же расположены специальные датчики, которые «оповещают» о случившихся событиях. Вдоль всех блоков ездит манипулятор, который по команде компьютера подъезжает к нужному блоку и вытаскивает его. Далее этот блок попадает к физикам.



Рис. 9.9. Установка в Гран-Соссе, улавливающая тау-нейтрино

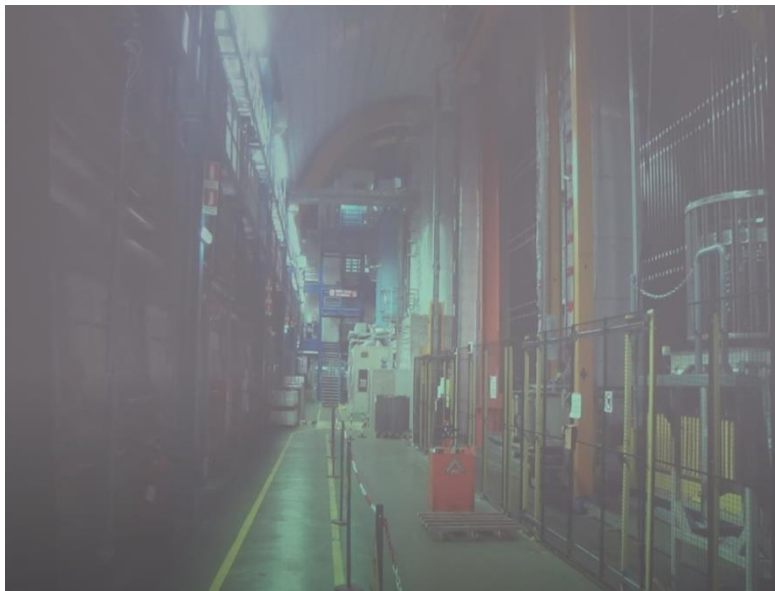


Рис. 9.10. Установка в Гран-Соссе, улавливающая тау-нейтрино

На рисунке 9.11 показано схематическое изображение цепочки превращения мюонного нейтрино в тау-нейтрино.

Случай один: исходно в ЦЕРНе только мюонное нейтрино. В отсутствие осцилляций в детекторе будут производиться мюоны. При наличии осцилляций: по пути мюонное нейтрино превратится в тау-нейтрино и возникнет характерное событие.



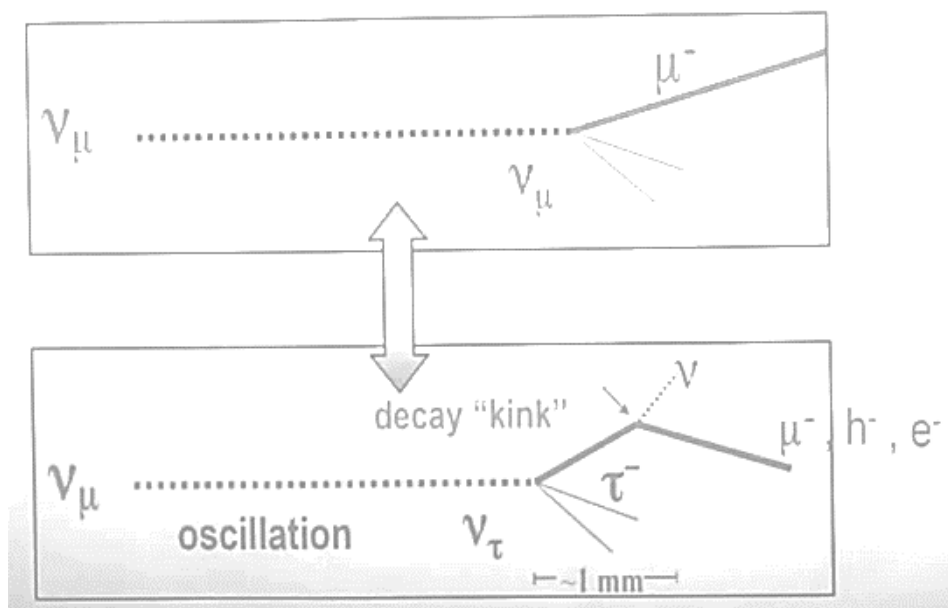


Рис. 9.11. Схема превращения мюонного нейтрино в тау-нейтрино

Другие подземные лаборатории:

1) Лаборатория Sudbury (Канада)

В лаборатории Sudbury было окончательно подтверждено существование осцилляций и смешивания потока нейтрино от Солнца.

