

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«Оценка перспективных возможностей акустических детекторов
нейтринных телескопов большого объёма»**

Выполнил студент

413 группы

Бердышев Роман Владимирович

Научный руководитель:

к.ф. - м.н., доцент

Широков Евгений Вадимович

Допущена к защите

Зав.кафедрой _____

Москва

2022

Содержание

Введение	3
1. Нейтрино.....	6
1.1 Источники нейтрино	6
2.2 Методы детектирования нейтрино	8
2.3 Иерархия масс нейтрино и осцилляции нейтрино	12
2. KM3NeT	14
3. Акустический метод.....	17
3.1 История появления.....	17
3.2 Формирование акустического импульса.....	17
3.3 Звук в воде и обнаружение нейтрино	19
3.4 Шумы.....	21
4. Перспективы возможностей акустических детекторов KM3NeT	24
4.1 Преимущества акустических детекторов для обнаружения нейтрино.....	24
4.2 Акустические детекторы в роли позиционирования.....	25
4.3 Восстановление реального акустического сигнала	28
4.3 Биоакустика	31
Заключение	34
Список литературы.....	35

Введение

"...В микромире должно быть много неожиданностей. Но, без сомнения, удивительнейшая из всех элементарных частиц - это нейтрино. Самое характерное свойство нейтрино - его потрясающая проникающая способность".
Бруно Понтекорво. "Загадочные нейтрино"

Нейтрино – фундаментальная частица, лептон, является электрически нейтральной частицей и обладает очень малой массой и малой величиной сечения взаимодействия с веществом. Изучение этих частиц – одно из важнейших направлений в физике, поскольку оно делает возможным обнаружение эффектов, находящихся за рамками привычной Стандартной модели.

Чтобы спасти законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения в бета-распаде, В. Паули в 1931 г. выдвинул гипотезу нейтрино. Основная проблема состояла в том, что, несмотря на вполне определенные энергии начального и конечного состояния ядер, электроны бета-распада имели непрерывный спектр. Для обоснования такого эффекта Паули предположил, что вместе с электроном образуется еще одна частица – нейтрино, которая уносит часть энергии бета-распада. Паули предсказал свойства нейтрино, а также указал, что регистрация подобной частицы окажется весьма трудной задачей.

Он оказался прав – изучение свойств нейтрино потребовало специфических технических решений. Однако в итоге оно было изучено достаточно подробно. В частности, стало ясно, что нейтрино не является истинно нейтральной частицей, следовательно существует явная разница между нейтрино и антинейтрино. Так же не менее важной чертой является существование трех типов нейтрино – электронное, мюонное и таонное соответствующих трем заряженным лептонам. Закон сохранения лептонного заряда считается достаточно важным законом сохранения, а его нарушение приведет к выходу за пределы

Стандартной модели. Именно поэтому и проводятся многочисленные исследования в этой области.

Если задаться вопросом, какая научная задача на данный момент наиболее важна и фундаментальна, то ответ прост – та, решение которой сможет дать ответы на наибольшее количество самых актуальных вопросов современной науки. В физике элементарных частиц такой центральной задачей является природа нейтрино. Иначе говоря, свойства нейтрино, которые определяют специфику их взаимодействия с внешним миром, то есть их массы, характер их превращения друг в друга, количество типов различных нейтрино, имеют ли они электромагнитные свойства и т.д.

Это действительно важнейшая задача, охватывающая всю физику элементарных частиц, космологию и астрофизику. Наличие ненулевых масс у нейтрино важно для построения современных теорий элементарных частиц, понимания строения Вселенной и образования в ней крупномасштабных структур типа скоплений галактик. Изучение свойств нейтрино, в том числе и электромагнитных, необходимо для решения проблемы дефицита солнечных нейтрино, выяснения механизмов взрыва сверхновых и образования энергии в звездах и в недрах Земли, для понимания причин возникновения космических лучей сверхвысоких энергий. По-видимому, только благодаря исследованию потоков космических нейтрино можно будет получить информацию о самых отдаленных уголках Космоса. До сих пор не решена проблема реликтовых нейтрино, существование которых следует из современной концепции ранней Вселенной.

Нейтрино являются оптимальным объектом для наблюдения астрофизических явлений высокой энергии, поскольку они лишь слабо взаимодействуют с веществом и не отклоняются магнитными полями. Следовательно, они указывают на свое происхождение, могут преодолевать большие расстояния без поглощения и могут предоставлять информацию о процессах в плотных источниках, которые могут быть непрозрачными для электромагнитного излучения.

Открытие коллаборацией IceCube высокоэнергетического потока нейтрино внеземного происхождения открыло новое окно наблюдений за нашей Вселенной и положило начало новой эре нейтринной астрономии. Поиск галактических точечных источников нейтрино является одной из главных целей будущего нейтринного телескопа KM3NeT/ARCA.

Таким образом, без понимания свойств нейтрино невозможно даже приблизиться к ответу на вопрос о том, почему окружающий нас мир устроен именно так.

1. Нейтрино

1.1 Источники нейтрино

Нейтрино образуются повсюду: в звездах, в сверхновых, в результате Большого взрыва. Они образуются при гамма-всплесках и при взаимодействии космических лучей в атмосфере. Земля генерирует их в огромных количествах в виде радиоактивных элементов (в основном распада урана и тория), и мы генерируем их в ядерных реакторах и ускорителях. Их энергии варьируются от микроэлектронвольт для нейтрино, оставшихся после Большого взрыва, вплоть до петаэлектронвольт для нейтрино, образующихся в результате сильных гамма-всплесков во Вселенной. На Рисунке 1 показан прогнозируемый поток нейтрино в зависимости от энергии от различных источников [1]:

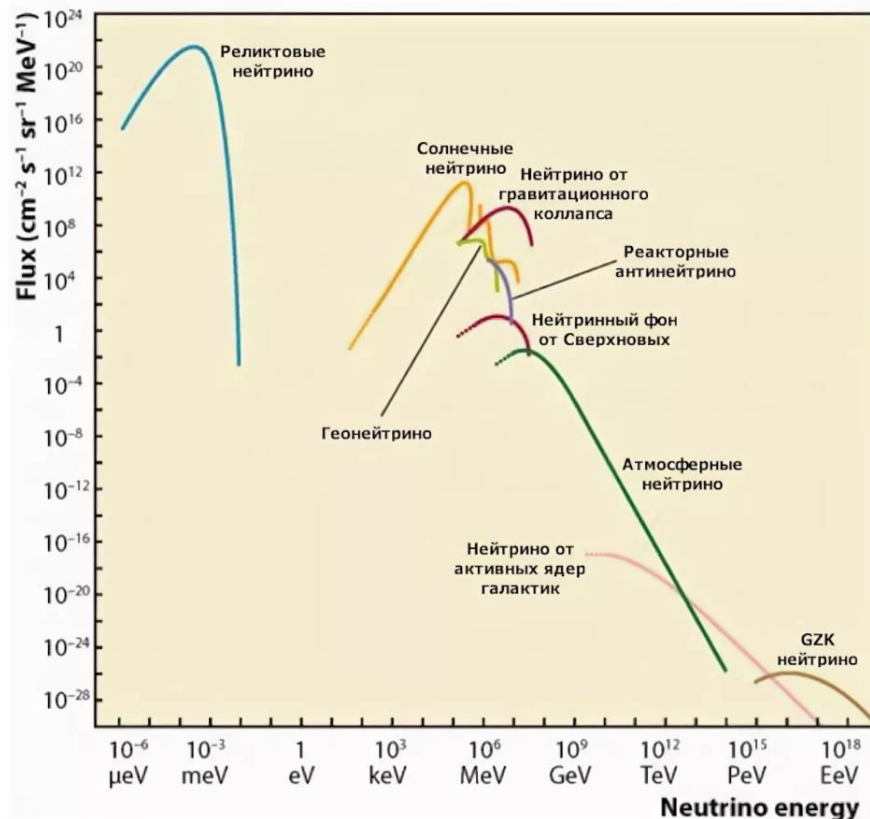


Рисунок 1. Энергии различных видов нейтрино

Подробнее разберём астрофизические источники нейтрино. Нейтрино не подвержены влиянию магнитных полей и взаимодействуют настолько слабо,

что могут свободно вытекать из областей, где фотоны были бы поглощены. Эти свойства делают нейтрино очень привлекательными в качестве средства исследования астрофизических явлений, которые иначе были бы невидимы для наземных детекторов. На самом деле настолько привлекательно, что изучение нейтрино из астрофизических источников само по себе является отдельной областью изучения - нейтринной астрофизикой. Производство нейтрино высокой энергии делится примерно на две категории: процессы ускорения и аннигиляции в сочетании с распадом тяжелых частиц [2].

