

АНАТОЛИЮ ИВАНОВИЧУ НАУМОВУ ПОСВЯЩАЕТСЯ



Марат Хабибуллин

Елена Наумова

Москва, 2008 г.

Хронология основных событий

- 1914 — непрерывность энергетического спектра бета-электронов: Чедвик
- 1924 — сомнения в законе сохранения энергии: Бор
- 1928 — уравнение Дирака
- 1930 — гипотеза Паули
- 1933 — имя частицы – Нейтрино: Ферми
- 1936 — два типа фермионов: Майоран
- 1956 — **открытие нейтрино (использовался ядерный реактор): Райнес и Коуэн**
- 1957 — теория осцилляций нейтрино: Понтекорво
- 1958 — нейтрино имеют левую спиральность: Гольдхабер
- 1962 — **мюонное нейтрино: Ледерман, Стейнбергер, Шварц**
- 1968 — **дефицит солнечных нейтрино: Дэвис**
- 1973 — нейтральные токи
- 1975 — **тау-нейтрино: Перл**
- 1978 — резонансный характер осцилляций нейтрино в веществе: Михеев, Смирнов, Вольфенштейн
- 1987 — **регистрация нейтрино от взрыва сверхновой в Большом Магеллановом Облаке (Камиоканде – Кошиба , IMB, Баксан)**
- 1989 — доказательство существования только трех типов нейтрино
- 1998 — обнаружение осцилляций атмосферных нейтрино (СуперКамиоканде)

Нобелевские лауреаты по физике нейтрино

1988



Леон Ледерман
Leon M. Lederman

Fermi National Accelerator Laboratory
Batavia, IL, USA



Мелвин Шварц
Melvin Schwartz

Digital Pathways, Inc.
Mountain View, CA, USA



Джек Стейнбергер
Jack Steinberger

CERN
Geneva, Switzerland

За метод нейтринного пучка и демонстрацию дублетной структуры лептонов
через открытие мюонного нейтрино.

1995



Мартин Перл
Martin L. Perl

Stanford University
Stanford, CA, USA

За открытие тау-лептона



Фредерик Райнес
Frederick Reines

University of California
Irvine, CA, USA

За экспериментальное
обнаружение нейтрино

2002



Рэймонд Дэвис
Raymond Davis Jr.

University of Pennsylvania
Philadelphia, PA, USA



Масатоши Кошиба
Masatoshi Koshiba

University of Tokyo
Tokyo, Japan



Рикардо Жиаккони
Riccardo Giacconi

Associated Universities Inc.
Washington, DC, USA

За изыскания в области астрофизики, в частности за
обнаружение космических нейтрино

За изыскания в области
астрофизики, которые
привели к открытию
космических источников
рентгеновского излучения

Некоторые характерные величины
Стандартный сценарий изучения свойств
НЕЙТРИНО

Наше Солнце излучает $2 \cdot 10^{38}$ нейтрино в секунду,
а Земля получает более 40 миллиардов нейтрино в с на см^2 .
Этот колоссальный дождь остается незамеченным пятью чувствами homo sapiens.

Плотность нейтрино во Вселенной

Большой взрыв ~ 330 нейтрино в см^3	Жизнедеятельность звезд !~ 0.000006 нейтрино в см^3	Взрывы сверхновых ~ 0.0002 нейтрино в см^3
---	---	--

Энергии нейтрино
Для справки: $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Нейтрино от Большого взрыва	Нейтрино от Солнца	Нейтрино от ядерных реакторов	Нейтрино от современных ускорителей
самые многочисленные, но при этом с самой маленькой энергией 0.0004 эВ.	до 20 МэВ в зависимости от происхождения.	средняя энергия 4.0 МэВ (от 1 МэВ до 10 МэВ).	средняя энергия колеблется от 30 МэВ до 200 ГэВ (LHC).

Сечение взаимодействия с нуклонами:
равно 10^{-38} см^2 при 1 ГэВ и линейно растет с энергией.

Стандартный сценарий представляет собой результат коллективных усилий нескольких поколений физиков — теоретиков и экспериментаторов. Этот сценарий есть и база, и отправная точка для дальнейших исследований.

- Взаимодействия нейтрино и его место среди других элементарных частиц
- Решение вопроса о массивности нейтрино
- Смешивание нейтрино

Взаимодействия нейтрино описываются Стандартной моделью электрослабых взаимодействий (Глешоу, Салам, Вайнберг).

Нейтрино вошли в качестве существенной неотъемлемой части в Стандартную модель физики частиц (СМ).

Состав фундаментальных частиц приведен в таблице.

