

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М. В.  
ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

КУРСОВАЯ РАБОТА

Шишкина Василия Юрьевича

на тему «Перспективные методы детектирования нейтрино высоких энергий»

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., доцент Широков Е. В.

Заведующий кафедрой:

д. ф.-м. н., профессор Ишханов Б. С.

Москва

2020

# Оглавление

1. Введение. ....	2
1.1. Общие сведения о нейтрино. ....	2
1.2. История открытия и изучения нейтрино. ....	2
1.3. Нейтрино высоких энергий. ....	4
2. Метод на основе эффекта Черенкова-Вавилова. ....	5
2.1. Теоретическое описание. ....	5
2.2. Нейтринные телескопы, основанные на эффекте Черенкова-Вавилова. ....	7
2.2.1. Baikal-GVD. ....	8
2.2.2. KM3NeT. ....	9
2.2.3. IceCube. ....	10
2.3. Проблемы и перспективы метода. ....	13
3. Гидроакустический метод детектирования нейтрино. ....	13
3.1. Теоретическое описание. ....	13
3.2. Нейтринные телескопы, имеющие в составе гидроакустические устройства. ....	15
3.3. Проблемы и перспективы. ....	16
4. Детектирование нейтрино радио-методом. ....	16
4.1. Теоретическое описание. ....	16
4.2. Ограничения по аромату нейтрино. ....	17
4.3. GRAND. ....	19
4.3.1. Детектирующее устройство. ....	19
4.3.2. GRANDProto35 (2018). ....	19
4.3.3. GRANDProto300 (2020). ....	21
4.3.4. GRAND10k (2025). ....	21
4.3.5. GRAND200k (2030-е). ....	21
4.4. Проблемы и перспективы. ....	22
5. Заключение. ....	22
6. Список литературы. ....	22

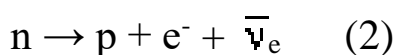
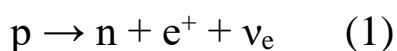
# 1. Введение.

## 1.1. Общие сведения о нейтрино.

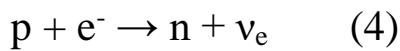
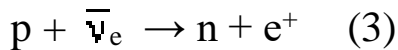
Нейтрино (итал. neutrino – нейтрончик, обозн.  $\nu$ ) – нейтральные фундаментальные частицы, относящиеся к классу лептоны и, соответственно, имеющие полуцелый спин и участвующие только в слабом и гравитационном взаимодействиях. Различают три аромата нейтрино – электронное, мюонное и таонное. Имеют очень малую массу, но не нулевую (верхняя граница – 0,28 эВ). Нейтрино всегда левополяризованы ( $h(\nu) = -1$ ), а антинейтрино правополяризованы ( $h(\bar{\nu}) = +1$ ). Отличительная особенность – крайне высокая проникающая способность при низких энергиях и значительное её уменьшение с её увеличением. При энергиях порядка 3 – 10 МэВ имеют длину свободного пробега в веществе порядка  $10^{18}$  м, что соответствует сечению реакции порядка  $10^{-20}$  барн. Практически все типы звёзд для нейтрино прозрачны. Наибольшая часть нейтринного потока на Земле излучается Солнцем.

## 1.2. История открытия и изучения нейтрино.

Гипотеза о нейтрино была выдвинута в 1930 г. В. Паули с целью разрешить парадоксы  $\beta$ -распада, в частности "нарушение закона сохранения энергии". В экспериментах, проведённых в 1914 г. Дж. Чедвиком, при переходе между двумя стационарными состояниями, ядра излучали электроны с произвольными энергиями вплоть до некоторого порогового значения; их спектр оказался непрерывным. Ни потерь энергии при вылете электронов из атомов, ни электромагнитного излучения не наблюдалось. Предсказанная Паули частица должна была уносить часть энергии и при этом быть слабо взаимодействующей, чтобы избежать обнаружения. По первичному предположению в ядре имелись лёгкие нейтральные частицы, которые Паули назвал «нейтронами», вылетающие вместе с электронами в процессе распада. Открытие в 1932 г. Чедвиком тяжёлого нейтрона показало, что нейтральная частица, находящаяся в ядре, и нейтральная частица, уносящая энергию в  $\beta$ -распаде – две разные. Имя последней («нейтрино») было дано Э. Ферми на Сольвеевской конференции в 1933 г., который после сформулировал квантовую теорию  $\beta$ -распада. Согласно теории Ферми, взаимодействие 4 частиц, участвующих в распаде, происходит в одной точке пространства одновременно. Эта теория объяснила основные черты  $\beta$ -распада (форму спектра, связь граничной энергии со временем распада) и т. о. явилась первым подтверждением гипотезы о нейтрино. Наряду с  $\beta^+$  (1) и  $\beta^-$  (2) распадами:



были предсказаны новые процессы с участием нейтрино: обратный  $\beta$ -распад (3) и электронный захват (4):



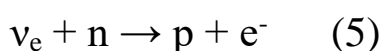
Ввиду малой массы и нулевого электрического заряда обнаружение нейтрино представлялось сложной задачей. Кроме энергии нейтрино должно уносить импульс. Первые эксперименты, проведённые в 1936 г. А. И. Лейпунским, дали лишь слабые указания на неколлинеарность импульсов электрона и конечного ядра в  $\beta$ -распаде. В 1938 г. А. И. Алиханов и А. И. Алиханян предложили исследовать отдачу ядра  ${}^7\text{Li}$  в реакции К-захвата:  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ , в которой импульс  ${}^7\text{Li}$  должен быть равен по величине и противоположен по направлению импульсу  $\nu_e$ . Эксперимент был осуществлён Дж. Алленом в 1942, и его результаты оказались в согласии с предсказаниями теории Ферми.