Нейтрино, образующиеся в процессах ускорения. Некоторые астрофизические механизмы способны ускорять протоны до чрезвычайно высоких энергий (иногда более 10^{16} ГэВ). Предполагается, что нейтрино будут связаны с этими протонами посредством взаимодействия протонов с фоновыми фотонами или другими протонами, генерируя потоки мезонов высокой энергии: $p+p$, $p+\gamma \rightarrow \pi^0$, π^\pm , K^\pm .

Эти мезоны распадаются в полете на нейтрино. Нейтрино могут быть связаны либо с взаимодействием протонов с межзвездной средой и могут генерировать диффузный постоянный фон, либо с взаимодействием протонов непосредственно в области, окружающей источник (так называемые “точечные источники”). Некоторыми из возможных точечных источников, которые могли бы генерировать необходимые механизмы ускорения, являются [2]:

- Ускорение сверхновой: ускорение в расширяющейся оболочке сверхновой мертвой звезды. Механизмом ускорения является быстро вращающееся магнитное поле остаточной нейтронной звезды.

- Черные дыры и квазары: в двухкомпонентных системах материя может передаваться от большой расширенной звезды к сопутствующему компактному объекту, такому как черная дыра. Вещество образует аккреционный диск вокруг компактного объекта, который может образовывать мощные механизмы ускорения под воздействием вращающихся магнитных полей объекта.

- Активные ядра Галактик и Блазары: примерно 1% всех ярких галактик

содержит активное ядро, которое излучает энергию большей мощности, чем излучает Млечный Путь. Это ядро обычно сосредоточено в области размером соизмеримым с солнечной системой. Считается, что это излучение возникает в результате гравитационного высвобождения энергии, связанного с аккрецией сверхмассивных черных дыр, и может быть направлено в струях с мощными ударными ускорениями.

- Гамма-всплески: наиболее яркие из астрофизических событий, эти объекты затмевают сверхновую в тысячи раз по яркости, но длятся недолго (от миллисекунд до минут). Хотя и не совсем понятные, считается, что гамма-всплески возникают в результате коллапса ядра сверхмассивных звезд (так называемых “гиперновых”) или в результате столкновения нейтронных звезд, вращающихся по орбите в двухкомпонентной системе. Каким бы ни был механизм, гамма-всплески излучаются в виде коллимирующих струй, в которых легко могут образовываться нейтрино сверхвысокой энергии.

2.2 Методы детектирования нейтрино

Мы наблюдаем частицы в детекторах по тому, как они взаимодействуют с материей. Например, электрон наблюдается потому, что он изгибается в магнитных полях и может ионизировать газ в дрейфовых камерах из-за того, что он электрически заряжен. Наблюдение частицы зависит от того, обладает ли она каким-либо свойством, которое может взаимодействовать с окружающей ее материей: для большинства частиц это либо электрический заряд, либо масса. Нейтрино нейтрально, имеет очень малую массу и поэтому во всех отношениях невидимо. Наличие нейтрино определяется по частицам, которые оно оставляет после взаимодействия.

В качестве примера, если ν_μ квазиупруго рассеивается на нейтроне: $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$, то остается «видимый» заряженный мюон и протон. Если мы сможем восстановить эти треки, мы сможем сделать вывод о наличии ν_μ и даже показать, что взаимодействие было квазиупругим рассеянием,

проанализировав кинематику конечного состояния. Это наводит на мысль о том, что детекторы для обнаружения нейтрино должны быть с чрезвычайно высокой точностью наблюдения.

Другим ограничением является размер поперечного сечения взаимодействия нейтрино. Поскольку оно очень мало, необходимо строить большие детекторы с высокой массой взаимодействующего вещества, чтобы иметь достаточно большую частоту событий для проведения исследований. Существует четыре различных метода, используемых для обнаружения нейтрино [2]. Выбор конкретного метода зависит от ряда факторов, например, как много событий нужно наблюдать, какие энергии нейтрино, ароматы, какие типы взаимодействий и тд.

1. Радиохимический метод
2. Рассеяние нейтрино на электронах
3. Поглощение нейтрино

В свою очередь радиохимический метод подразделяется на:

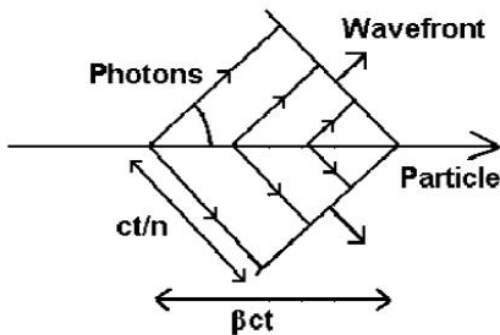
- хлорные
- галлиевые

Нейтринные детекторы, основным процессом в которых является рассеяние на электронах, различаются в зависимости от основного вещества детектора, а также способа детектирования электронов рассеяния:

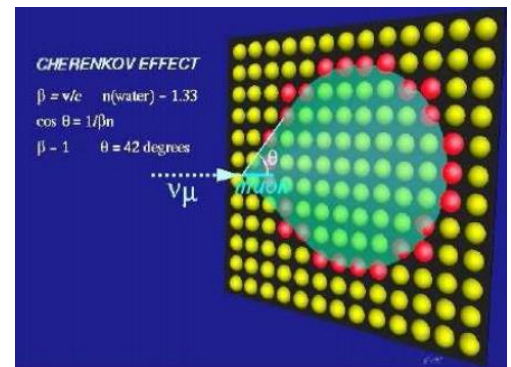
- черенковские
- сцинтилляционные
- на основе время-проекционной камеры

Детектор KM3Net – это водный детектор, основанный на черенковском методе обнаружения, поэтому подробнее разберем его. Когда заряженная частица движется в среде быстрее скорости света в этой среде, она излучает черенковский свет. Волновой фронт этого излучения представляет собой поверхность конуса, вершиной которого является частица, а осью – её траектория. Угол раствора конуса фиксирован и зависит от скорости частицы и показателя преломления среды [1]:

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}, \text{ где } \beta = \frac{v}{c}$$



а) Черенковский конус от мюона



б) Черенковский метод. Конус засвечивает круг на фотодатчике

Рисунок 2. Метод регистрации черенковского детектора

Если окружить цель световыми датчиками, конус будет обнаружен в виде круга света, как показано на Рисунке 2. По характеру попаданий можно восстановить направление и энергию частицы, образовавшей кольцо. Идентификация частиц намного сложнее, и в большинстве случаев (например, отличить мюон от пиона) практически невозможно. Однако электромагнитные частицы можно отличить от мюоноподобных частиц по форме контура кольца. Электромагнитные частицы имеют тенденцию рассеиваться в среде-мишени, что приводит к образованию нечетких колец, а не колец с острыми краями, наблюдаемых у мюоноподобных частиц. Два графика на Рисунке 3 показывают картину, наблюдаемую в детекторе Super-Kamiokande для электроноподобной (сверху) и мюоноподобной (снизу) частицы [2]. Поскольку весь метод

обнаружения основан на прохождении света через среду-мишень, среда должна быть очень прозрачной. Вещества мишени также должно быть много, чтобы обеспечить достаточную массу, поэтому для практического использования он должен быть относительно дешевым. Лучшим материалом-мишенью для детекторов такого типа, как правило, является вода. Недостатком детектора этого типа является то, что он не может обнаружить нейтральные частицы или заряженные частицы ниже черенковского порога. В дальнейшем, как правило, приходится реконструировать кольцевую картину. Это легко для событий с одним кольцом и даже двух кольцевых событий, но по мере увеличения числа частиц увеличивается и количество колец, а сложность реконструкции значительно усложняет задачу. В общем случае только взаимодействия с низкой кратностью с двумя или тремя частицами могут быть надежно восстановлены.

