

Московский Государственный Университет  
им М.В. Ломоносова  
Физический факультет

Курсовая работа на тему:  
Методы регистрации нейтрино. Черенковский метод.

Куликовский В.А.

Научные руководители:  
доктор физико-математических наук профессор Ишханов Б.С.  
кандидат физико-математических наук ассистент Широков Е.В.

2006 год

## Можно ли использовать нейтрино для исследований Вселенной?

Открытие того факта, что вне Земли происходят реакции, в результате которых рождаются нейтрино высоких энергий ( $> 100\text{МэВ}$ ), позволило найти достойную замену прежним методам исследования Вселенной. Дело в том, что сечения поглощения в среде у нейтрино гораздо меньше, чем у фотонов и, в отличие от протонов, они не имеют заряда, следовательно, не меняют своей траектории из-за магнитных полей в космосе. Поэтому нейтрино могут доносить информацию от более удаленных объектов и с большей точностью.

Возможные источники нейтрино высоких энергий – это:

- Активные галактические ядра (AGN)
- взрывы сверхновых
- остаточное свечение сверхновых

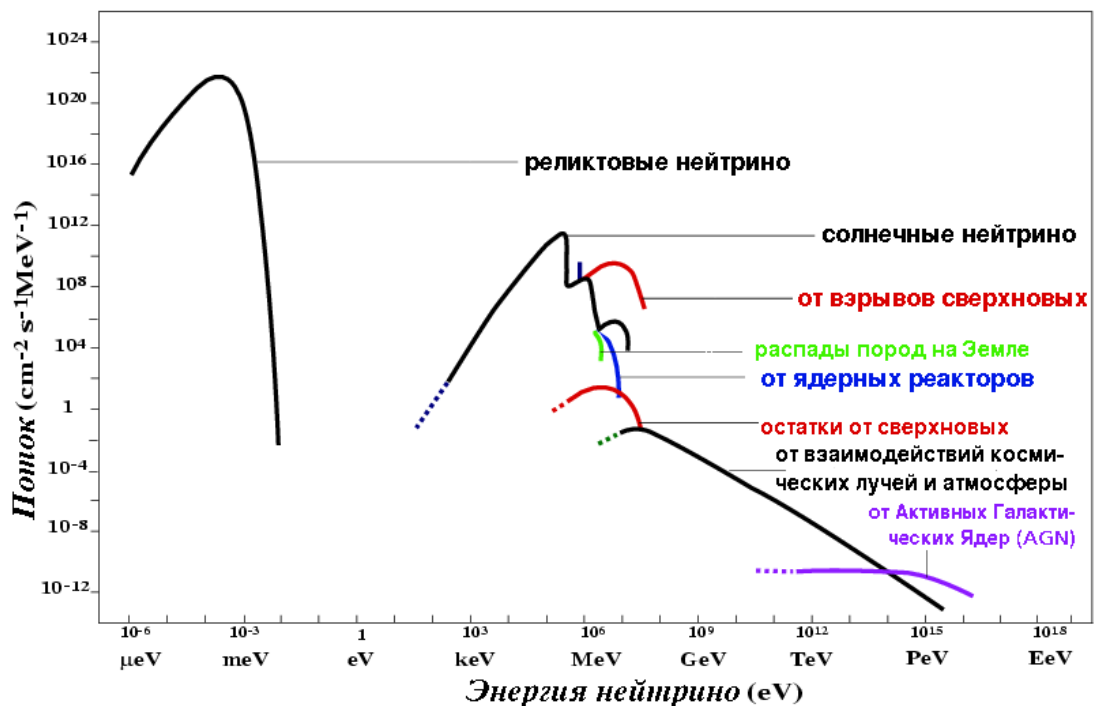


Рис1. Зависимость потока нейтрино от их энергии для различных источников.

Для регистрации нейтрино высокой энергии используются мюоны, получающиеся в результате реакции  $\nu + N \rightarrow \mu + X$ . Эти мюоны, в отличие от незаряженных нейтрино, излучают черенковский свет, который и регистрируется ФЭУ. Также существует акустический метод регистрации нейтрино, довольно активно развивающийся в последние годы.

