

## 7. СПОСОБЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРИНО

### 7.1 Особенности детектирования нейтрино

Поток нейтрино, детектируемых на Земле, характеризуется тем, что: 1) можно выделить несколько типов нейтрино по энергии, соответственно различаются и методы детектирования, наиболее чувствительные к разным типам нейтрино; 2) поток почти беспрепятственно пересекает вещество, включая Землю, поэтому нейтрино долетают до детектора как днем – сверху, так и ночью – со стороны Земли. К тому же поток не отклоняется магнитными полями, а, следовательно, можно точно определить его источник; 3) поток имеет относительно слабую интенсивность по сравнению с другими частицами.

Для большинства нейтринных детекторов справедливо следующее:

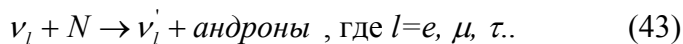
1) каждый детектор приспособлен для детектирования одного типа нейтрино – это как правило нейтрино определенного типа от определенного источника; 2) детекторы находятся глубоко под Землей (~ 1 км) или под водой для защиты от фонового излучения; защита необходима от существующих источников нейтрино на Земле, а также естественного радиационного фона Земли; 3) детекторы имеют большие размеры для набора достаточной статистики в виду малого сечения взаимодействия нейтрино и, соответственно, сравнительно малое число регистрируемых событий; типичное значение - от нескольких сотен или до нескольких тысяч в год. Скорость захвата нейтрино зависит от реакции детектирования и от энергии нейтрино. 4) одной из важнейших задач является борьба с фоном - многослойное экранирование детектора от внешних излучений, в частности атмосферных мюонов, обеспечение радиационной чистоты используемых материалов, детектирующего вещества, детектирующего оборудования, в частности ФЭУ.

Существуют три способа детектирования нейтрино: 1. Радиохимический; 2. Рассеяние нейтрино на электронах; 3. Поглощение нейтрино – прямой счет. Радиохимические детекторы различаются по используемому в них активному веществу, в котором взаимодействует нейтрино: хлорные, галлиевые. Нейтринные детекторы, основным процессом в которых является рассеяние на электронах, различаются в зависимости от вещества детектора, а также способа детектирования электронов рассеяния: черенковские, сцинтилляционные, на время-пролётные. Иногда используются также реакции поглощения, в которых в зависимости от того, через какие токи идет реакция – заряженные или нейтральные – реакция может быть чувствительна либо только к электронным нейтрино, либо ко всем ароматам нейтрино. А это в свою очередь позволяет найти прямое экспериментальное подтверждение нейтринных осцилляций.

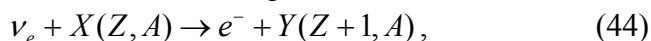
Реакции с заряженными частицами можно записать в общем виде следующим образом:



реакции с нейтральными токами:



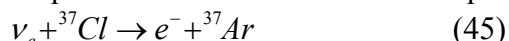
В основе любого радиохимического метода лежит реакция вида:



в которой образуется нестабильное ядро Y. Радиоактивный распад ядра Y используется для детектирования солнечных нейтрино. Любой радиохимический метод характеризуется невозможностью прямого подсчета регистрируемых нейтрино. Здесь сначала происходит накопление данных, – часть пролетающих сквозь детектор нейтрино реагирует с веществом детектора, в детекторе происходит накопление продуктов реакции. После окончания набора данных с помощью химических методов продукты реакции с нейтрино извлекаются из вещества детектора и подсчитываются. Радиохимические методы не дают информации о направлении прилета нейтрино. Детекторы прямого счета, использующие реакции рассеяния и поглощения, лишены этих недостатков.

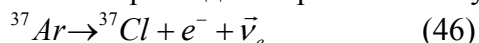
### 7.2 Хлорный детектор (радиохимический способ)

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



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

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

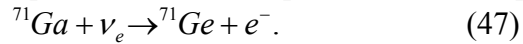


При захвате  ${}^{37}\text{Ar}$  атомарного K- или L- атомарного электрона на освободившееся место переходят электроны внешних оболочек, что приводит к испусканию оже-электронов с определенными энергиями и рентгеновскому излучению. Аргон не вступает в реакцию с другими веществами и поэтому легко выделяется из смеси. Первым удавшимся экспериментом, основанным на реакции Понтекорво, был эксперимент по исследованию тождественности нейтрино и антинейтрино. Следующим опытом с данной реакцией стала

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

### 7.3 Галлиевый детектор (радиохимический способ)

Для регистрации низкоэнергетичных нейтрино пользуются тем, что при взаимодействии низкоэнергетичных нейтрино с атомом галлия образуется атом германия. Реакция поглощения нейтрино изотопом галлия  $^{71}Ga$  с образованием радиоактивного германия идет с порогом всего лишь 0,233 МэВ.