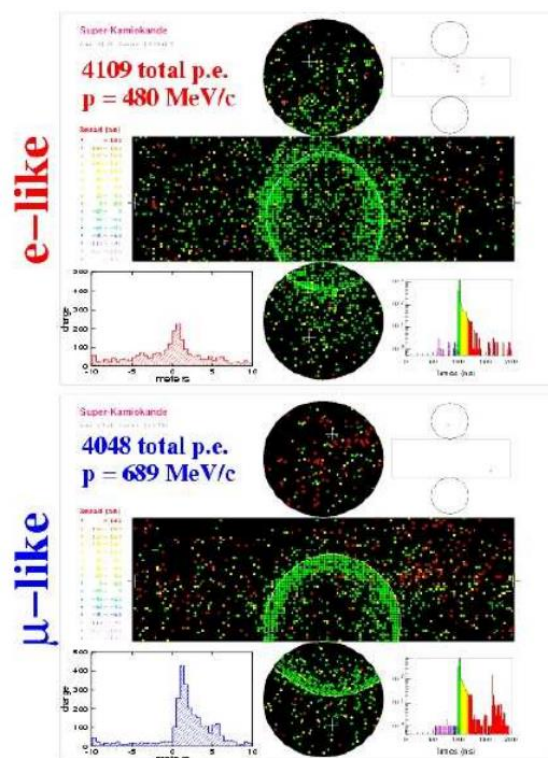


Рисунок 3. Вверху - схема попадания в детектор Super-Kamiokande от электроноподобной частицы, показывающая нечеткую кольцевую структуру. Внизу приведена схема попадания мюона, остановившегося в детекторе.

2.3 Иерархия масс нейтрино и осцилляции нейтрино

В Стандартной Модели предполагается, что масса нейтрино равна нулю. Прямые измерения массы нейтрино из слабых распадов дают только верхний предел этой массы. В 1957 г. Бруно Понтекорво показал, что доказательство ненулевой массы нейтрино можно получить, наблюдая осцилляции между различными типами нейтрино.

Идея нейтринных осцилляций очень проста. Представим себе, что какой-либо тип нейтрино, например, электронное ν_e является смесью двух видов нейтрино ν_1 и ν_2 с очень малыми, но различимыми массами m_1 и m_2 (для определенности будем считать $m_1 < m_2$). В этом случае пучок нейтрино ν_e (считаем, что все они имеют одинаковые импульсы) в момент образования возникает как совокупность пучков ν_1 и ν_2 , смешанных в определенной пропорции, отвечающей ν_e [3]. Тогда нейтрино ν_1 , имеющие меньшую массу, будут удаляться от точки образования с несколько большей скоростью, чем ν_2 , и поэтому будут постепенно все более опережать последние. Это приведет к изменению относительных долей ν_1 и ν_2 в пучке. Уже лишь из части ν_1 и ν_2 будет формироваться смесь, отвечающая ν_e . Если на пути этого измененного пучка поставить детектор, регистрирующий ν_e , то он зафиксирует исчезновение части электронных нейтрино. На каком-то расстоянии от источника их число станет минимальным, а затем начнет вновь увеличиваться и, наконец, достигнет исходного значения. При дальнейшем увеличении расстояния процесс будет периодически повторяться. Это и есть осцилляции нейтрино. Очевидно, что осцилляции невозможны, если все нейтрино имеют нулевые массы. Для их возникновения необходимо, чтобы хотя бы масса одного вида нейтрино была отлична от нуля. Таким образом, нейтринные осцилляции представляют собой периодический процесс изменения типа (аромата) нейтринного пучка.

Всего существует три аромата нейтрино – электронное, мюонное и таонное. Они являются смесью уже трех типов нейтрино ν_1 , ν_2 и ν_3 , которые имеют близкие по значению массы m_1 , m_2 и m_3 соответственно. При этом

измеряются квадраты разностей масс: $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$. Проблема иерархии масс заключается как раз в определении знаков разности квадратов масс нейтрино.

2. KM3NeT

KM3NeT - это крупная исследовательская инфраструктура, которая состоит из сети глубоководных нейтринных телескопов в Средиземном море. KM3NeT включает в себя два детектора с одинаковой технологией, но разной степенью детализации, KM3NeT/ARCA и KM3NeT/ORCA (Исследование астрофизических частиц и осцилляций космических лучей в пространстве, соответственно). В то время как KM3NeT/ORCA, установленный на площадке KM3NeT-France у побережья Тулона (Франция), будет изучать колебания атмосферных нейтрино с основной целью определения иерархии масс нейтрино, KM3NeT/ARCA будет посвящен астрономии нейтрино высоких энергий, включая исследование потока космических нейтрино, обнаруженного IceCube [4]. KM3NeT/ARCA устанавливается на площадке KM3NeT-Италия на шельфе Капо Пассеро (Италия) и будет иметь масштаб в кубический километр, подходящий для измерения нейтрино в диапазоне энергий ТэВ-ПэВ. KM3NeT/ARCA будет иметь более широкое и дополнительное поле зрения по отношению к IceCube. Одной из его основных целей является обнаружение галактических источников, видимых также при относительно низкой энергии около десятков ТэВ, для которых чувствительность IceCube к мюонным нейтрино низкая.

В KM3NeT нейтрино обнаруживаются путем измерения черенковского излучения, индуцируемого заряженными вторичными частицами, возникающими в результате взаимодействия нейтрино в морской воде, которая служит материалом-мишенью и излучателем Черенкова, а также экраном для нисходящих атмосферных мюонов. Свет регистрируется фотоумножительными трубками (PMT), расположенными в стеклянных сферах, которые выдерживают давление воды (цифровые оптические модули, DOMs). Каждый оптический модуль содержит 31,3-дюймовый PMT, оптимизирующий площадь фотокатода, направленную чувствительность и возможность подсчета фотонов. Цифровые оптические модули детектора KM3NeT/ARCA расположены вдоль гибких

струн общей высотой около 700 м. KM3NeT / ARCA будет состоять из двух строительных блоков по 115 струн каждый, по 18 DOMs на струну, расположенных вертикально на расстоянии 36 м. Каждый блок будет иметь примерно круглую площадь со средним расстоянием между струнами около 90 м. Два блока вместе будут охватывать измеренный объем около 1 км³. Они будут развернуты и закреплены на площадке Капо Пассеро, расположенной на глубине 3500 м, а также будут подключены к береговой станции с помощью 100-километрового электрооптического кабеля для питания и передачи данных между берегом и детектором [4].

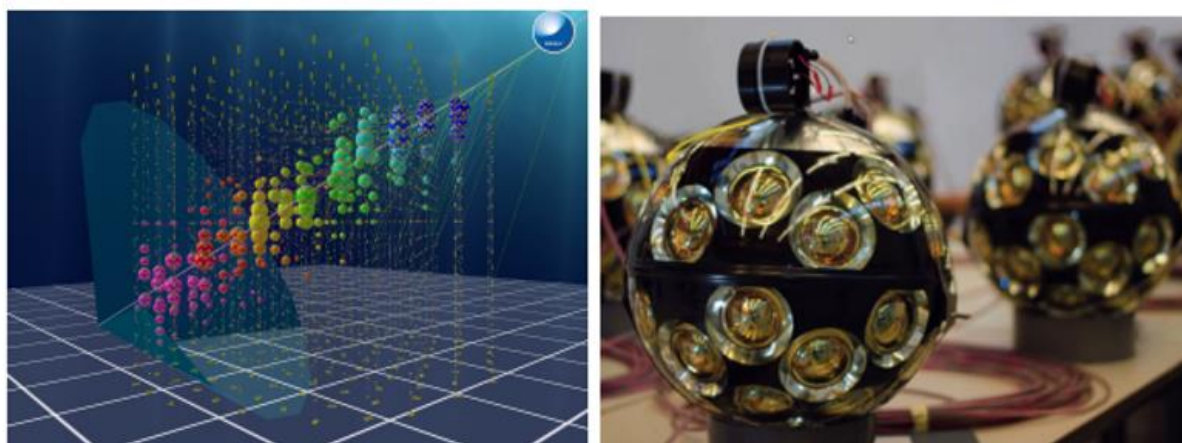


Рисунок 4. Визуализация сигнала в KM3NeT/ORCA; Цифровой Оптический Модуль эксперимента KM3NeT

Анализ фокусируется на взаимодействиях мюона и нейтрино с заряженным током, в результате чего в конечном состоянии образуется мюон высокой энергии. Благодаря длине пути мюона в воде до нескольких километров, направление мюона и, следовательно, – при достаточно высокой энергии нейтрино – направление нейтрино может быть измерено с хорошей точностью (см. Рисунок 4). Таким образом, такие трекообразные события вносят доминирующий вклад в чувствительность точечных источников. Основные фоны обусловлены атмосферными нейтрино и мюонами, образующимися при

взаимодействии космических лучей с ядрами в атмосфере. Чтобы исключить атмосферные мюоны, выбираются только события, реконструированные как восходящие или исходящие немного выше горизонта, поскольку Земля или пройденный наклонный слой воды поглощают все частицы, кроме нейтрино. Сигнал космических нейтрино наблюдается как избыток на фоне атмосферных нейтрино и оставшихся атмосферных мюонов, ошибочно реконструированных как восходящие.

