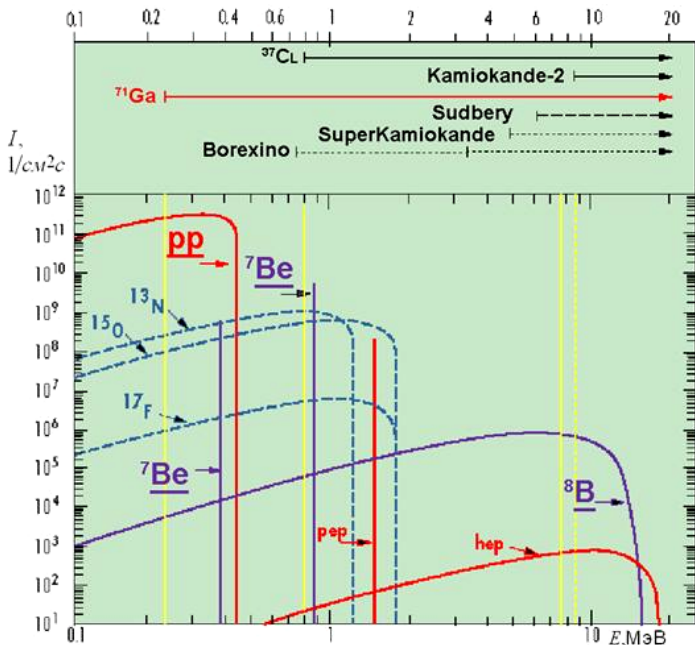


8. ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

Наибольший интерес из всех источников нейтрино представляют солнечные нейтрино.

Согласно Стандартной Солнечной Модели (ССМ) солнечная светимость поддерживается главным образом за счет энергии, которая освобождается в результате протон-протонного ($p-p$) цикла. В рамках ССМ подсчитано, что 98% солнечной энергии генерируется в результате реакций pp - цепочки, а CNO-цикл поставляет лишь 2% солнечной энергии. Наблюдение солнечных нейтрино позволяет осуществить непосредственную проверку модели термоядерных реакций на Солнце. Поскольку в условиях Солнца электромагнитное излучение имеет пробег 1 см, из внутренних областей оно выходит наружу сильно трансформированным в результате рассеяния. Даже если в центре Солнца происходит какое-либо событие, сопровождающееся излучением большого числа фотонов, следы этого события в виде фотонов появятся на поверхности Солнца примерно через 10^7 лет. Таким образом, использование обычных оптических и радиоастрономических методов дает информацию об излучении лишь с поверхности звезд.



Солнце (Рис. 16).

Большинство нейтрино имеет энергию ниже 1 МэВ. Это обстоятельство существенно с точки зрения регистрации нейтрино. С одной стороны высокоэнергетичные нейтрино легче детектировать из-за более высокого порога реакции, а с другой стороны поток высокоэнергетичных нейтрино намного меньше.

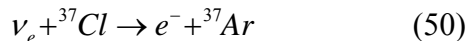


Рис. 17. Схема хлор-аргонного эксперимента

Генерация нейтрино происходит во внутренних областях Солнца, и их детектирование дает информацию о процессах, происходящих в этих областях, причём различные типы солнечных нейтрино отличаются также и по эффективной области их генерации. Детектирование $p-p$ даст главное доказательство корректности ССМ. Интенсивность образования «борных» нейтрино сильно зависит от температуры внутри Солнца, и, следовательно, детектирование «борных» даст указание на температуру ядра Солнца.

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

Для детектирования нейтрино использовалась реакция:



Реакция происходит под действием нейтрино с энергиями, большими, чем 0,814 МэВ. Хлорный детектор наиболее чувствителен к «борным» (${}^8\text{B}$) нейтрино. Детектор представлял собой большой контейнер объемом 380000 л, заполненный 610 т жидкого перхлорэтилена. Этот контейнер располагался на глубине 1480 м, что соответствует 4500 м. водного эквивалента, и впоследствии был дополнительно защищен толстым слоем воды.