Кварки	u (up)	c (charm)	t (top)	g (глюон)	Калибровочные бозоны
	d (down)	s (strange)	b (beauty)	γ (фотон)	
Лептоны	ν _e (электронное нейтрино)	ν _μ (мюонное нейтрино)	ν _τ (тау нейтрино)	W [±] (слабый бозон)	
	e (электрон)	μ (мюон)	τ (тау)	Z ⁰ (слабый бозон)	

В СМ входят следующие фундаментальные частицы: три поколения частиц со спином $1/2$ двух типов — кварков и лептонов вместе со своими античастицами, а также частицы со спином 1 — переносчики трех типов взаимодействий (сильное, электромагнитное и слабое).

Исходные уравнения СМ инвариантны относительно преобразований группы симметрии $SU(2)_L \times U(1)$, которые представляют собой определенного рода «вращения» в фиктивном пространстве. Требование локальной инвариантности относительно этих вращений приводит к необходимости включить в теорию калибровочные бозоны со спином 1, которые выполняют роль переносчиков слабого и электромагнитного взаимодействий — заряженные слабые бозоны $W^\pm$ и нейтральный бозон Z^0 , а также нейтральный безмассовый фотон γ . Слабые и электромагнитные взаимодействия кварков описываются той же схемой, что и взаимодействия лептонов, но кварки обладают также сильным взаимодействием, переносчиком которого являются глюоны g, а соответствующая группа симметрии — так называемая цветовая группа $SU(3)_c$.

СМ включает еще одну, пока что экспериментально не обнаруженную частицу — **хиггсовский бозон**. Его роль в теории — придать массы лептонам и кваркам за счет механизма спонтанного нарушения симметрии.

Существует только три типа легких нейтрино (три аромата и три массовых состояния).

Три поколения лептонов и кварков иногда именуют тремя ароматами. Нейтрино второго поколения было открыто в 1962 г., в 1975 г. был открыт тау-лептон, так что у физиков не оставалось сомнений в том, что должно существовать и тау-нейтрино.

Любопытно, что для доказательства этого впервые в истории была привлечена космологическая модель эволюции Вселенной — модель Фридмана, в рамках которой можно очень точно проследить схему бариосинтеза в ранней Вселенной и вычислить процентный состав гелия в первичной материи в зависимости от числа ароматов нейтрино. Непосредственное «земное» доказательство того, что возможны только три типа легких (с массой меньше массы Z^0) нейтрино было получено в 1989 г.

Предполагается, что нейтрино массивны.

Массы нейтрино составляют величины порядка или меньше 1 эВ, т. е. эти массы много меньше масс остальных лептонов и кварков.

В теории частиц со спином $1/2$ было показано, что возможно существование двух типов массивных частиц — дираковских и майорановских. Отличие дираковского фермиона от майорановского в том, что у первого частица не совпадает с античастицей, а у второго они тождественны.

В рамках СМ нейтрино должно быть строго безмассовым (это связано с тем, что в СМ входит только нейтрино ν_L (левоспиральное нейтрино) и запрещено правоспиральное нейтрино).

Доказательство того, что нейтрино массивны, означает выход за рамки СМ.

Как писал один из старейших сотрудников CERN Гордон Фрейзер в своей книге «Антиматерия: зазеркальные миры», «Стандартная модель взаимодействия элементарных частиц стала одновременно и величайшим достижением физики второй половины XX века, и ее величайшим проклятием».

Дело в том, что все, либо требовали ее постоянного исправления. Так, например, в 1974 году нобелевский лауреат по физике Сэмюэл Тинг открыл новую элементарную частицу — так называемый «очарованный кварк», благодаря которому была переписана вся теория электрослабых взаимодействий. Зато вот в 1983 году на протон-антипротонном коллайдере SpS в CERN были найдены два новых типа бозонов — переносчиков слабого взаимодействия, все свойства которых были заранее предсказаны Стандартной моделью.

Проблема массы нейтрино крайне важна не только с фундаментальной точки зрения. В последние десятилетия физика элементарных частиц все больше пересекается с космологией. Разгадка тайны массы нейтрино, возможно, приведет к пониманию сущности темной материи, не участвующей ни в одном из известных взаимодействий, кроме гравитационного. Вопрос о том, будет ли Вселенная расширяться в дальнейшем, зависит от ее полной массы. И здесь многочисленные массивные нейтрино могут внести свой существенный вклад.

Нейтрино смешиваются.

Существуют два больших угла смешивания и один маленький (или даже нулевой). Структура смешивания лептонов существенно отличается от структуры смешивания кварков.

Квантовая механика утверждает, что состояния трех нейтрино с разными массами не совпадают с состояниями нейтрино с разными ароматами. Аналогичное утверждение верно и для кварков. Следовательно, в силу принципа суперпозиции, состояния с разными ароматами могут быть представлены в виде суперпозиции состояний с заданными массами.