3. Акустический метод

3.1 История появления

Акустический метод детектирования был предложен ещё в 1957 г. советским учёным Г.А. Аскарьяном, но до сих пор не получил эффективного практического применения. Аскарьян указал, что ионизация и кавитация, то есть образование пустот в жидких средах с последующим схлопыванием и высвобождением энергии, вдоль пути ионизирующей частицы через жидкость приводит к гидродинамическому излучению [5]. В 1960-х, 1970-х и 1980-х годах были проведены теоретические и экспериментальные исследования гидродинамического излучения пучков и частиц, проходящих через плотные среды [6]. Одним из широко обсуждаемых применений этого эффекта является обнаружение космических нейтрино сверхвысокой энергии ($E \geq 10^{18}$ эВ), то есть астрофизических нейтрино в плотных средах, таких как соль, лед, вода. Изотропный поток таких нейтрино ожидается от взаимодействия космических лучей высоких энергий с космическим микроволновым фоном [6]. В 1970-х годах эта идея обсуждалась в рамках проекта оптического нейтринного детектора DUMANDA и с тех пор изучается совместно с проектами черенковских детекторов нейтрино. Обнаружение нейтрино сверхвысоких энергий значительно сложнее, чем поиск нейтрино высоких энергий ($E \geq 10^{10}$ эВ), которым в настоящее время занимается черенковские нейтринные телескопы подо льдом и под водой. Из-за того, что ожидаемые потоки нейтрино очень малы, необходимо просматривать объём превышающий 100 км^3 для обнаружения взаимодействия. При этом особенности акустического метода позволяют использовать небольшое количество датчиков относительно других способов – около 100 датчиков на км^3 .

3.2 Формирование акустического импульса

Нейтрино, при взаимодействии с ядрами молекул воды, создают каскады адронных частиц. В результате в цилиндрическом объёме радиусом несколько

сантиметров и длиной несколько метров выделяется энергия, которая приводит к локальному нагреву среды, происходящему мгновенно по отношению к гидродинамическим временным масштабам. Это изменение температуры вызывает расширение или сжатие среды в зависимости от коэффициента температурного расширения. Согласно термо-акустической модели, ускоренное расширение нагретого объема — микровзрыв — формирует импульс давления биполярной формы, который распространяется в окружающей среде – см. Рисунок 5.

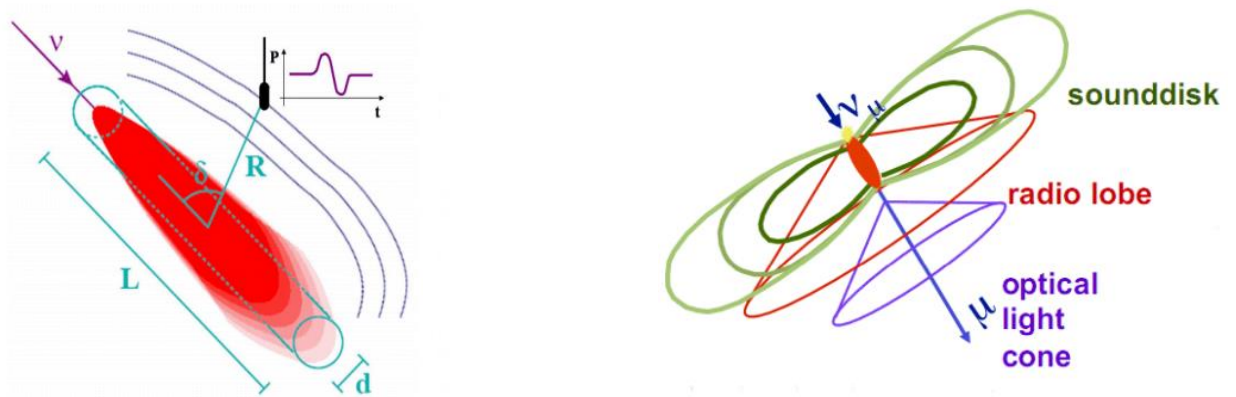


Рисунок 5. Формирование акустического импульса давления биполярной формы

Акустический сигнал точечного излучателя можно записать как решение дифференциального уравнения:

$$\vec{\nabla}^2 p' - \frac{1}{c_s} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{c_p} \frac{\partial \varepsilon(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Где α – коэффициент температурного расширения, c_s – скорость звук, c_p – удельная теплоемкость при постоянном объеме, ε – энергия ионизирующей частицы.

Выражение для отклонения давления p' от статического давления, полученное решением нелинейного дифференциального уравнения, записывается в виде:

$$p'(r, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\alpha}{c_p} \int_V \frac{dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varepsilon(\vec{r}', t')$$

С подробным выводом решения уравнения можно обратиться к источнику [7]. Давление, возникающее в результате взаимодействия частиц в среде, определяется пространственным и временным распределением энергии ε . Амплитуда, возникающей акустической волны определяется термодинамическими свойствами, c_s , c_p и α , которые в первую очередь зависят от температуры среды. Таким образом, контролируемое изменение этих параметров в лабораторных экспериментах и изучение результирующих сигналов давления позволяют точно проверить достоверность термо-акустической модели.

3.3 Звук в воде и обнаружение нейтрино

Для оценки потенциала обнаружения акустических нейтрино необходимо понимать два процесса: преобразование энергии, выделяемой при взаимодействии нейтрино, в обнаруживаемый акустический сигнал и ослабление результирующей звуковой волны в среде.

- Акустический сигнал:

Для упрощенного аналитического вывода можно предположить, что энергия ливня в плоскости, перпендикулярной направлению входящего нейтрино, описывается распределением Гаусса со стандартным отклонением σ_p . Если общая энергия, выделенная в адронном ливне, обозначается E_0 , то p_{\max} , то есть половина амплитуды от пика до пика биполярного импульса, измеренная как функция времени на фиксированном расстоянии в дальнем поле, задается следующей зависимостью [8]

$$p_{\max} \sim \gamma_G \frac{E_0}{\sigma_p}$$

где безразмерная величина $\gamma_G = \frac{c_s \alpha}{c_p}$ является параметром Грюнайзена, который зависит от скорости звука c_s , коэффициента температурного расширения

α и удельной теплоемкости при постоянном давлении c_p . На Рисунке 6 параметр Грюнайзена показан для нескольких водоемов. Для Средиземного моря его значение весьма благоприятно для обнаружения акустических нейтрино, в основном из-за его относительно высокой температуры $\approx 13^\circ\text{C}$ даже на большой глубине. Для озера Байкал параметр Грюнайзена невелик, поскольку в глубокой зоне озера температура воды всего на $1,5 - 2^\circ\text{C}$ выше максимальной плотности на соответствующей глубине, хотя в остальном оно хорошо подходит для обнаружения акустических нейтрино.

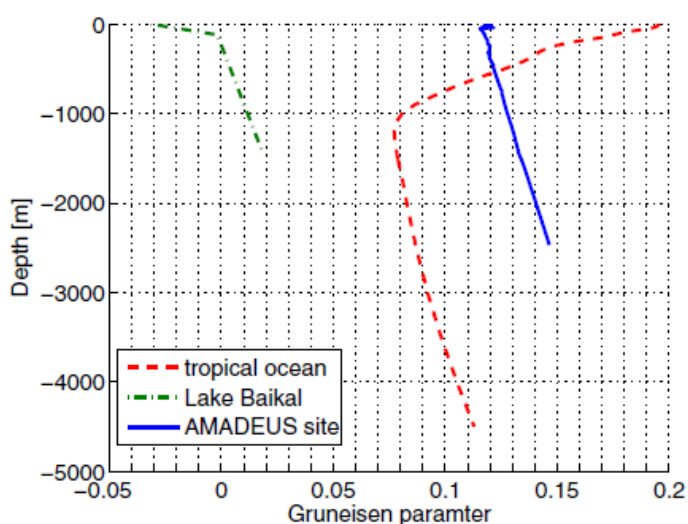


Рисунок 6. Параметр Грюнайзена для различных водоемов [8]

Параметр Грюнайзена отражает изменение температуры в зависимости от глубины в верхних слоях соответствующих водоемов. Для большей глубины, где температурный градиент становится небольшим, параметр Грюнайзена в основном соответствует изменению скорости звука, которая увеличивается почти линейно с глубиной из-за увеличения давления.