В 1956 г. К. Коуэн и Ф. Райнс впервые обнаружили антинейтрино. В эксперименте электронные антинейтрино, излучаемые ядерным реактором, участвовали в обратном  $\beta$ -распаде (3), излучался позитрон, который практически мгновенно аннигилировал с электроном среды, в качестве которой выступал водный раствор  $\text{CdCl}_2$ , при этом образовывалась пара гамма-квантов с энергией по 511 кэВ каждый. Нейтрон, рассеиваясь на водороде, замедлялся в течение 5-10 мкс и затем захватывался ядром кадмия; образовавшееся возбуждённое ядро  ${}^{109}\text{Cd}^*$  испускало гамма-кванты с энергиями 3-10 МэВ, которые, попадая в детекторы, давали вторую сцинтилляционную вспышку. Характерная цепочка событий, – две вспышки с интервалом 5 - 10 мкс, – позволяла достаточно надёжно выделить сигнал из фона.



**Рис. 1.** Схема установки в опыте Коуэна и Райнса.

Первое нейтрино было обнаружено в 1965 г. в одной из Южноафриканских шахт. Эксперимент проводился в специальном резервуаре глубиной 3 км. В основе лежала реакция обратного  $\beta^+$ -распада:



### 1.3. Нейтрино высоких энергий.

Проблемы регистрации нейтрино высоких энергий (космических нейтрино) относятся к нейтринной астрофизике. Одним из вопросов при исследовании астрофизических нейтрино является природа нейтрино сверхвысоких энергий (порядка  $10^{15}$  эВ и выше). В настоящее время существует множество моделей космологических объектов, способных разгонять нейтрино вплоть до энергий около  $10^{21}$  эВ, такие как активные ядра галактик, сверхновые, гамма-всплески, квазары и т. п. Однако изучение таких объектов затруднено крайне малыми потоками частиц соответствующих энергий, поскольку поток резко падает с увеличением энергии. Как следствие, имеется недостаток экспериментальных данных.

Ввиду электро-нейтральности, нейтрино не отклоняются под действием электромагнитных полей, присутствующих в межзвёздном пространстве. Вследствие малого сечения реакции ( $\sim 10^{-20}$  барн), они не взаимодействуют с другими частицами и не испытывают поглощения в среде. Тем самым поток нейтрино точно указывает направление на источник и несёт в себе неискажённую информацию о нём. В то время как оптическая астрономия изучает лишь поверхность объектов, нейтринная астрофизика позволяет заглянуть внутрь них, поскольку нейтрино имеют возможность покидать экстремально плотные ядра возможных источников. По этой причине изучение космических нейтрино крайне важно для развития астрофизики. Также регистрация далёких источников важна для исследования осцилляций нейтрино в вакууме.

Малое сечение взаимодействия с веществом создаёт определённые трудности в обнаружении нейтрино высоких энергий. Чтобы зарегистрировать столько редкие события, требуются гигантские объёмы детекторов. Поток нейтрино резко падает с увеличением энергии, однако возрастает сечение взаимодействия. При энергиях нейтрино свыше  $10^{15}$  эВ Земля для них становится непрозрачной. При энергиях порядка  $10^{21}$  эВ сечение возрастает до  $\sim 10^{-10}$  барн, что соответствует пробегу в воде около 100 км.

В случае нейтрино высоких энергий становится возможной регистрация не только дискретных источников нейтрино, но и диффузного потока, так как фон атмосферных нейтрино при таких энергиях значительно уменьшается. Регистрация диффузного потока позволила бы не только получать информацию о точечных источниках излучения и механизмах ускорения частиц в них, но и проверить ряд фундаментальных гипотез, например, существование порога ГЗК (эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина) [1] или массивных слабо взаимодействующих частиц, предсказываемых в моделях с топологическими дефектами. [2]

В настоящее время существуют и строятся несколько детекторов, расположенных глубоко под водой или в толще антарктического льда, объём которых достигает  $1 \text{ км}^3$ . Большинство нейтринных

телескопов, рассчитанных на нейтрино высоких энергий, используют методы регистрации, основанные на эффекте Черенкова-Вавилова.

Далее будут рассмотрены современные методы детектирования нейтрино высоких энергий. [3]

## 2. Метод на основе эффекта Черенкова-Вавилова.

Метод глубоководного детектирования нейтрино с использованием эффекта Черенкова-Вавилова был предложен в 1960 г. М. А. Марковым.