Результат смешивания нейтрино с разными массами может быть представлен в виде матрицы

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix},$$

где параметры U_{ik} подлежат определению из опыта. Аналогичная матрица смешивания кварков носит название матрицы Кобаяши–Маскавы (эти физики получили Нобелевскую премию за 2008 г.).

Результатом смешивания нейтрино разных масс является возникновение осцилляций ароматов, т. е. переход нейтрино одного аромата в нейтрино другого аромата. Именно ароматы детектируются в реальности (по вылету электрона, мюона или тау).

Наблюдаемые массы и углы смешивания имеют чисто вакуумное происхождение,

т. е. они генерируются на электрослабом масштабе масс с помощью механизма Хиггса за счет вакуумного среднего скалярного поля.

Механизм приобретения массы лептонами и кварками за счет взаимодействия с вакуумом скалярного поля Хиггса — главное в СМ. Дело в том, что исходные уравнения теории инвариантны относительно преобразований группы $SU(2)_L \times U(1)$, что возможно только для безмассовых частиц. Поэтому объединение электромагнитных и слабых взаимодействий (в этом — главная задача СМ) должно сопровождаться каким-то механизмом, обеспечивающим появление масс у лептонов, кварков и слабых калибровочных бозонов. Простейший предложенный вариант этого механизма включает дублет полей скалярных (со спином 0) бозонов (H^+ , H^0), за счет вакуумного среднего которых генерируется масса лептонов и W , Z . При этом возникает и дополнительная частица — квант скалярного поля бозон Хиггса H , предполагаемая масса которого порядка нескольких сотен ГэВ. (На БАКе планируется открытие хиггсовского бозона).

Какие вопросы физики нейтрино ждут ответа?

Детали взаимодействия нейтрино с другими частицами и веществом

Калибровочные взаимодействия нейтрино хорошо известны и проверены. Они описываются взаимодействием слабых заряженных ($\nu_e e W$) и нейтральных ($\nu_e \nu_e Z$) токов лептонов и аналогичных токов кварков. Константы, входящие в эти токи, хорошо известны. Напротив, константы связи нейтрино с хиггсовским бозоном (при наличии правых токов) неизвестны. Эти константы могут иметь важное отношение к проблеме лептогенезиса. Во-вторых, плохо изучены детали взаимодействия нейтрино со сложными системами (нуклонами и ядрами). Это связано с недостаточным пониманием физики сильного взаимодействия, в то время как на фундаментальном уровне кварков и лептонов имеется полная ясность.

За последние 30-40 лет почти совсем не изменились наши знания сечений взаимодействия нейтрино с веществом, т. е. плохо известно сечение взаимодействия нейтрино определенной энергии с конкретным ядром. Этот пробел хотят заполнить в эксперименте Минерва в Фермилабе (Minerva, FermiLab, США).

Осцилляции нейтрино и вопрос о типе массы нейтрино

В 1998 г. были опубликованы данные СуперКамиоканде (Япония), свидетельствующие об осцилляциях атмосферных нейтрино. Это явление возможно только при условии, что масса нейтрино отлична от нуля. Вопрос в том, чему равна эта масса. Эксперименты по регистрации осцилляций нейтрино позволяют установить только разность квадратов масс пары нейтрино (Δm^2).

Эта величина оказалась очень малой, $\Delta m^2 \approx 10^{-4}$ эВ. Существующее сейчас ограничение на массу электронного нейтрино < 2 эВ.

Тип нейтрино (дираковское или майорановское) может быть установлен по наблюдению двойного бета-распада. В процессе бета-распада одного нейтрона $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ образуется антинейтрино, которое в майорановской теории совпадает с нейтрино. Тогда это нейтрино может найти в веществе нейтрон и в результате реакции $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$ в конечном состоянии такой цепочки взаимодействий нейтрино и антинейтрино исчезнут и останутся два электрона. Схематически такой двойной бета-распад можно записать в виде $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$. Вероятность такого процесса очень мала, но его поиски интенсивно продолжаются.

Особенности смешивания нейтрино в среде

До сих пор идут дискуссии о теории нейтринных осцилляций даже в вакууме. При этом затрагиваются «вечные вопросы», касающиеся равенства импульсов или энергий при рассмотрении интерференции, применимость приближения стационарного источника и т. п. Что же касается распространения в среде, то фронт исследований сместился к экстремальным условиям — высоким температурам, плотностям, магнитным полям и пр. Основополагающими работами в этом направлении были работы Вольфенштейна, Михеева и Смирнова. В этих работах было показано, что при определенном распределении вещества на Солнце осцилляции нейтрино (т.е. переход электронного нейтрино в другие ароматы) могут иметь резонансный характер.

Поставленные перед учеными вопросы определили планируемые исследования в физике нейтрино.

Экспериментальные установки

Более подробную информацию можно найти на сайте www.neutrinooscillation.org

Источники нейтрино: Солнце, взрывы сверхновых в галактиках, атмосфера Земли (нейтрино рождаются при взаимодействии космического излучения с частицами в атмосфере), ядерные реакторы, ускорители.