Нейтрино и мюоны высокой энергии получают еще и в результате реакций с участием космических частиц в атмосфере Земли. Они являются нежелательным фоном. Один из способов его снижения – это погружение детекторов на большую глубину, а также направленный прием черенковского излучения ФЭУ. Как показывают измерения, фон от атмосферных мюонов на глубине в 3000 м в воде снижается в  $10^6$  раз.

Гайссер, Хальцен и Станев в 1995 году предсказали поток в 3 мюона, образованных нейтрино и летящих из недр Земли, в год с энергиями, большими 1 ТэВ с поверхности в

$1\text{км}^2$ . Сигнал от внеземных источников, как ожидается, должен превосходить фон от атмосферных нейтрино при энергиях больших  $10\text{ ТэВ}$ . Такие свойства фона, а также малые потоки нейтрино накладывают ограничения на размеры детектора, а также показывают необходимость в измерении направления и энергии нейтринных мюонов.

### Черенковское излучение.

Излучение черенковского света происходит, когда скорость света в веществе  $c/n$ , где  $n$  – показатель преломления среды, оказывается меньше, чем скорость частицы пролетающей в этой среде. Механизм возникновения черенковского излучения объясняется когерентным излучением диполей, возникающих в результате поляризации атомов или молекул среды под влиянием движущейся в ней заряженной частицы. Под действием электрического поля пролетающей заряженной частицы электронное облако атома смещается относительно ядра. Атом поляризуется. После удаления частицы из данной области атом возвращается в нормальное состояние. Переход атома в нормальное состояние сопровождается излучением. На самом же деле прохождение заряженной частицы через вещество не всегда сопровождается электромагнитным излучением. Если частица движется в среде сравнительно медленно, то поляризационный эффект, вызванный частицей в каждый данный момент времени, оказывается сферически симметричным относительно положения частицы. В этом случае излучение поляризованного атома будет гаситься излучением, испускаемым в противоположной фазе симметричным ему атомом.

Электромагнитные волны, возникающие в точках траектории  $A_1, A_2\dots$  будут когерентны, лишь распространяясь под углом  $\theta$ . Эти волны образуют волновой фронт ВС (см. Рис.2). Когерентность будет иметь место при условии, что частица проходит путь АВ за то же время  $AB/V$ , которое необходимо для распространения излучения из А в С.

$$\frac{A_1B}{V} = \frac{AC}{c/n}$$

отсюда следует соотношение:

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}, \text{ где } \beta = V/c \quad (1)$$

Это выражение является также и условием существования излучения (действительно, если  $V < c/n$ , то  $\cos\theta > 1$ ).

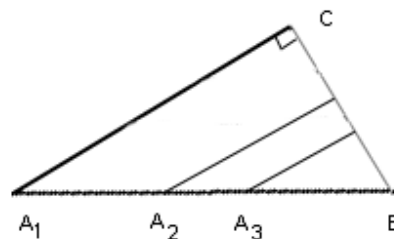


Рис.2 Фронт черенковского излучения.

Теория Тамма-Франка дает выражение для числа фотонов, испущенных в диапазоне энергии  $dE$ :

$$\frac{dN}{dE} = \frac{\alpha}{\hbar c} L \sin^2 \theta, \text{ где } L\text{-длина пути частицы, } \theta \text{ определяется из предыдущей формулы.}$$

Как видно из формулы, частица испускает свет во всем диапазоне. На самом же деле, диапазон излучения будет ограничен эффектами дисперсии и поглощения света

веществом. Черенковский свет собирается ФЭУ, которые чувствительны к свету в ограниченном диапазоне, который определяется формулой для квантового выхода фотокаатода.

Для телескопа важно не только зарегистрировать то, что частица пересекла объем детектора, но также нужно определить угол, под которым она пролетела через детектор, т.к. это важно для снижения фона (фоновые мюоны летят из атмосферы, а мюоны от нейтрино высоких энергий вылетают из земной коры), а также для идентификации источника в космосе. Для восстановления трека частицы используется большое число ФЭУ, которые работают на совпадение событий по времени. При определенном числе сработавших ФЭУ в какой-то области детектора начинается реконструкция трека.