Предсказанная скорость счета - 4-11 нейтринных события в день. Основной задачей при создании детектора была герметичность швов бака. Во время гелиевых продувок перхлорэтилена гелий скапливался в верхних 5 % объема бака и прогонялся со скоростью 17000 литров в минуту через аппаратуру, в которой осуществлялась экстракция атомов аргона. Конденсатор, помещенный около бака, вымораживал перхлорэтилен, а фильтр из древесного угля в контрольной комнате улавливал аргон. 95 % аргона, образующегося в баке, извлекалось за 20 часов продувки. После извлечения аргон очищался от сопутствующих примесей и помещался в маленькие пропорциональные счетчики с объемом 0,25 или 0,5 см³. Позднее прибор для счета распадов атомов ³⁷Ar был установлен в шахте Homestake на глубине 1500 м. с целью использования гораздо лучшей естественной защиты от космических лучей слоем горных пород. Эксперимент начался в 1967 и уже первые его результаты показали, что Солнце производит только треть ожидаемых нейтрино с высокими энергиями. Отношение экспериментально измеренного потока солнечных нейтрино к теоретической величине равняется:

$$r_n = 33\% \quad (51)$$

Так возникла проблема «проблема солнечных нейтрино» (SNP). Чтобы подчеркнуть сложность детектирования нейтрино можно отметить, что за 30 лет работы детектор зафиксировал в общей сложности 2200 солнечных нейтрино.

Следующим экспериментом, подтвердивший существование проблемы солнечных нейтрино, стал эксперимент Kamiokande. В 1988 японские ученые начали эксперимент на детекторе Kamiokande-II, расположенном на глубине 1000 м в шахте Камиока. Основной реакцией является рассеяние солнечных нейтрино на электронах легкой воды:



Водный детектор содержится в цилиндрическом резервуаре диаметром 15,6 м и высотой 16 м. Стальные стенки резервуара имеют толщину 4,5-12 мм. Внутренняя поверхность резервуара окрашена в черный цвет. Для того чтобы поймать нейтрино, использовались 3000 тонн чистой воды, из которых собственно для детектирования были задействованы 680 т. в центре резервуара. 1000 больших фотоумножителей (~50 см диаметром), размещенных на внутренней поверхности резервуара и покрывающих 20% этой поверхности, фиксировали черенковское излучение. Характеристики больших ФЭУ были аналогичны характеристикам малых ФЭУ, но при этом они имели большую площадь детектирования. Схема антисовпадений представляла собой также водный черенковский детектор, окружавший внутренний детектор, с толщиной 1,5 м, просматриваемая 123 ФЭУ. Антисовпадательный слой необходим для прямой защиты от гамма-излучения и нейтронов, проникающих в детектор, путем их поглощения. Второй его функцией является отсеивания сигналов от пролетающих мюонов – это система мюонного вето. Система электроники в детекторе регистрировала временную информацию о черенковских фотонах и информацию об амплитуде импульсов в ФЭУ. Регистрируются сигналы с амплитудой более 0,35 МэВ. Триггер на нейтринное событие срабатывает при регистрации сигнала с не менее 20 ФЭУ, находящиеся в состоянии возбуждения в течение 100 нс, что соответствует энергии электрона отдачи порядка 7,5 МэВ.

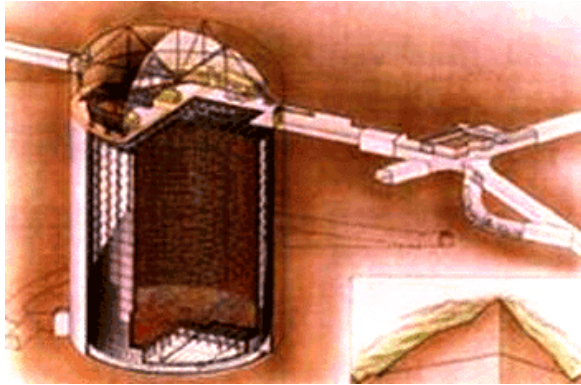


Рис. 18. Схема детектора Kamiokande II.

В процессе настройки детектора была проделана большая работа по уменьшению фона. Основными компонентами фона были: 1. Радиоактивные изотопы, содержащийся в воде: ²²²Rn, ²³⁸U, ²²⁶Ra 2. Гамма-излучение из окружающей детектор породы 3. Радиоактивные осколки, образуемые при столкновении мюонов и ядер кислорода ¹⁶O в воде, распадающиеся с образованием электронов. В результате принятых работы фон был уменьшен более чем в 1000 раз.

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

Подобно экспериментам Homestake, Kamiokande-II обнаруживал только очень редкие высокоэнергетичные нейтрино. Граничная энергия регистрируемых нейтрино в этом эксперименте 7.5 MeV. За тысячу дней наблюдений ученые обнаружили только половину от ожидаемого потока таких нейтрино. Результатом его работы стало следующее: доля экспериментально обнаруженных нейтрино от теоретически рассчитанного количества равна:

$$r_n=0,54 \quad (53)$$

Кроме измерения потока солнечных нейтрино, детектору Kamiokande также удалось зарегистрировать нейтрино от сверхновой, вспыхнувшей 23.02.1987. Было зарегистрировано 12 из 10^{16} нейтрино, которые прошли сквозь этот детектор.