- Затухание:

Затухание в дистиллированной воде вызвано вязким поглощением и пропорционально квадрату частоты звуковой волны. Помимо этого, в морской воде затуханию способствует ионная релаксация химических соединений, растворенных в воде. Этот эффект обусловлен зависимостью процесса

ассоциативной диссоциации химических соединений от температуры и давления. Частотно-зависимое затухание звука в воде показано на Рисунке 7.

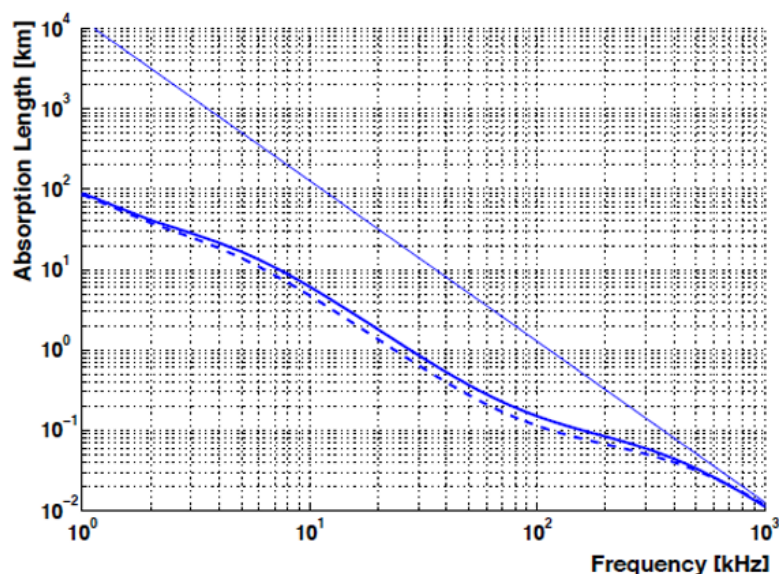


Рисунок 7. Длина поглощения звука в воде с температурой $T = 13,2$ °C, соленостью 3,8% и значением pH 8. Сплошная толстая кривая предназначена для глубины 2000 м, ломаная толстая кривая - для глубины 100 м. Прямая тонкая линия - это длина поглощения чистой воды на глубине 2000 м. [8]

Хотя NaCl является основным компонентом соли в морской воде, а сульфат магния $MgSO_4$ составляет всего 4,7% от общего количества растворенных солей в морской воде, последний доминирует в процессе поглощения на частотах выше нескольких кГц, примерно до 100 кГц, то есть в области, имеющей отношение к акустическому обнаружению. Длина поглощения на участке AN-TARES составляет около 5 км при частоте 10 кГц, по сравнению с примерно 100 км для дистиллированной воды. Очевидно, что если условия обеспечивают параметры Грюнайзена эквивалентного размера, то пресная вода превосходит морскую воду для обнаружения акустических нейтрино, поскольку она позволяет исследовать больший объем с тем же количеством датчиков.

3.4 Шумы

Чтобы оценить потенциал обнаружения акустических нейтрино в данном естественном водоеме, необходимо исследовать окружающий шум и

переходный фон на объекте. Инфраструктура KM3NeT позволит проводить исследования по обнаружению акустических нейтрино в объеме нескольких кубических километров морской воды [9]. Нейтринный телескоп KM3NeT будет содержать огромный набор акустических датчиков для калибровки положения, но которые могут быть использованы для дальнейших исследований обнаружения нейтрино.

Исследования условий в Средиземном море, проведенные в ходе экспериментов OvDE и AMADEUS, являются основой моделирования для KM3NeT и за его пределами. Окружающий шум является широкополосным и в основном вызывается волнением морской поверхности, т.е. дождем, ветром, разбивающимися волнами, брызгами и кавитациями. Энергетический порог для обнаружения нейтрино определяется преимущественно окружающим шумом. В экспериментах OvDE и AMADEUS было измерено, что окружающий шум низкий и стабильный, и было установлено, что он в целом благоприятен для работы детектора акустических нейтрино [8]. Сигналы переходного шума имеют короткую длительность и амплитуду, превышающую уровень окружающего шума.

Когда эти сигналы имеют биполярную форму, они могут имитировать импульсы от нейтринных взаимодействий. Источниками таких сигналов могут быть судоходство или морская фауна. В частности, дельфины излучают короткие сигналы со спектром, аналогичным спектру акустических излучений от нейтринных взаимодействий. Переходный фон, измеренный на площадке ANTARES, имеет относительно высокую частоту. Важно полностью уменьшить этот фон, чтобы измерить ожидаемые низкие потоки нейтрино сверхвысоких энергий.

Сильное снижение фона уже достигнуто с помощью методов, разработанных совместно с AMADEUS. Алгоритмы машинного обучения используются для идентификации биполярных импульсов. Кроме того, события, которые пространственно и временно сгруппированы, отбрасываются, поскольку

нейтрино вряд ли будут генерировать несколько сигналов из одной позиции за короткий промежуток времени. Для дальнейшего уменьшения важно использовать форму блина сигнала в качестве критерия выбора. С AMADEUS это невозможно из-за его небольших размеров - такие исследования можно проводить с помощью акустической решетки детектора KM3NeT.

Чтобы уменьшить объем записываемых данных, система AMADEUS использует триггер онлайн-распознавания формы импульса, который чувствителен к биполярному импульсу, ожидаемому от взаимодействий нейтрино. Этот триггер выбирает события с широким диапазоном форм. Улучшение онлайн-отбора может привести к снижению отношения сигнал/шум данных, доступных для автономного анализа, что станет важным шагом на пути к снижению энергетического порога для обнаружения нейтрино и, тем самым, повышению чувствительности потенциального будущего акустического нейтринного телескопа.

4. Перспективы возможностей акустических детекторов KM3NeT

4.1 Преимущества акустических детекторов для обнаружения нейтрино

Важным преимуществом акустических детекторов является то, что они способны детектировать нейтрино сверхвысоких энергий – более чем 10^{18} эВ. Это позволит расширить область изучения источников нейтрино. Для сравнения, для оптических детекторов диапазон измеряемых энергий нейтрино составляет лишь до 10^{17} эВ. С увеличением энергии нейтрино сечение обнаружения возрастает – см. Рисунок 8, но при этом уменьшаются и потоки нейтрино. Поэтому, используя несколько видов детекторов одновременно, можно значительно увеличить число регистрируемых нейтрино.

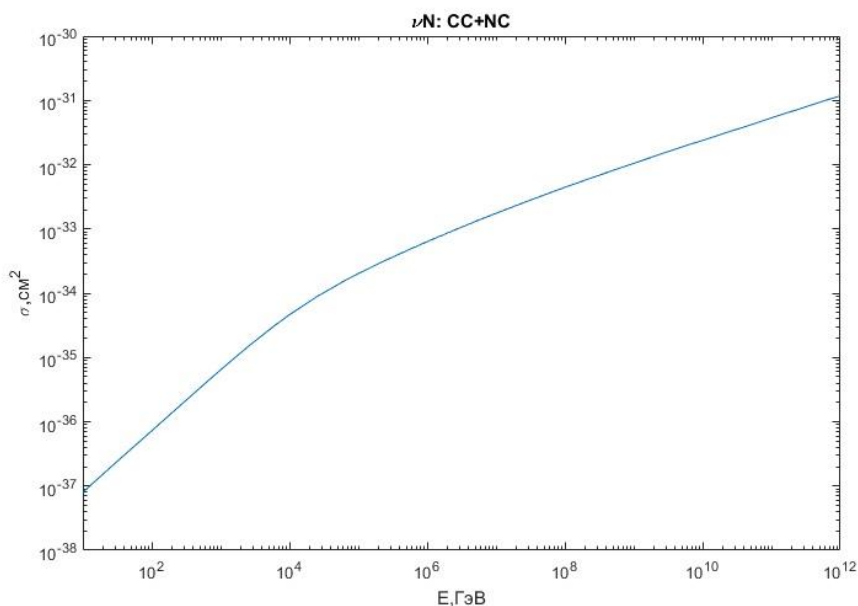


Рисунок 8. Зависимость сечения от энергии нейтрино

Ещё одним преимуществом является детектируемый объем. Из Рисунка 7 видно, что длина поглощения акустического сигнала для частоты 20-50 кГц в морской воде составляет около 1 км. Это примерно в 15 раз больше длины поглощения черенковского света, которая составляет порядка 60 м в морской

воде. Это означает, что с использованием акустического метода, можно в разы увеличить просматриваемый объем, задействуя то же количество детекторов.