В наше время существует сразу четыре проекта, которые должны работать в условиях малой плотности потока нейтрино и высокого фона на поверхности Земли.

Это проекты:

- ANTARES (Toulon) Франция
- БАЙКАЛ (озеро Байкал) Россия
- NEMO (Capo Passero) Италия
- AMANDA/ICE CUBE (Антарктида)

Некоторые из этих детекторов будут использовать помимо черенковского метода регистрации еще и акустический.

То, что сейчас существует сразу четыре проекта нейтринных телескопов, связано с тем, что в дальнейшем появится возможность сверить результаты, а также то, эти телескопы ведут направленный прием потока частиц (а именно по направлению внутренней нормали к поверхности Земли в месте расположения детектора), и, соответственно, одного детектора будет недостаточно для изучения всей небесной сферы.

Первые три детектора водные, т.к. вода обладает хорошей прозрачностью, а также в нее будет значительно проще погрузить детектор объемом примерно в кубический километр (такие большие размеры детекторов из-за малого потока высокоэнергетичных нейтрино, см. выше). AMANDA/ICE CUBE находится на Антарктиде в толще льда. Конфигурацию детектора в воде я рассмотрю для NEMO.

## **Детектор NEMO.**

Планируемое месторасположение: в 80км на северо-восток от Capo Passero (самая южная точка Сицилии). Это место обладает очень хорошими свойствами:

- высокая прозрачность воды (длина поглощения света – в среднем 70м)
- минимальные подводные течения (~3 см/с, max < 15 см/с)
- измеренные нормы отложения осадка и нормы загрязнения низки
- близко к порту, международному аэропорту, лабораториям (LNS)

Для детектора важно, чтобы сезонные колебания этих параметров также были минимальны. Также плюсом является то, что это довольно обширное плато с небольшими изменениями глубины, поэтому не возникнет проблем, если в дальнейшем наметится расширение детектора (например, добавление дополнительных башен с гидрофонами).

Планируемый объем детектора 0,88 км<sup>3</sup>.

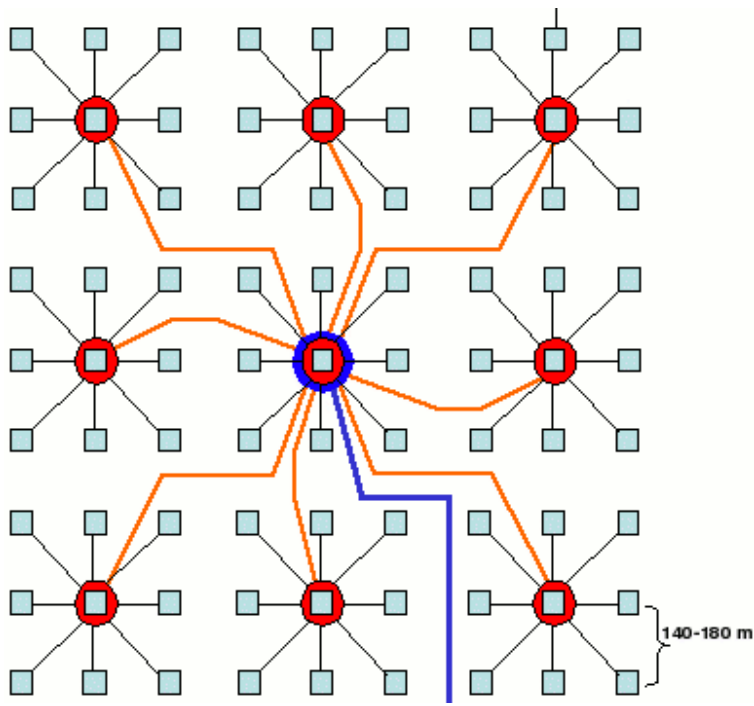


Рис.3 Конфигурация NEMO

На схеме квадратами обозначены башни (подробнее о них дальше) красные и синие линии – электрооптические кабели для передачи информации, красные кружки – соединительные коробки. Как видно из схемы, планируется опустить под воду 81 башню, на которых в общей сложности будет 5832 оптических модуля.