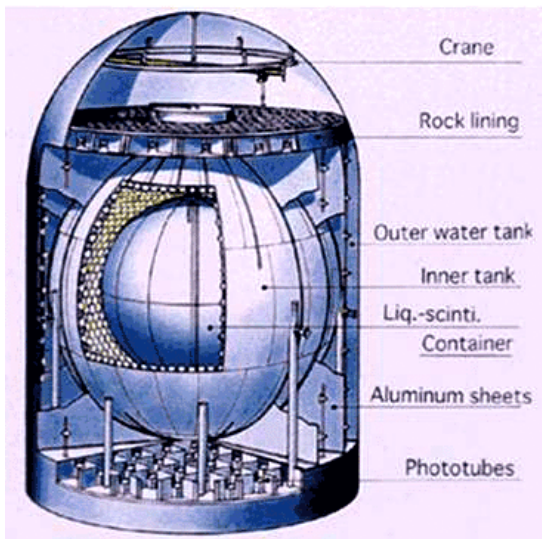


Рис. 19. Схема детектора SuperKamiokande.

В результате попыток теоретического обоснования результата родилось множество других проблем: имеет ли нейтрино массу, магнитный момент, каково время жизни нейтрино, и т.д. Все эти проблемы послужили поводом к созданию детекторов второго поколения, одним из которых является SuperKamiokande. SuperKamiokande является модернизацией Kamiokande-II. Его детектор — огромный резервуар (40x40 м) из нержавеющей стали,

заполненный 50 000 т чистой воды. На поверхности резервуара размещены 11 146 фотоумножителей (ФЭУ). Внутренний детектор, используемый для физических исследований, окружен слоем воды, который является внешним детектором и также контролируется фотоумножителями. Внешний детектор предотвращает срабатывание основного детектора от нейтрино, произведенных в окружающей детектор породе.

SuperKamiokande различает электронные и мюонные нейтрино по характеристикам черенковского излучения, вызываемого заряженными лептонами. Также у данного детектора был уменьшен порог регистрации - 5.5 МэВ. Угловое распределение нейтрино дало четко выраженное направление, совпадающее с направлением на Солнце.

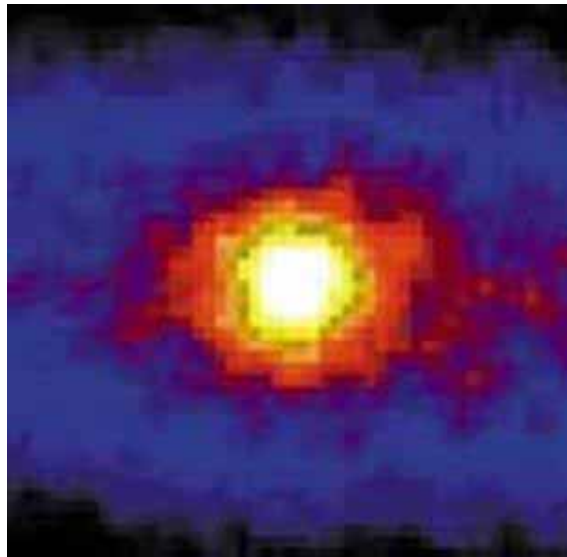


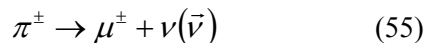
Рис. 20. Изображение Солнца, полученное с помощью нейтрино в течение 500 дней детектором SuperKamiokande. Более яркие цвета соответствуют большему зафиксированному числу нейтрино.

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

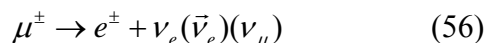
$$r_n=47,5 \quad (54)$$

Кроме солнечных нейтрино участники эксперимента SuperKamiokande исследовались не только солнечные, но и атмосферные нейтрино. Число мюонных нейтрино, рожденных в верхних слоях земной атмосферы, при столкновении протонов космических лучей с ядрами атомов воздуха, приходящих в

детектор с разных расстояний. Меньшее число мюонных нейтрино приходило с тех направлений, где нейтрино преодолевали большее расстояние. Количество нейтрино данного класса зависит от пройденного ими пути, что может быть следствием трансформации нейтрино из одного вида в другой. Протоны космических лучей в результате столкновения с атомом рождают заряженный пион, который распадается на мюон и мюонное нейтрино.