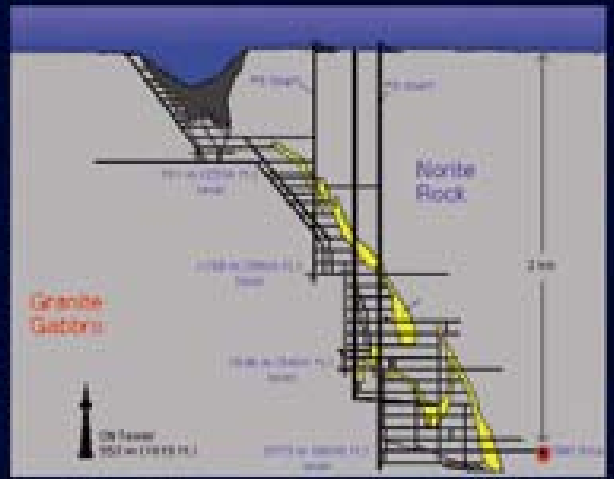
Детекторы: радиохимические, черенковские (водяные или наполненные другим прозрачным веществом), сцинтилляционные.

Отдельно следует упомянуть детекторы прямого измерения массы нейтрино в распаде трития и эксперименты по обнаружению двойного бета-распада

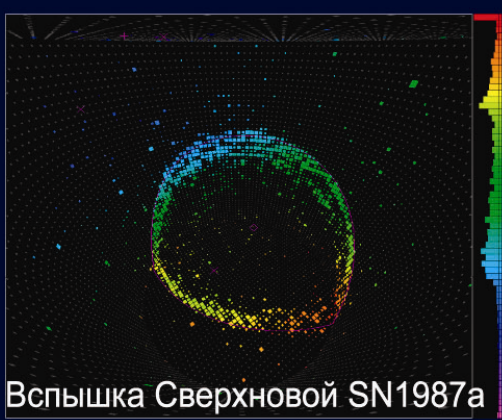


Хлорный эксперимент Дэвиса: GALLEX, SAGE - радиохимические эксперименты, которые регистрировали солнечные нейтрино и продемонстрировали дефицит солнечных нейтрино.

Для того, чтобы уменьшить фон космического излучения, установка размещалась в специально созданной подземной лаборатории на глубине 1490 м.

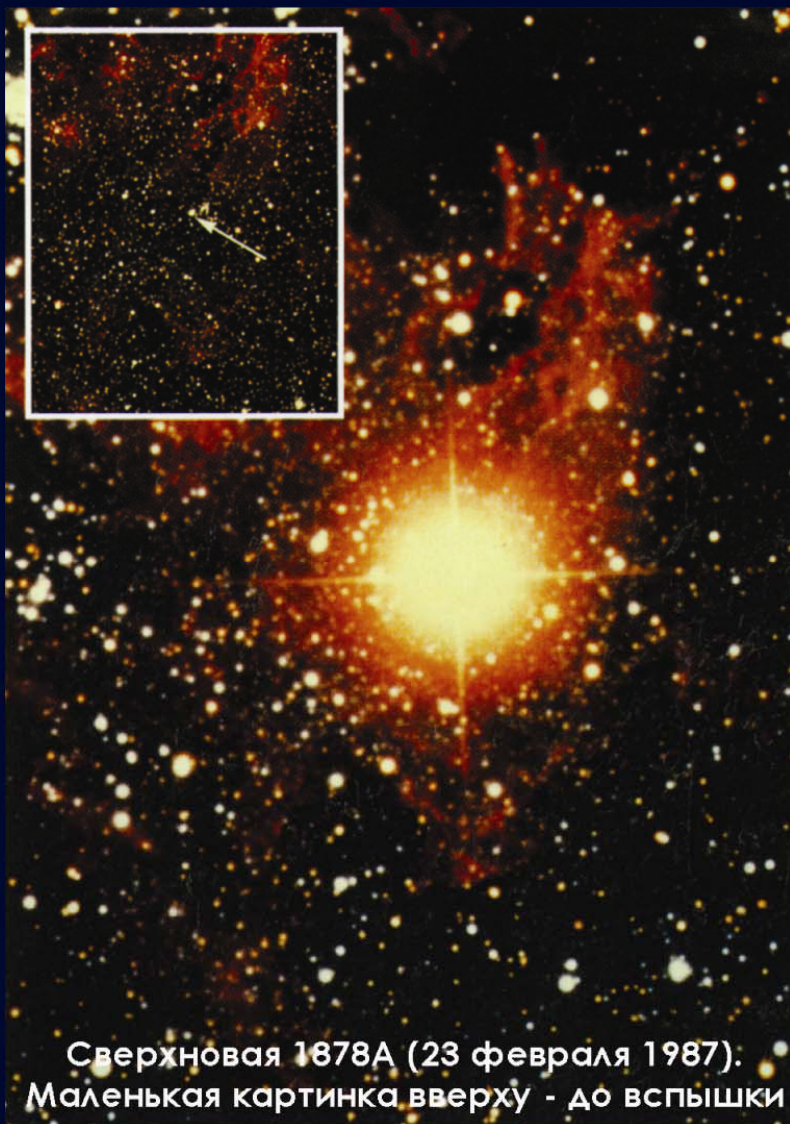
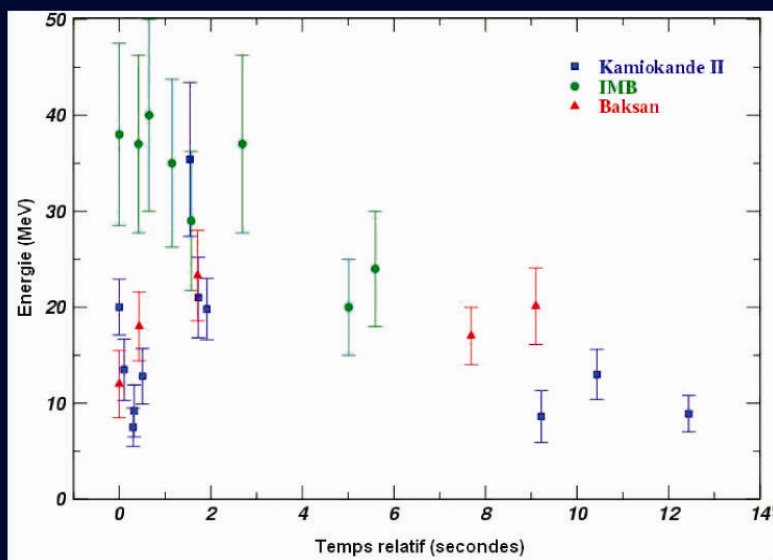