Следующее преимущество заключается в том, что энергия акустического сигнала сконцентрирована в небольшом диапазоне углов к направлению распространения адронного ливня. Благодаря этому массив гидрофонов сможет производить регистрацию со всех сторон и точно реконструировать расположение ливня и его направления.

4.2 Акустические детекторы в роли позиционирования

Одной из основных задач акустических детекторов является фактически определение положения оптических модулей DOM и гидрофонов.

Основные детекторы KM3NeT классифицируются на два различных по типу устройства объекта – струны и башни, см. Рисунок 9. Все технические характеристики взяты с официального сайта эксперимента [9]. Каждая башня состоит из 8 этажей с длиной 8 м. Они располагаются на расстоянии 40 м друг от друга и оснащены 6 ФЭУ для оптического метода и 2 гидрофонами для акустического метода. Кроме этого, на башне установлены дополнительные датчики для измерения оптических свойств среды и мониторинга окружающей среды. Так, на 1 и 7 этаже установлены датчики для измерения солености, температуры, глубины – CTD. На 4 этаже установлен доплеровский датчик тока – DCS, предназначенный для измерения скорости звука в среде и скорости подводного течения. На 5 этаже установлен датчик для измерения ослабления синего цвета в морской воде – C-STAR. Струны же состоят из 18 этажей, имеющих по 1 оптическому модулю DOM на каждом этаже, с расстояниями 36 м между струнами. Для акустического метода в каждый DOM встроен пьезодатчик. Датчики для измерения оптических свойств и мониторинга среды установлены в DOM. Общая длина струны около 700 м.

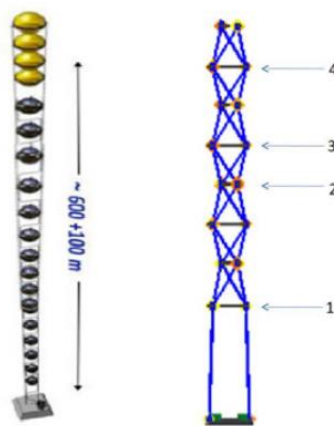


Рисунок 9. Струна и структура башни: 1 – CTD, 2 – DCS, 3 – C-STAR, 4 - CTD

Как уже говорилось, для детектирования акустических сигналов используются гидрофоны и пьезодатчики. Диапазон частот акустических сигналов, создаваемых высокоэнергетическими частицами, лежит в интервале от 1 Гц до 200 кГц. В KM3NeT используются гидрофоны с чувствительностью от 10 Гц до 70 кГц, а пьезодатчики способны детектировать сигналы с частотами до 125 кГц.

Еще одной важной составляющей является акустический автономный маяк (автомаяк). Они установлены на морском дне на расстоянии 400м от башни и в основании башни. Вместе с установленным на башне основанием они образуют длинную базовую линию – LBL акустической системы. Автомаяки предназначены для излучения акустического сигнала в системе позиционирования.

Для чего же нужно позиционирование, если все геометрические параметры башни и положения детекторов на них известны? Не стоит забывать, что башни и струны достаточно длинные, а среда, в которой они находятся перемещается во времени. Струны и башни жестко закреплены только у своего основания. Соответственно, при течениях верхние этажи будут сильно отклоняться от изначального положения. Для детектирования нейтрино важно знать точное положение детектора, иначе в восстановлении трека частицы будут большие погрешности. Поэтому особенно важно позиционирование детекторов.

На первом этапе эксперимента основной целью работы гидрофонов и пьезодатчиков будет определение местоположения каждого из элементов детектора. Для этого используется APS система, основанная на акустической триангуляции. Она состоит из гидрофонов, пьезодатчиков, то есть приемников, и автомаяков(излучателей). На приемниках будет происходить детектирование акустических сигналов, которые вырабатываются на длинной базовой линии (LBL) пятью фиксированными акустическими маяками, находящимся на морском дне, на расстоянии около 400 м от башни и в основании башни. Надо учитывать, что приемники тоже движутся вместе с механической конструкцией блока детектирования, следовательно, калибровка местоположения должна происходить в два этапа: первый — калибрует саму систему LBL, а второй — непосредственно несет ответственность за калибровку местоположения элементов детектора. Вся калибровка будет происходить не в режиме онлайн, а на берегу в оффлайн режиме, где данные со всех акустических приемников оцифровываются в открытом море на частоте 192 кГц с разрешением 24 бит и непрерывно передаются на берег.

Калибровка отклонений положений детекторов от их номинальных позиций осуществляется с помощью метода геометрической триангуляции по времени пролета сигнала – TOF. Его идея заключается в том, что берется система из трех объектов, которые располагают в виде треугольника, и измеряются длины сторон треугольника и его углы, см. Рисунок 10. Первоначальный треугольник формируется по номинальной позиции одного из детекторов и двух позиций, определенных по TOF. TOF для геометрической триангуляции определяется по формуле $TOF = TOA - TOE$, где TOA – время регистрации сигнала гидрофоном, TOE – время испускания сигнала автомаяком. После этого проводится несколько итераций по определению относительного положения детекторов. Количество итераций выбирается исходя из требуемой точности. Новые местоположения, определенные по расстояниям и углам между ними, записываются в базу данных. Чтобы получить время регистрации – TOA,

необходимо из акустического сигнала, зарегистрированного на гидрофонах и пьезодатчиках, выделить время прибытия сигнала.

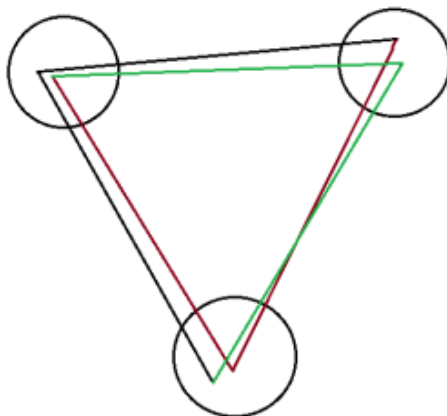


Рисунок 10. Метод геометрической триангуляции

4.3 Восстановление реального акустического сигнала

В акустическом методе самое важное это правильно анализировать и восстанавливать сигнал. У акустического сигнала есть множество источников, среди которых: высокоэнергетические частицы, те же нейтрино, морская живность (киты, дельфины и прочее), геодезические процессы, сигналы кораблей и подводок, а также сигналы от автомаяков. Все эти сигналы должны быть распознаны по таким характеристикам как: частота сигнала, длительность импульса, периодичность импульса, форма сигнала и другое. В данной работе рассматривается анализ акустического импульса с целью выявления сигнала от автомаяков, а также времени прилета сигнала, что нужно для последующей калибровки местоположения.

Реальные данные извлекались с официального сайта эксперимента KM3Net [10]. Данные брались с акустических детекторов за 2017 год. Всего имеется 15 наборов данных. Для обработки данных использовалась программная среда GNU Octave, использующая совместимый с MATLAB язык высокого уровня [11]. Octave был написан с учётом совместимости с MATLAB и реализует многие его возможности:

- матрицы в качестве основных типов данных;
- встроенная поддержка комплексных чисел;
- мощные встроенные математические функции и большие библиотеки функций;
- расширяемость, благодаря возможности создания пользовательских функций.

Кроме этого, Octave почти не уступает в производительности MATLAB, позволяет работать с большими данными, быстро обрабатывает данные, а также является бесплатной программной средой.