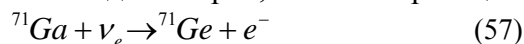


Мюон в свою очередь распадается на электрон, низкоэнергетичное электронное антинейтрино и высокоэнергетичное мюонное нейтрино.



Поток атмосферных мюонных нейтрино должен быть в два раза больше потока электронных нейтрино. Причем это соотношение должно выполняться, независимо от модели атмосферных ливней и справедливо для широкого диапазона энергий нейтрино ($0,1 < E < 1$) ГэВ. Эксперимент показал, что потоки практически равны. Эта проблема получила название аномалии атмосферных нейтрино.

Перейдём теперь к применению галлиевых детекторов, основной реакцией в которых является:



Данная реакция проходит с порогом 0, 283 МэВ и позволяет детектировать все типы солнечных нейтрино. Российско-Американский галлиевый эксперимент, получивший название SAGE, был проведен под руководством Г.Т. Зацепина в Боксанской нейтринной обсерватории, расположенной на глубине 4700 m.w.e. в низкофоновой лаборатории в горах Северного Кавказа. Общая масса галлия в детекторе была равна 60 тоннам. Почти 100 измерений потока солнечных нейтрино, проведенных в течение 1990—2000 годов,

зафиксировали только половину потока нейтрино, который прогнозируется Стандартной Солнечной Моделью:

$$R_{\text{fn}}=55.0 \quad (58)$$

Аналогичный эксперимент был проведен (GALLEX) проводился при международном сотрудничестве ученых из Франции, Германии, Италии, Израиля, Польши и США в период с 1991 по 1997 год. Главной составной частью детектора GALLEX является контейнер с расплавом галлия (температура плавления - 30°C), смешанного с перекисью водорода и кислотой. Мишенью для нейтрино служили 30 тонн галлия в форме водного раствора хлорида галлия (общий вес - 110 тонн). Чтобы защитить детектор от фона, создаваемого космическим излучением, он помещен на глубину 3 300 м под самой высокой горой Италии, в Гран-Сассо (150 км восточнее Рима). За 5 лет работы усредненный измеренный поток солнечных нейтрино составил порядка 80% (57%) от теоретического. В 1997 году эксперимент GALLEX был завершен, и на основе этого же детектора стартовал эксперимент GNO.

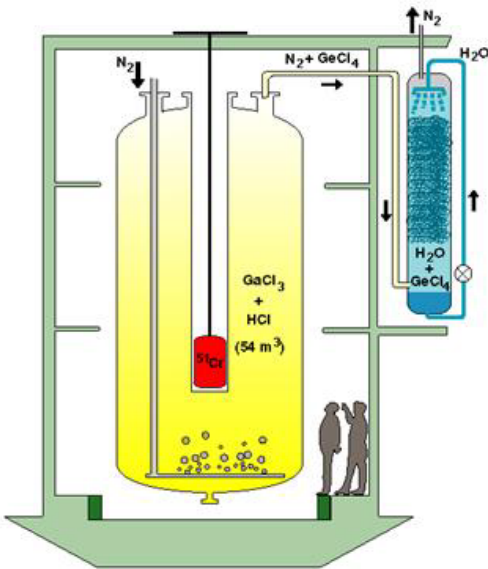


Рис. 21. Схема детектора Gallex.

Подводя итог всем проведенным экспериментам по детектированию солнечных нейтрино, можно сказать, что все они показывают дефицит потока солнечных нейтрино, измеряемого на Земле. Расхождение между числом детектируемых нейтрино и числом предсказанных было названо проблемой солнечных нейтрино.

Существуют разные модели, объясняющие полученные экспериментальные результаты. Главных две: либо не верна Стандартная Солнечная Модель, либо природа нейтрино отличается

от общепринятой. Результаты гелиосейсмологических наблюдений и нейтринных экспериментов говорят в пользу второго варианта. Наиболее простым объяснением представляются нейтринные осцилляции, существование которых предсказывается теорией нейтрино с конечной массой покоя. Напомним, что существует два вида нейтрино: дираковские и майорановые. Согласно Стандартной модели нейтрино дираковские и безмассовые, у них есть античастицы (антинейтрино), а закон сохранения лептонного заряда носит абсолютный характер. Майорановые нейтрино могут иметь массу и являются истинно нейтральными, т.е. являются античастицами по отношению к самим себе. Если хотя бы некоторые нейтрино майорановы, то закон сохранения лептонного заряда должен нарушаться. Одним из доказательств массивности нейтрино и являются т.н. нейтринные осцилляции.