Эксперимент SNO (Канада) - на основе черенковского детектора с тяжелой водой - подтвердил дефицит солнечных нейтрино в процессах как с заряженными, так и с нейтральными токами.



Вспышка Сверхновой SN1987a

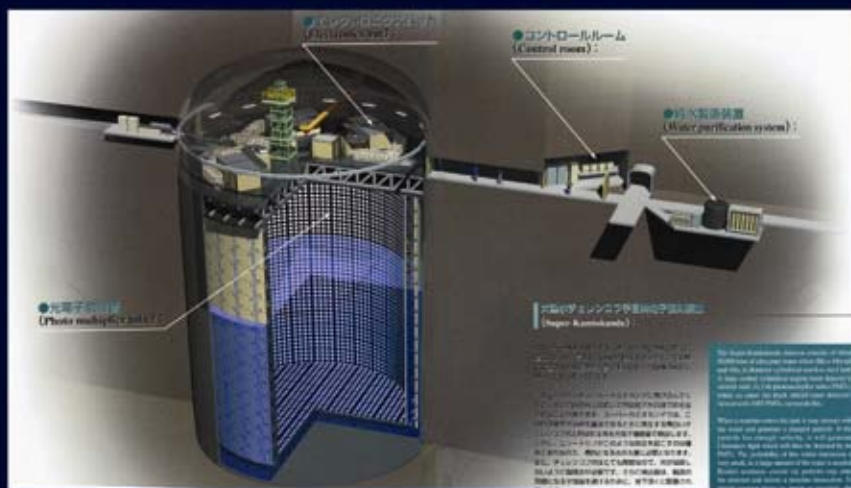
Камиоканде (Япония); IMB (США) - черенковские детекторы - зарегистрировали нейтрино.



Сверхновая 1878A (23 февраля 1987).
Маленькая картинка вверху - до вспышки

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) объемом 3000 куб. м на глубине более 300 м от поверхности также зарегистрировал нейтрино от SN1987a.





СуперКамиоканде (черенковский детектор, Япония) регистрирует солнечные, атмосферные нейтрино, а также ускорительные нейтрино. В 1998 г. коллаборация СуперКамиоканде объявила об открытии осцилляций атмосферных нейтрино.



Суперкамиоканде. Монтажные работы.