2) Лаборатория Pyhasalmi Mine (Финляндия)

Премии за фундаментальный вклад в физику нейтрино – «Премия за прорыв» – «Breakthrough Prize» (Фонд Бриа Мильнера) – «за фундаментальные открытия и исследования в области нейтринных осцилляций, выходящие за пределы Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц»:

1) Юифанг Ванг (Yifang Wang), К.-В. Лук (K.-B. Luk)

Реакторный нейтринный эксперимент Дайя Бэй (Китай) Daya Bay Collaboration

2) Ацуро Сузуки (Atsuto Suzuki)

Реакторный нейтринный эксперимент КамЛАНД (Япония) KamLAND Collaboration.

3) К. Нишикава (K.Nishikawa)

Ускорительный нейтринный эксперимент K2K / T2K (Япония) K2K / T2K Coll.

4) А. Макдональд (Нобелевская премия 2015)

Нейтринная обсерватория в Садбери (Канада) SNO Coll.

5) Т. Каджита (Нобелевская премия 2015), Ичиро Сузуки (Ichiro Suzuki)

Нейтринный эксперимент Супер-Камиоканде Super Kamiokande Coll.

## Лекция 10. Эксперимент JUNO

Эксперимент ДЖУНО – один из трех крупнейших и подготавливаемых в настоящее время экспериментов. С 2015 года Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова является участником этого проекта.

В результате русского и китайского сотрудничества (рук. - А.И.Студеникин и З.Шинг) в исследовании осцилляций и электромагнитных свойств массивных нейтрино русским физикам поступило приглашение войти в члены нейтринного эксперимента ДЖУНО (JUNO Collaboration, China).

Задачи:

- участие представителей МГУ в подготовке научной программы исследований коллаборации JUNO;
- участие в работе на данной установке и обработке получаемой информации о свойствах массивных нейтрино;
- координация усилий и сотрудничества с ОИЯИ и ИЯИ РАН.

ДЖУНО – подземная нейтринная обсерватория в Джиангмене, провинция Гуандун, Китай (JUNO Jiangmen Underground Neutrino Observatory) (рис. 10.1, 10.2).

ДЖУНО – крупнейший международный нейтринный проект, который реализуется Институт физики высоких энергий КАН.

Китайское правительство выделило на реализацию данного проекта грант в размере 300 млн евро.

Проект международного экспериментального JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) активно развивается в настоящее время в Китае. Одной из основных целей эксперимента является определение иерархии масс нейтрино.

В коллаборацию JUNO входят более 600 ученых из 77 институтов.

*Споукперсон эксперимента* – проф. Ю и ванг Ванг (Yifang Wang), директор ИФВЭ КАН.

Начало сбора данных состоялось в 2021 году.

Период работы должен составить не менее 20 лет (до 2040 года).

Нейтринный детектор JUNO – 20 килотонн жидкого сцинтиллятора – самый большой в мире, обеспечит рекордную точность определения нейтронных параметров. Нейтрино из различных источников (из промышленных реакторов, Солнца и др.) прилетают в детектор, взаимодействуют с заряженными частицами, которые ускоряются и тогда в жидком детекторе излучается Черенковский свет. Этот свет улавливается 50 000 фотоумножителей. Информация обрабатывается через компьютер.

В настоящее время планируется 7 новых экспериментов (Япония, Европа, США, Индия и Корея) для определения иерархии масс нейтрино.

Коллаборация JUNO, обладая громадным опытом проведения нейтринных реакторных экспериментов и имея в своём распоряжении лучшие технологии жидких сцинтилляционных детекторов, имеет все шансы первой решить проблему иерархии масс нейтрино.