Нейтринные осцилляции - это взаимные превращения нейтрино различных ароматов друг в друга. Для того чтобы были возможны осцилляции, необходимо существование наряду с физическими состояниями нейтрино (ν_e, ν_μ, ν_τ) массовых состояний (ν_1, ν_2, ν_3). Физические состояния возникают при слабых распадах и испытывают слабые взаимодействия, а массовые состояния – это такие состояния, в которых нейтрино распространяются в вакууме. Вероятность перехода нейтрино из одного аромата в другой в общем случае характеризуется двумя величинами: $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ - разностью масс массовых состояний и θ - углом смешивания нейтрино. Явление осцилляций нейтрино было предсказано Б. М. Понтекорво в 1957. Он предположил, что электронные нейтрино, возникающие в центре Солнца, по пути к Земле могут преобразовываться частично в мюонные, а частично в тау-нейтрино. Этот процесс получил название вакуумных осцилляций. Позже было высказано предположение о резонансном усилении осцилляций нейтрино при прохождении им вещества, в частности Солнца. Такую конверсию назвали эффектом Михеева-Смирнова-Вольфенштейна (МСВ). Другими возможными механизмами осцилляций являются изменение спиральности нейтрино, то есть, превращение нейтрино в антинейтрино, а также превращение нейтрино в «стерильные» - четвертый аромат нейтрино, не вступающий в слабые взаимодействия.

Сегодня общепринятой физической теорией, полностью описывающей слабые и электромагнитные взаимодействия, является Стандартная модель электрослабых взаимодействий. Она объясняет все собранные экспериментальные данные, а открытие нейтральных токов и W и Z -бозонов явилось ее подтверждением. Тем не менее, Стандартная модель нуждается в дополнении и обобщении. Пока она не может предсказать массы фермионов, не объясняет необходимость нескольких поколений кварков и лептонов и не может дать объяснение результатам всех проведенных экспериментов по измерению потока солнечных нейтрино, зафиксировавших дефицит потока нейтрино. Зато отсутствие солнечных нейтрино можно объяснить с помощью теории нейтринных осцилляций: лептонные кварковые числа не сохраняются, массы нейтрино не равны нулю, хотя и очень малы - при этом противоречий с проведенными экспериментами по измерению

массы нейтрино нет, т.к. все они дают лишь ограничение на верхний предел массы нейтрино электронное, мюонное и тау-нейтрино является суперпозицией трёх состояний, имеющих массы m_1 , m_2 , m_3 .

По своему характеру нейтринные осцилляции аналогичны биениям, которые наблюдаются в системе двух одинаковых маятников массой m и длиной L , подвешенных на общем подвесе с жесткостью k (через который осуществляется их связь). Для такой системы маятников возможны два стационарных состояния. Если отклонить какой-либо из маятников, то его колебания через некоторое время передадутся другому маятнику, амплитуда колебаний которого постепенно возрастет до максимальной величины, а амплитуда первого упадет до нуля, после чего начнет падать амплитуда второго и расти амплитуда первого и процесс, если мало затухание, будет периодически повторяться. Этот процесс аналогичен осцилляциям нейтрино между двумя ароматами. Энергия в случае биений соответствует вероятности перехода нейтрино в другой аромат. Частота биений равна разности собственных частот стационарных состояний, а энергия каждого маятника, пропорциональная квадрату амплитуды, зависит от этой разности. Если же взять два маятника с разной длиной, то получится несколько другая картина: амплитуда маятника с затухающими колебаниями не уменьшится до нуля, т.е. не произойдет полный переход энергии. И чем сильнее отличие длин маятников (а точнее их собственных частот), тем меньшая часть энергии будет передаваться между ними, т.е. тем меньше будет смешивание. Максимальное смешивание происходит при равных собственных частотах.