Данные изначально имеют звуковой формат, поэтому для обработки сигнала его необходимо преобразовать в текстовый формат. Для этого я написал функцию, которая принимает на вход звуковой файл формата .wav и на выходе выдает текстовый документ. В итоге получаем набор данных с частотой 192 кГц и разрешением в 24 бита, а каждому отсчету соответствует амплитуда акустического сигнала. После этого сигнал нужно привести к стандартному виду. В результате получаю:

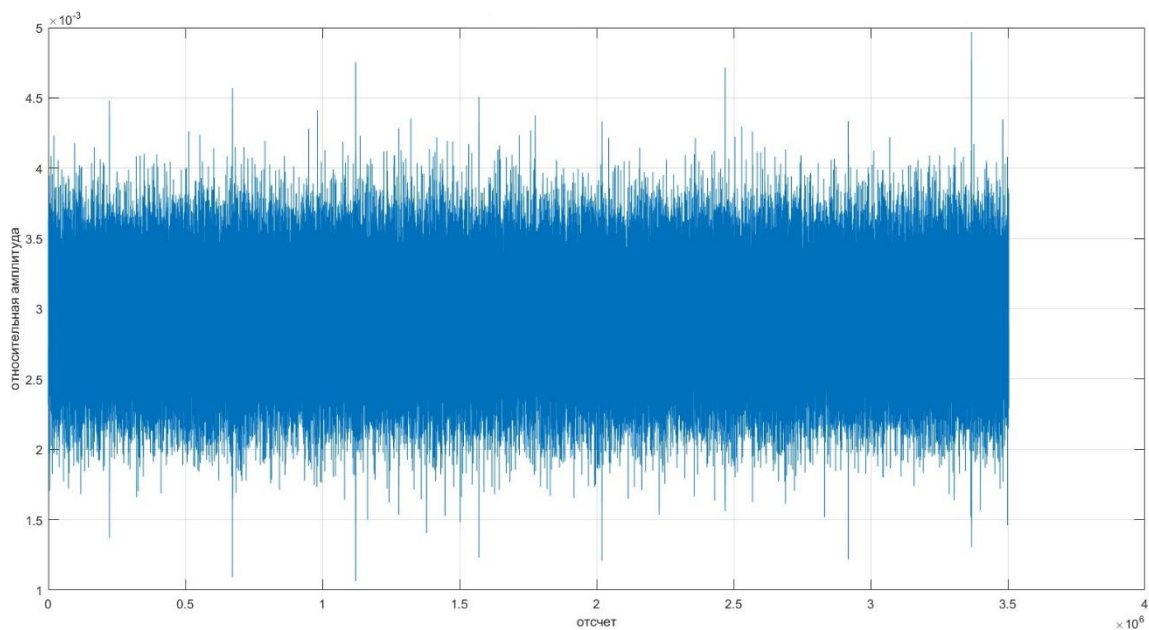


Рисунок 11. Исходный акустический сигнал

Для выделения нужного сигнала был использован метод корреляций. Он заключается в том, что исходный сигнал последовательно сравнивается с тестовым сигналом с необходимыми характеристиками. Для автомаяка этот сигнал имеет синусоидальный вид с длительностью 5 мс и частотой 38 кГц. Чтобы создать такой сигнал и провести корреляции использовалась следующая последовательность действий:

```
TimeBeacon = [0.:1/fs:0.005];
```

```
SignalBeacon = sin(2*pi*38000*TimeBeacon);
```

```
pkg load signal
```

```
for i = (1:length(InputData)-length(SignalBeacon)-1);A(i,:) = xcorr(SignalBeacon,  
    InputData (i:i+length(SignalBeacon)));end
```

На Рисунке 12 я выделил часть исходного сигнала после применения метода корреляций. Видно, что ненужные шумы исчезают и отчетливо выделяется необходимый сигнал.

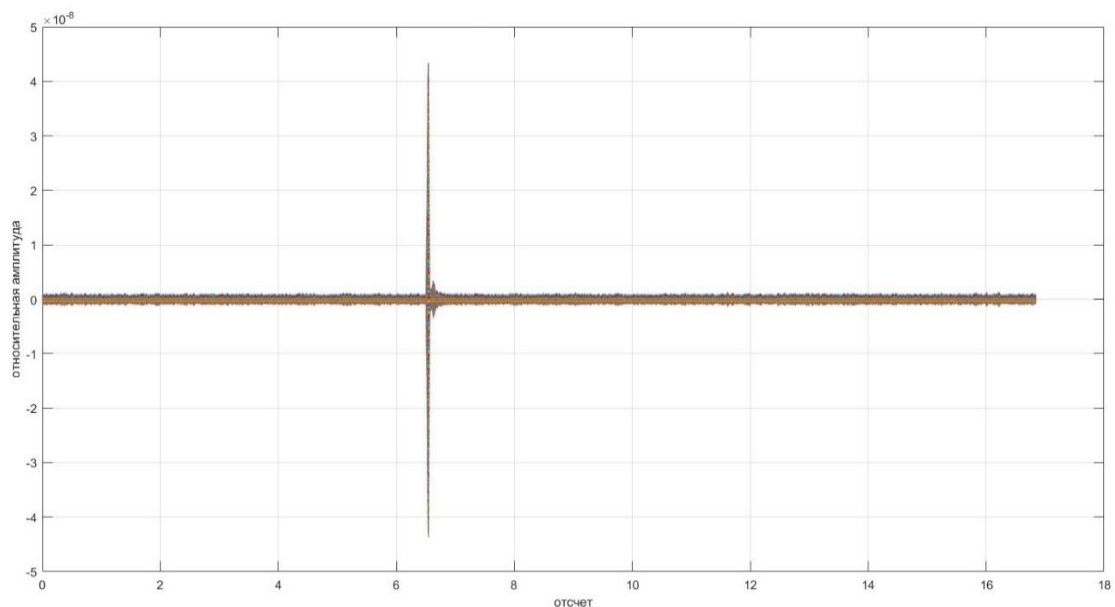


Рисунок 12. Исходный сигнал после применения метода корреляций

После корреляции необходимо выделить пики и определить время регистрации сигнала. Это и будет искомое ТОА, которое впоследствии может быть использовано для калибровки положения детекторов. В результате получим:

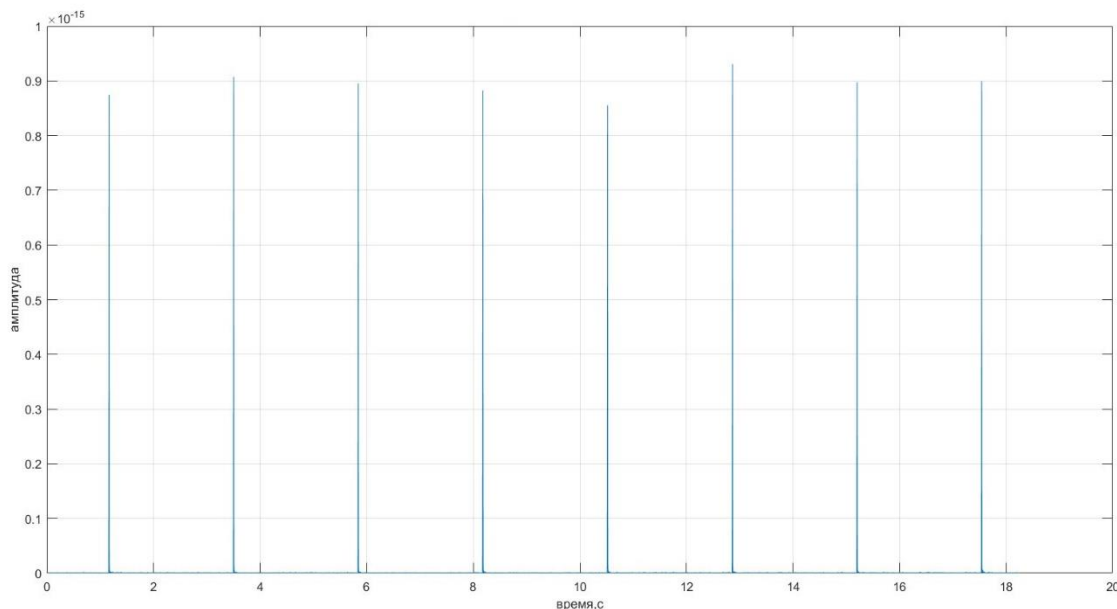


Рисунок 13. Сигнал от автомаяка

Из Рисунка 13 видно, что сигнал регистрируется приемниками и из него можно извлечь время регистрации. Таким образом, система автомаяков, гидрофонов и пьезодатчиков работает и позволяет выделять нужные сигналы из исходных, а также определять время регистрации сигнала.