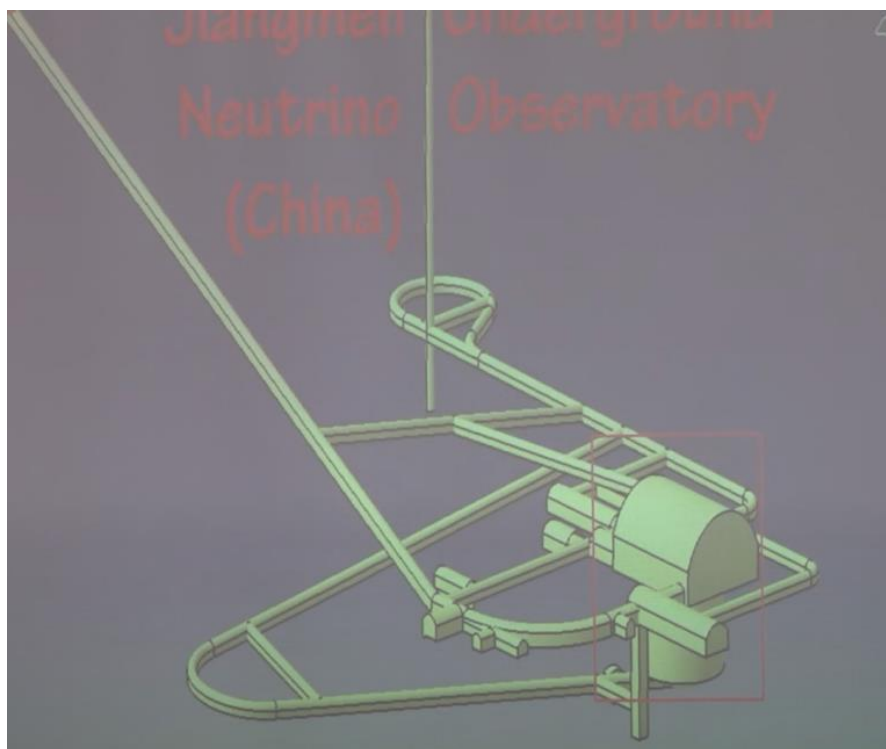


Рис. 10.1. Подземная нейтринная обсерватория ДЖУНО

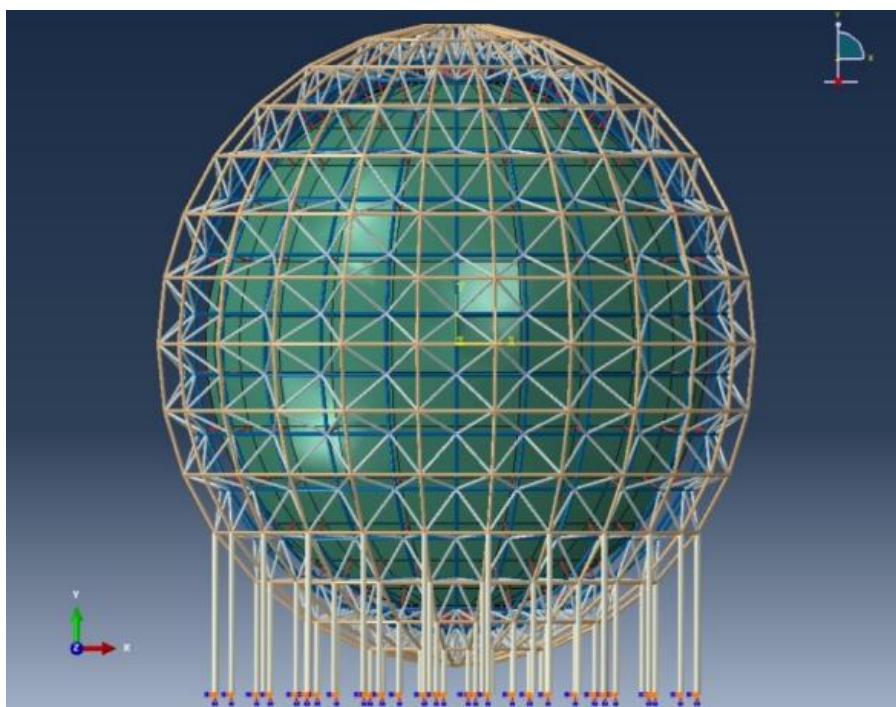


Рис. 10.2. Жидкостинцилляционный нейтринный детектор ДЖУНО (20 килотонн,  
 $R = 40\text{ m}$ , 700 m под землёй)

Цель эксперимента ДЖУНО: с максимальной точностью измерить основные характеристики смешивания и осцилляций нейтрино (таблица 10.1).

Таблица 10.1. Характеристики смешивания и осцилляций нейтрино

	Современная точность измерения	Ожидаемая точность измерения в проекте JUNO goal
$\sin^2 2\theta_{12}$	6 %	0.7 %
$\Delta m_{12}^2$	3 %	0.6 %
$ \Delta m_{32}^2 $	5 %	0.5 %
МН	N / A	3-4 $\sigma$
$\sin^2 2\theta_{13}$	3 %	15 %

В ряде случаев ожидаемая точность превышает современную в 10 раз.

### Заключение

Вопросы оказания поддержки российского участия в проекте ДЖУНО прорабатываются в Минобрнауки РФ

Участие в эксперименте ДЖУНО может является одним из важных факторов, подтверждающих лидирующий статус ученых МГУ в проведении исследований фундаментальных свойств материи.



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