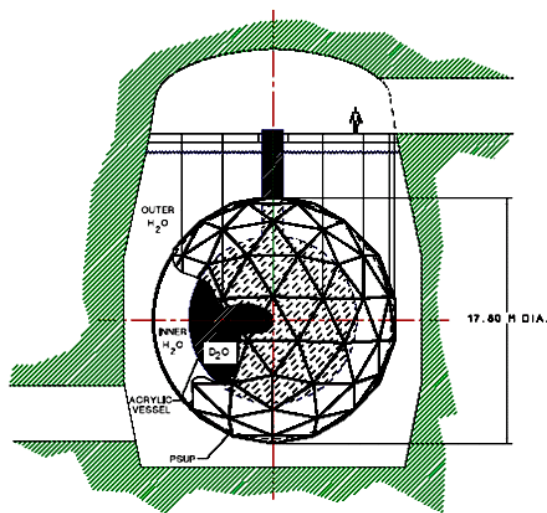
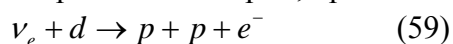


Рис. 22. Схема детектора SNO

Подтверждение существования нейтринных осцилляций получено в эксперименте группы SNO путем независимого измерения потоков электронных, мюонных и тау нейтрино. Нейтринная лаборатория в Садбери (Онтарио, Канада) построена в шахте на глубине 2070 метров в 1993. SNO – черенковский детектор на тяжелой воде. Детектор представляет собой резервуар – бочкообразную полость, выкопанную в скале, - диаметром 22 метра и высотой 34 метра, заполненный 5300 тоннами сверхчистой легкой водой, в которую помещен бак из акрилового пластика (диаметр 12 метров) с 1000 тонн тяжелой воды D_2O , служащей мишенью для нейтрино. Внешний слой обычной воды служит для поглощения гамма квантов и нейтронов от естественной

радиоактивности скальных пород. Акриловый резервуар окружает сфера 17-метрового диаметра, заполненная 1700 тоннами обычной воды и содержащая 9600 фотоумножителей (Рис. 22). За сутки детектор регистрировал порядка 10 событий.

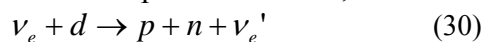
SNO чувствителен ко всем трём ароматам нейтрино. Детектирование электронных нейтрино происходит путем реакции рассеяния нейтрино на дейтерии, протекающей с участием заряженных токов:



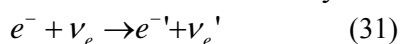
Когда нейтрино попадает в ядро дейтерия, происходит обмен W -бозоном. При этом нейтрон превращается в протон, а нейтрино – в электрон. И в результате реакции происходит образование двух протонов и электрона. Электрон как самая легкая из образовавшихся частиц получает практически всю энергию налетающего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

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

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



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



Рассеяние происходит с нейтрино всех трёх типов, но интенсивность процесса для электронных нейтрино выше в 6 раз. Т.к. в конечном состоянии энергия нейтрино делится между обоими продуктами

реакции, то точная спектроскопия невозможна. Но зато данный метод дает информацию о первоначальном направлении нейтрино, что позволяет убедиться в том, что обнаружено именно солнечное нейтрино.

Для увеличения эффективности регистрации в SNO созданы две различные системы регистрации процессов с нейтральными токами.

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

2. Хлористый натрий: В этом варианте в тяжелую воду добавляется более двух тонн хлористого натрия (NaCl). У ${}^{35}\text{Cl}$ большое сечение захвата тепловых нейтронов, который сопровождается каскадом гамма квантов с максимумом в области 8 МэВ. Для уменьшения низкоэнергетического фона граничная энергия детектируемых нейтрино в эксперименте была установлена в 6,75 МэВ.

Оценка полного потока солнечных нейтрино находится в хорошем согласии со стандартной моделью Солнца.

Группой SNO найдена 7% асимметрия «ночь-день» для потока электронных нейтрино, которая указывает на наличие осцилляций нейтрино в веществе, т.к. в дневное время солнечные нейтрино попадают в детектор сверху, проходя только через вакуум и атмосферу, а ночью – снизу, проходя сквозь толщу Земли. Направление движения нейтрино в случае упругого рассеяния (ES) совпадает с направлением на Солнце. Все эксперименты показали дефицит потока солнечных электронных нейтрино, измеряемого на Земле, объясняемый тем, что часть электронных нейтрино проходя через Солнце превращаются в нейтрино других ароматов (прежде всего мюонное).

Современные эксперименты по регистрации нейтрино проводятся по следующим направлениям: 1. Эксперименты с солнечными нейтрино 2. Эксперименты с атмосферными нейтрино 3. Реакторные эксперименты 4. Ускорительные эксперименты 5. Регистрация нейтрино от взрывов сверхновых (как правило, как дополнительная задача в других типах экспериментов) 6. Эксперименты с высокоэнергетичными нейтрино (нейтринные телескопы) а также эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета-распада. Эксперименты первых четырех типов были предложены еще Б.М. Понтекорво для поиска доказательства нейтринных осцилляций.