Башни (tower) – гибкая конструкция, состоящая из 16 консолей, соединенных между собой тросами. Снизу они крепятся к дну, а сверху растягиваются бум. Высота каждой около 750 м, причем расстояние между самым верхним и нижним ФЭУ порядка 600 м. Расстояние от нижней консоли до дна – 150м.

На каждой консоли крепится 4 ФЭУ по 2 с каждой стороны, причем один направлен вверх, а другой вниз.

До погружения конструкция довольно компактна – консоли прижаты друг к другу. После погружения буй начинает всплывать, тем самым натягивает тросы:

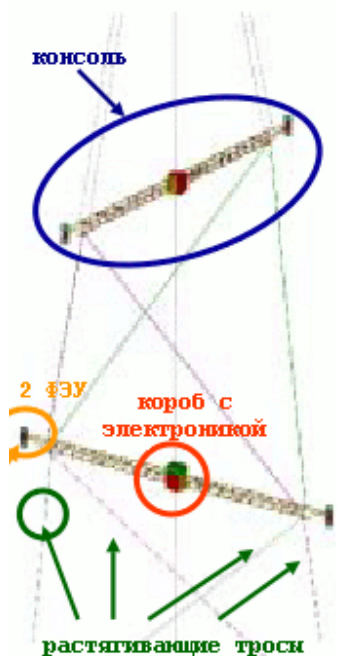


Рис. 4 Часть башни

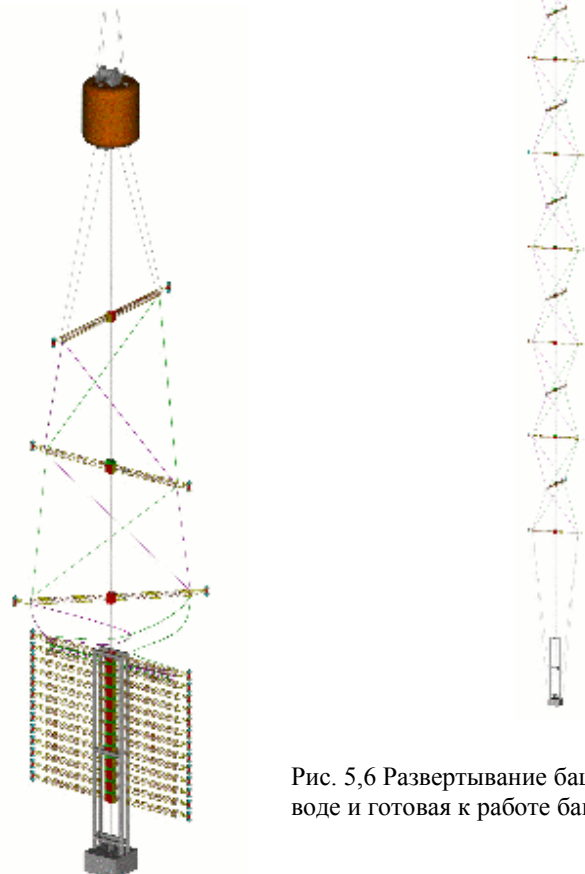


Рис. 5,6 Развертывание башни в воде и готовая к работе башня.

ФЭУ, которые планируется использовать в NEMO будут иметь следующие характеристики:

- диаметр фотокатода: 38см
- временное разрешение 2.5 нс
- квантовый выход 0.25
- работа на глубине ~3000 м



Рис.7 Тестовый образец ФЭУ для проекта NEMO.

Для того, чтобы началась обработка события, нужно, чтобы был сигнал по крайней мере от 5 ФЭУ. По координатам + времени сработавших ФЭУ восстанавливается траектория трека мюона.