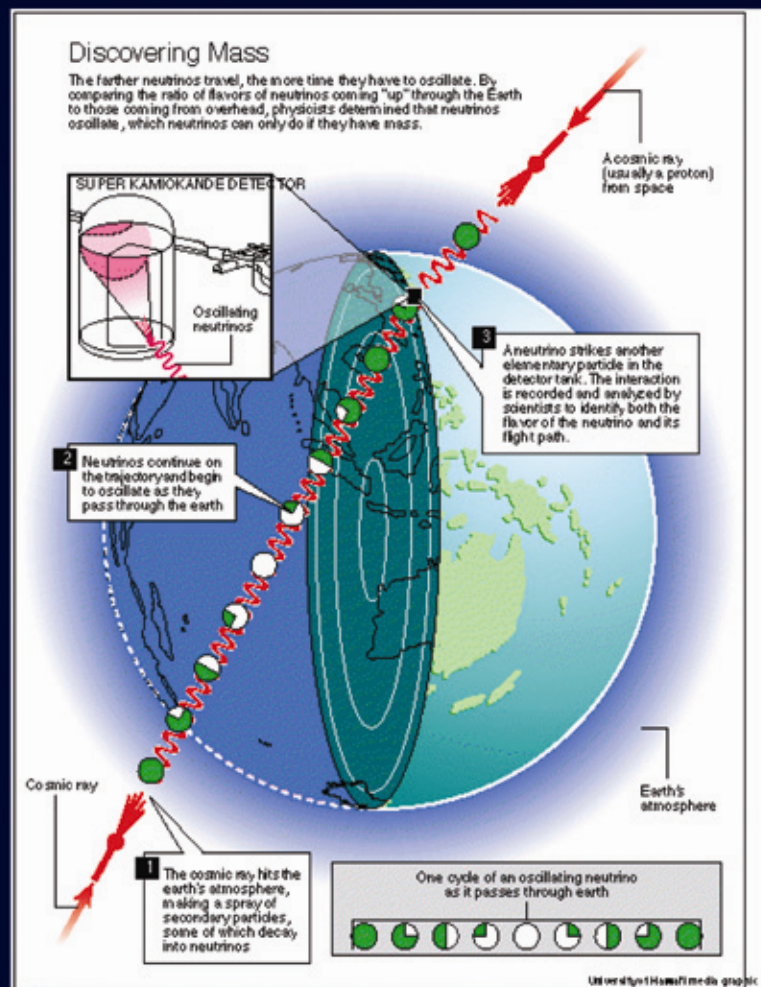
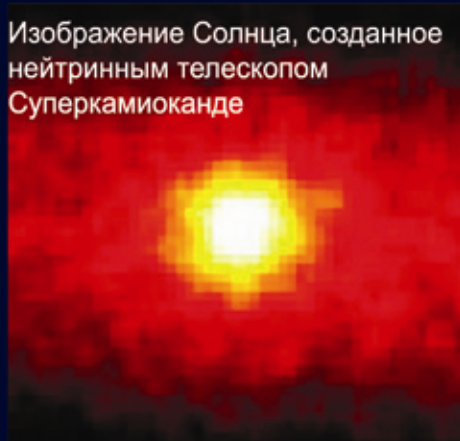
K2K (Япония) и MINOS (США) - ускорительные эксперименты, обнаружили осцилляции ускорительных нейтрино (по дефициту мюонных нейтрино в дальнем детекторе, пролетная база - 235 и 735 км, соответственно). В 2009 г. планируется запуск нового эксперимента - T2K, в котором ожидается регистрация "появления" электронного нейтрино в пучке мюонных нейтрино (пролетная база - 295 км).



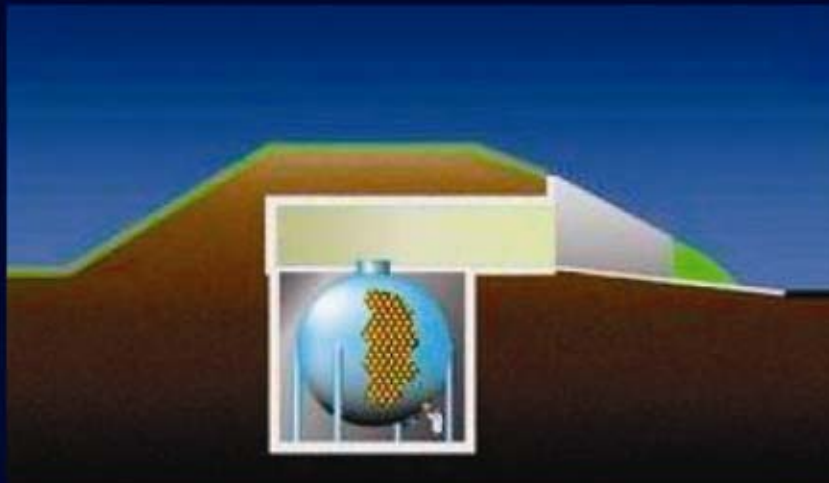
Эксперимент CHOOZ (Франция) - реакторный эксперимент, установивший лучшее на сегодняшний день ограничение на параметр смешивания. Планируется новый эксперимент Double CHOOZ (Франция) - для улучшения точности измерения этого параметра. Другим планируемым экспериментом такого же типа является Daya Bay в Китае.