В реакции образуется радиоактивный изотоп  $^{71}Ge$  с  $T=11,4$  дней, который химическими методами переводится в  $GeH_4$ . А после этого число атомов германия измеряется пропорциональным счетчиком. Галлиевый детектор имеет очень низкий порог регистрации нейтрино (233 кэВ) и поэтому он чувствителен ко всем типам солнечных нейтрино, в том числе и к основному потоку солнечных нейтрино – р-р нейтрино.

### 7.4 Черенковский детектор (реакции рассеяния на электронах)

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

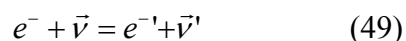


Регистрация образовавшихся фотонов позволяет получить информацию о нейтринном событии. Данный способ детектирования является прямым, т.к. фиксируется непосредственно выбивание электрона. Эта методика позволяет регистрировать все ароматы нейтрино, но максимально она чувствительна к электронным нейтрино. Ее достоинство достаточно точное определение откуда прибыло нейтрино, так как вылетевший электрон сохраняет направление движения нейтрино. Граничная энергия регистрируемых нейтрино 5-8 МэВ в зависимости от строения детектора. Граничная энергия определяется тем, что выбитый из атома электрон должен лететь со скоростью, большей скорости света в воде для того, чтобы излучать черенковский свет. Немаловажным достоинством данного метода является дешевизна основного вещества детектора - воды, причем вода в установке выступает как в качестве мишени, так и в качестве детектора. Использование воды приводит к низкому фону, т.к. не представляет сложности найти достаточное ее количество с минимальной концентрацией радиоактивных веществ. Детектирование по черенковскому излучению позволяет легко отсеять все фоновые события, связанные с альфа-частицами низких энергий. Кроме того, эксперименты по рассеянию позволяют точно определить время прилета частицы, что имеет важное значения в случае нестационарного источника нейтрино для поиска корреляций нейтринных событий с характеристиками этого источника. Энергетическое распределение вылетающих электронов в реакции (48) отражает спектр падающих нейтрино, что важно при детектировании солнечных нейтрино.

Реакции по рассеянию выгодно отличаются от радиохимического метода детектирования, позволяющего определить только скорость счета нейтрино. Но у данного метода есть и свои недостатки. Нет точного способа определения, было ли вызвано регистрируемое событие нейтрино или другой нейтральной частицей, способной рассеяться на электроны. Необходимость уменьшения фона является еще одной причиной высокой пороговой энергии черенковского детектора. Поэтому из всего спектра солнечных нейтрино черенковский детектор чувствителен только к борным и рер-нейтрино. Этот факт, а также то, что получающееся эффективное сечение рассеяния нейтрино мало по сравнению с эффективным сечением поглощения на наиболее подходящих поглотителях, приводит к низкой скорости счета нейтрино.

### 7.5 Сцинтиляционный детектор (реакции рассеяния на электронах)

Как и в случае черенковского детектора основной реакцией такого счётчика является реакция рассеяния нейтрино на электронах:



В качестве вещества детектора используется ультрачистая сцинтиляционная жидкость. Детектирование происходит во вспышкам в сцинтиляторе, вызываемым электроном рассеяния. Преимуществом сцинтиляционной технологии является ее высокая светимость: она превышает в 50 раз светимость черенковского излучения и она чувствительна к событиям с энергиями вплоть до 50 КэВ. Поэтому энергетический порог сцинтиляционного детектора можно сделать ниже, чем порог черенковского

детектора. В частности, с помощью сцинтилляционного детектора предполагается детектирование бериллиевых нейтрино (0,861 МэВ). Недостатком данного способа детектирования является невозможность определения направления движения исходного нейтрино по направлению движения образовавшихся сцинтилляционных фотонов, более высокая стоимость вещества детектора. А в случае детектирования низкоэнергетичных нейтрино кроме того налагаются более строгие требования к радиационной чистоте материалов, используемых для построения детектора.