Сейчас в проекте NEMO есть научная группа, которая занимается моделированием регистрации нейтрино с помощью будущего детектора на ЭВМ. Делается это, в частности, для того, чтобы выбрать наилучшую конфигурацию, в плане наибольшей эффективности регистрации частиц, а также меньшей себестоимости детектора. Оценка эффективности регистрации определяется отношением числа зарегистрированных частиц к полному числу смоделированных частиц. Эта величина зависит от энергии регистрируемой частицы. В мою работу в этом семестре входило построение графика зависимости эффективности регистрации от энергии частиц для одной из возможных конфигураций детектора. Конфигурация выглядела следующим образом: куб, состоящий из 10x10 башен с расстоянием между башнями 10 м. Башни состоят из 10 уровней, на каждом уровне по 3 ФЭУ, расположенных посередине башни и смотрящих вниз под углом 45 градусов по отношению к башне. При моделировании 20000 нейтрино с энергиями от 1 до 5000 ГэВ получилась следующая зависимость для эффективности регистрации:

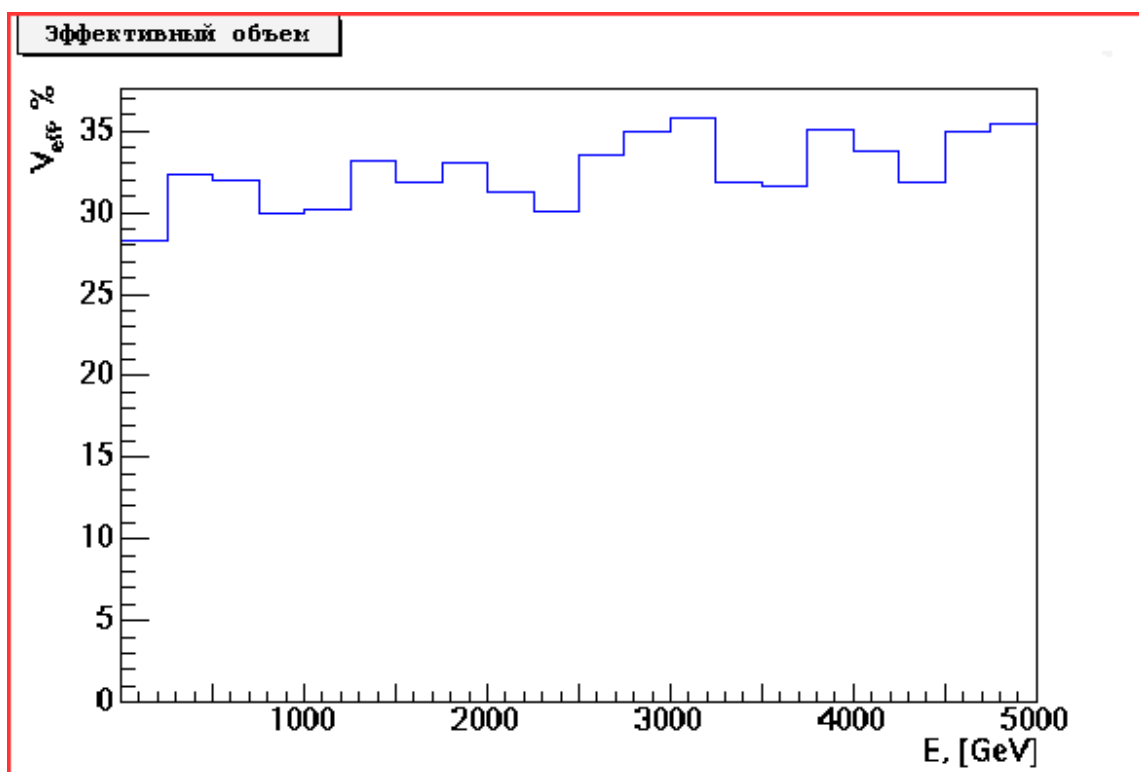


Рис.8 Зависимость эффективности регистрации для одной из возможных конфигураций NEMO.

Как видно из графика, эффективность регистрации составляет чуть больше 30 процентов и слабо зависит от энергии в этом диапазоне.

Список литературы:

Презентация: Status of NEMO project. E.Migneco 9 november 2005

Презентация: Toward a km<sup>3</sup> Neutrino Telescope in the Mediterranean Sea. M.Circella. nov 2005

Презентация: An underwater Cherenkov telescope in the Mediterranean Sea. The NEMO Collaboration.

Презентация: Perspectives of high energy neutrino astronomy. Paolo Lipari. 11 november 2005

Capabilities of an Underwater Detector as a Neutrino Telescope and for the Neutrino Oscillation Search. T. Montaruli 13 may 1999.

Лабораторная работа №6 (Черенковский детектор.)