Эксперимент KamLand (Япония) - на основе черенковского детектора, расположенного в той же шахте, что и СуперКамиоканде. Измерил потоки электронного антинейтрино от нескольких реакторов в Японии. Данные KamLand подтверждают дефицит реакторных нейтрино, а также открывают возможность регистрации геонейтрино - нейтрино, образовавшихся в недрах Земли.

Изображение Солнца, созданное нейтринным телескопом Суперкамиоканде



Вид на территорию Фермилаба с воздуха. Кольцо на переднем плане - Главный Инжектор Теварона, кольцо на заднем плане - Теватрон. Пруды вдоль колец отводят тепло от ускорителей.

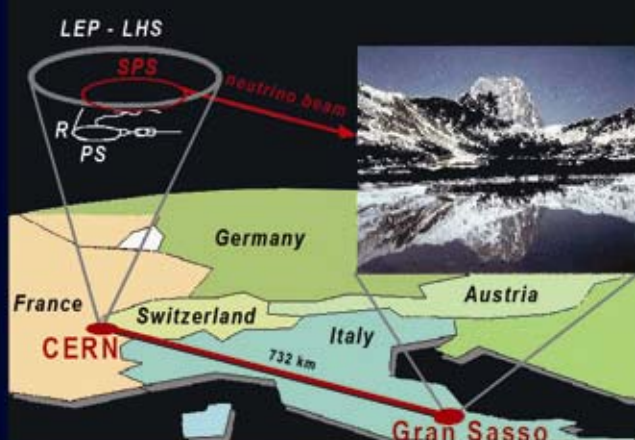


Эксперимент LSND (США) - продемонстрировал аномальные параметры осцилляций ускорительных мюонных антинейтрино (не подтверждаются другими экспериментами). Пролетная база - 30 м.

Эксперимент MiniBooNE (США) - был запущен с целью исследования аномалии эксперимента LSND и дальнейшего изучения осцилляций мюонных нейтрино (антинейтрино), полученных в ускорителе. Пролетная база - 540 метров.



CERN to Gran Sasso Neutrino Beam



Эксперимент OPERA (Италия) - запущен в Гран-Сассо, Италия, для регистрации тау-нейтрино, образовавшихся в результате осцилляций исходного пучка мюонных нейтрино на пути из ЦЕРНа (эксперимент на "появление", пролетная база - 730 км). Особенностью данного эксперимента является использование эмульсионной пленки для регистрации заряженных частиц, которые должны образовываться в результате распада тау-лептона.

Эксперимент Троицк-ню-масс (Россия) - прямое измерение массы электронного нейтрино по спектру электронов из бета-распада трития. Получено наилучшее на сегодняшний день ограничение на значение массы электронного нейтрино < 2 эВ.



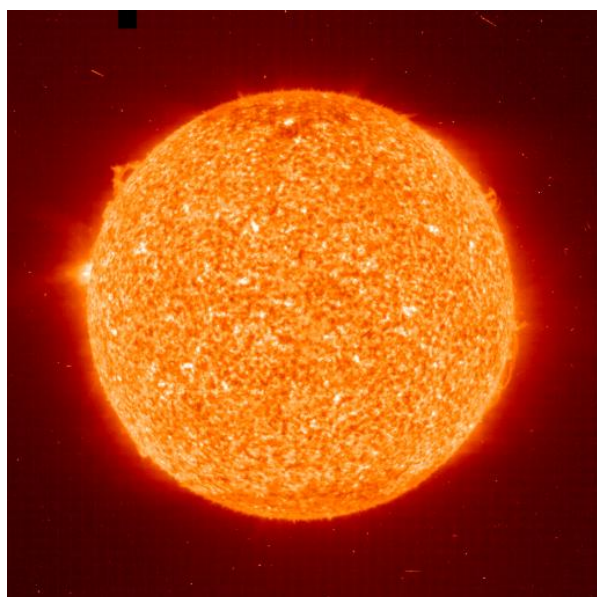
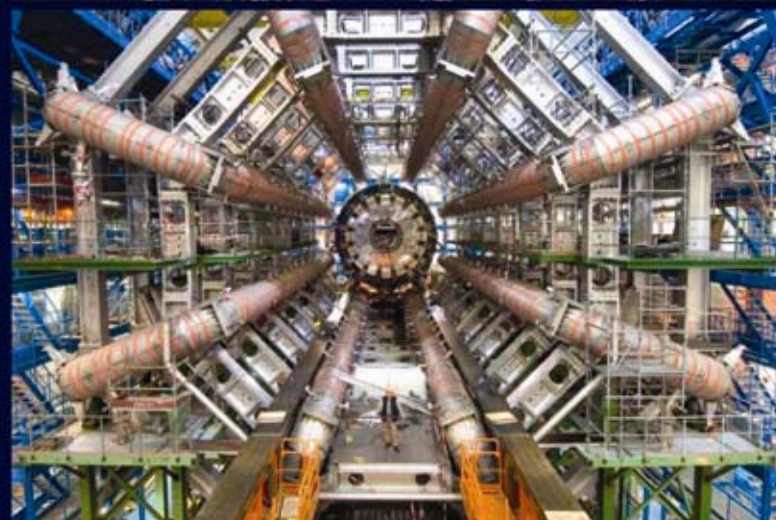
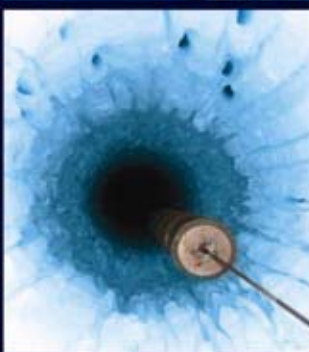
Сегодня многие ученые связывают дальнейшую судьбу познания мира элементарных частиц - основ Вселенной, с многофункциональным большим андронным коллайдером (суперколлайдер LHC), ускорителем сверхвысоких энергий.