4.3 Биоакустика

Помимо использования акустических детекторов для позиционирования, их могут использовать для исследования биоакустических сигналов на дне моря и улучшения понимания источников фонового шума в данных. Так, группа ученых из проекта “Deep Sea Hunter” анализировала сигналы с детектора, полученные 11 мая 2020 года [9]. Их задачей было классифицировать сигналы китообразных, обнаруженные гидрофонами детектора.

Из предварительного анализа было показано, что несколько особей, по крайней мере, двух видов, по-видимому, охотились одновременно в

непосредственной близости от КМЗNeT. Алгоритм машинного обучения иногда испытывает трудности с четкой идентификацией видов. Классификация, сделанная учеными, поможет улучшить модель идентификации, которая не была специально разработана для окружающей среды вокруг КМЗNeT. В конце концов, это позволит более точно идентифицировать виды китообразных на больших расстояниях и проводить более актуальные биоакустические исследования. Например, КМЗNeT поможет отслеживать и подсчитывать китообразных в Средиземном море в зависимости от вида и периода года, чтобы лучше понять жизнь китообразных (охота, миграция и т.д.), а также улучшить существующие системы предотвращения столкновений в реальном времени, чтобы избежать несчастных случаев в окрестностях КМЗNeT.

Имеющиеся данные содержат различные сигналы как от китообразных так и от шума самого детектора. Для целей классификации показаны различные изображения.

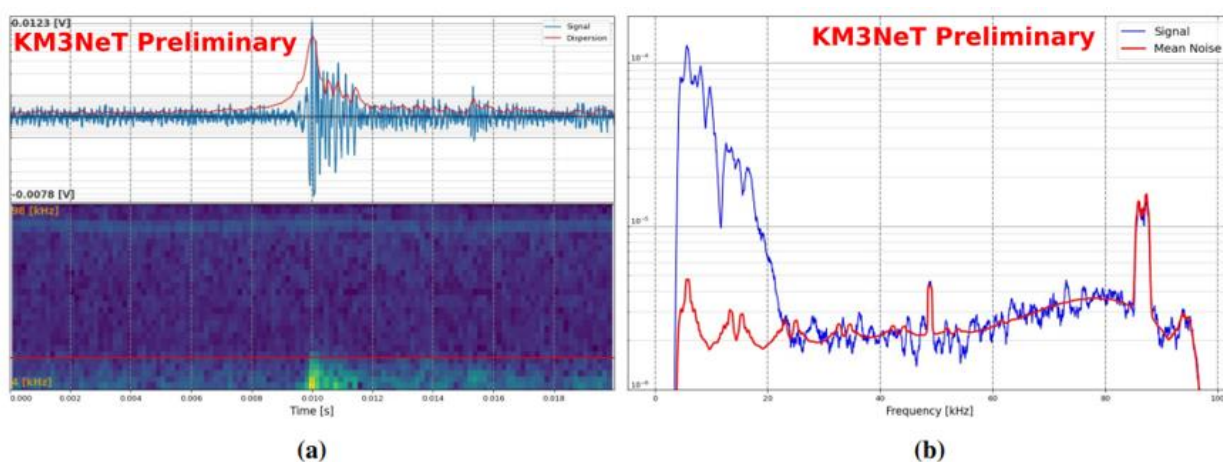


Рисунок 14. Акустический сигнал от морских обитателей

На Рисунке 14 представлен пример, который показывает два отдельных представления данных: слева - форма сигнала (Рисунок 13а), представляющая собой амплитуду в зависимости от времени, а справа - спектр (Рисунок 13б), представляющий собой частоту в зависимости от времени. На втором изображении показан спектр мощности полного рассматриваемого временного окна.

Ученых просят классифицировать то, что они видят на изображении, в одну из следующих категорий: кашалот, короткоперый кит-лоцман, чистый шум, другой вид или шум, созданный человеком.

Каждая классификация биоакустического рабочего процесса поставляется с тремя аудиофайлами:

- обработка точек данных ультразвуком с помощью программного обеспечения.
- аудиофайл, соответствующий истинному записанному звуку, без каких-либо изменений, чтобы ученые могли сравнить его с тем, что они видят в спектре (частоты выше ≈ 20 кГц не находятся в слышимом человеком диапазоне)
- аудиофайл, соответствующий истинному записанному звуку, но замедленный, чтобы ученые могли легче идентифицировать особенности звуков (которые по своей сути очень короткие), а также слышать частоты, которые находятся выше слышимого человеком диапазона.

Цель проекта Deep Sea Hunter - сравнить результаты классификации, проведенной учеными, с результатами инструментов машинного обучения KM3NeT, чтобы увеличить потенциал KM3NeT в нейтринной физике и астрономии, а также получить долгосрочные результаты в биоакустических исследованиях.

Заключение

В результате выполнения работы был изучен акустический метод детектирования, а также были рассмотрены перспективы возможностей и преимущества акустических детекторов на примере эксперимента KM3NeT. Основными способами применения акустических детекторов в первую очередь являются обнаружения нейтрино сверхвысоких энергий и использование акустического метода для системы позиционирования детекторов. Это крайне важные задачи, которые значительно увеличат количество регистрируемых событий и помогут точно восстанавливать треки регистрируемых частиц. Кроме этого, они могут быть использованы для проведения биоакустических исследований.

Был подробно изучен вопрос получения и обработки приходящего акустического сигнала от автомаяка с целью определения времени регистрации - ТОА, которое впоследствии используется для калибровки положений детекторов. Для этого была разработана программа в среде GNU Octave. Был проведен анализ на реальных данных. Для выделения нужного сигнала использовался метод корреляции, который заключается в последовательном сравнении приходящего сигнала с тестовым с заданными характеристиками. В итоге было проверено, что система функционирует и был построен график сигнала от автомаяка и найдено ТОА.

На данный момент эксперимент KM3NeT находится в стадии строительства и не завершен, но установлено восемь детектирующих единиц. Поэтому из-за малых потоков нейтрино, непосредственное их обнаружение с помощью акустических методов еще не ведется. Планируется закончить строительство первой фазы к 2030 году. В дальнейшем предполагается развивать акустическое детектирование и анализ нейтринных событий.

Список литературы

- [1] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino/index.html>
- [2] Neutrino Detectors and Sources November 25, 2020.
- [3] Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П. Частицы и атомные ядра. – М.: Едиториал УРСС, 2007. - 584 с.
- [4] The KM3NeT Collaboration, Sensitivity of the KM3NeT/ARCA neutrino telescope to point-like neutrino sources (2019), arXiv:1810.08499 [astro-ph.HE].
- [5] Аскарьян Г.А., Гидродинамическое излучение от треков ионизирующих частиц в стабильных жидкостях, Атомная энергия. Том 3, вып. 8 (1957).
- [6] R. Lahmann, G. Anton, K. Graf, J. Hößl, A. Kappes, U. Katz, K. Mecke, S. Schwemmer, Thermo-acoustic Sound Generation in the Interaction of Pulsed Proton and Laser Beams with a Water Target (2015), arXiv:1501.01494 [astro-ph.IM].
- [7] R. Lahmann, Ultra-High-Energy Neutrinos and Their Acoustic Detection in the Sea, Habilitation Thesis, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (2011).
- [8] R. Lahmann, Acoustic detection of high energy neutrinos in sea water: status and prospects (2018), arXiv:1811.11871 [astro-ph.IM].
- [9] <https://www.km3net.org/>
- [10] KM3NeT Web DB <https://km3netdbweb.in2p3.fr/default.htm>
- [11] Программная среда GNU OCTAVE <https://www.gnu.org/software/octave/index>
- [12] R. Le Breton, V. Bertin, P. Coyle, G. de Wasseige, H. Glotin, C. Guidi, F. Huang, S. Martini, A. Kouchner, C. Tamburini and V. van Elewyck, on behalf the REINFORCE Consortium and KM3NeT Collaboration, Inviting Citizen Scientists to analyse KM3NeT data (2021), PoS(ICRC2021)1392