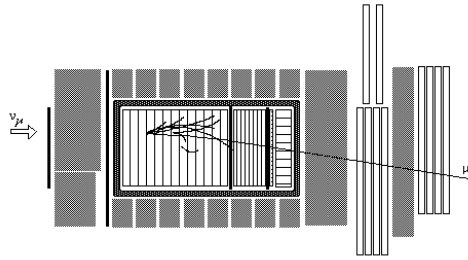
На Южном полюсе входит в финальную стадию строительство телескопа "IceCube". Бурение на полюсе ведется при помощи специальных устройств, прокладывающих канал во льду при помощи киятка. Затем в шахту поочередно опускают оптические сенсоры и дают им возможность вмерзнуть в снова заполняемое водой пространство.



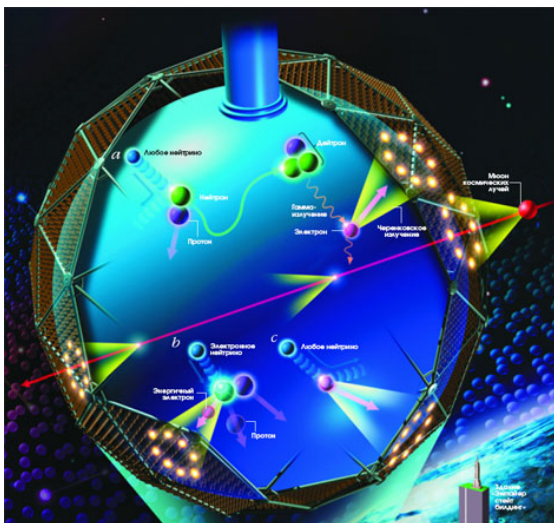
Из массива будет выделен один кубический километр антарктического льда, который и будет служить детектором прибора. Первые данные аппарат получает уже сейчас, находясь в не полностью законченном состоянии.



Ряд удивительных чисел на примере установки NOMAD, Fermilab



- В человеческом теле содержится примерно 20 мг калия-40, который бета-радиоактивен. В результате наше тело испускает около 340 миллионов нейтрино в день, и мы совершенно не чувствуем этого.
- Эксперимент типа NOMAD (Neutrino Oscillations **M**agnetic **D**etector, Магнитный Детектор Нейтринных Осцилляций) детектирует по одному нейтрино каждые 10 с. Это единственное нейтрино обладает энергией около 27 ГэВ. Таким образом, за все время эксперимента нейтрино внесут в детектор чуть больше 0,03 Дж, что в 10 раз больше энергии одного чиха.
- В том же эксперименте NOMAD, детектор «активен» только в течение нескольких мкс при каждом всплеске потока нейтрино от ускорителя частиц. За все время эксперимента (от 1994 до 1998 гг.) детектор был «активен» **всего 15 ч**.
- В NOMAD детектор использует магнит, создающий поле 0,4 Тл (в 2000 раз больше, чем магнитное поле Земли), создаваемое током 5700 А. За время работы установки энергопотребление составило более 200 000 миллиардов Дж, что в 10 000 раз больше, чем потребление электричества стандартной семьей за тот же период.
- Где бы вы не находились, даже глубоко под землей, вас пронизывают каждую секунду около 400 000 миллиардов нейтрино от Солнца, 50 миллиардов нейтрино от естественной радиоактивности пород на Земле, и от 10 до 100 миллиардов нейтрино от всех работающих атомных электростанций. К счастью для нас, нейтрино практически не взаимодействуют с остальной материей, так что мы совершенно их не ощущаем.



Нигде так ясно не проявляется связь между микромиром и космосом, как в физике нейтрино.

Б.М.Понтекорво

Рис. Л. Ледермана