### 2.1. Теоретическое описание.

Заряженная частица, движущаяся в преломляющей среде со скоростью, превышающую скорость света, является источником черенковского излучения. Важнейшим свойством черенковского излучения является испускание черенковских фотонов под строго определённым углом  $\theta_C$  к траектории движения частицы в каждый момент времени из каждой точки траектории. Значение угла  $\theta_C$  определяется выражением  $\cos\theta_C = 1/(n\beta)$ , где  $\beta = v/c$  – скорость частицы относительно скорости света в вакууме, и для воды и льда, являющихся веществом детекторов, составляет примерно  $41^\circ$ . Зная последовательность откликов фотодетекторов, можно рассчитать траекторию первоначальной частицы. Абсолютное значение скорости черенковских фотонов  $v_C(\lambda)$  определяется групповой скоростью распространения света в текущей среде для соответствующей длины волны в среде:

$$v_C = \frac{c}{n_g(\lambda)}, \quad n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (6)$$

Рабочим диапазоном длин волн фотонов является интервал 350-600 нм. Нижняя граница обусловлена поглощением света стеклом фотодетекторов, верхняя – увеличением показателя преломления в воде и льду, уменьшением интенсивности черенковского излучения и понижением квантовой чувствительности электронных фотоумножителей с возрастанием длины волны фотонов.

Групповая скорость распространения света в воде и льду возрастает с увеличением длины волны, что приводит к размыванию светового сигнала черенковского излучения во времени.

Спектральное распределение черенковских фотонов, излучаемых с единицы длины траектории частицы с единичным зарядом, определяется следующим выражением:

$$\frac{dn_C}{d\lambda} = 2\pi\alpha \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \frac{1}{\lambda^2}, \quad (7)$$

где  $\alpha = 1/137$  – постоянная тонкой структуры,  $n(\lambda)$  – фазовый показатель преломления среды.

Мюоны и ливни высоких энергий, порождаемые нейтрино, являются двумя разными типами источников черенковского излучения высокой интенсивности, регистрируемых нейтринными телескопами.

Ливни с высокими энергиями образуются в реакциях нейтрино с нуклонами, имеющих следующий вид:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{CC} l^-(l^+) + \text{адроны}, \quad (8)$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{NC} \nu_l(\bar{\nu}_l) + \text{адроны}, \quad (9)$$

где  $l = e, \mu$  или  $\tau$ , CC – заряженный ток, NC – нейтральный ток, а также при резонансном рассеянии электронного антинейтрино на электроны:

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- + \dots \quad (10)$$

с энергией в резонансе  $E_0 = M_w^2/2m_e = 6,3 \times 10^6$  ГэВ и сечением взаимодействия  $5,02 \times 10^{-7}$  барн. При этом структура ливня не зависит от аромата нейтрино. Черенковское излучение испускается заряженными частицами ливня и определяется их пространственным, угловым и временным распределением. Поперечный размер электромагнитного ливня практически не влияет на отклик фотодетекторов нейтринных телескопов, а угловое распределение ливня слабо меняется вдоль оси распространения в окрестности максимума каскадной кривой, из которой излучается большая часть черенковских фотонов. Для ливней с энергией  $E > 200$  ГэВ, угловое распределение практически не зависит от пространственных координат. Число черенковских фотонов  $N_C(x, \theta, t) dx d\Omega dt$ , испущенных из интервала длиной  $dx$  в окрестности  $x$  в элемент телесного угла  $d\Omega$ , пропорционально длине траектории заряженных частиц ливня  $dl_e$  на интервале  $dx$ . Так как подавляющее большинство частиц движется вдоль оси ливня, то  $dl_e \approx N_e(x) dx$ , где  $N_e(x)$  – функция, не зависящая от угловых координат. Относительное угловое распределение черенковских фотонов, просуммированное по траекториям всех заряженных частиц ливня  $\Psi_C(\theta)$  при энергии ливня свыше 100 ГэВ, практически от неё не зависит. Угловые распределения черенковских фотонов, испущенных с разных точек оси ливня в окрестности максимума каскадной кривой, мало отличается от  $\Psi_C(\theta)$ . Таким образом, число черенковских фотонов можно с удовлетворительной точностью записать, разделив пространственные и угловые компоненты:

$$N_C(x, \theta, t) \approx N_e(x) n_C \Psi_C(\theta) \delta\left(t - \frac{x}{c}\right), \quad (11)$$

где  $n_C$  – линейная плотность черенковского излучения релятивистских частиц. Полное число черенковских фотонов от электромагнитного или адронного ливня оказывается пропорционально суммарной длине траектории заряженных частиц, а значит и энергии ливня:

$$N_C^{\text{tot}} = n_C L_C = BE_{\text{sh}} [\text{ГэВ}]. \quad (12)$$

Область энергии мюонов, доступная для исследования с помощью нейтринных телескопов, простирается от несколько десятков ГэВ до сверхвысоких энергий. Световой поток, испускаемый при прохождении мюона в среде, включает в себя черенковское излучение, инициируемое электрическим зарядом мюона, черенковское излучение  $\delta$ -электронов, рождающихся при ионизации атомов среды мюоном, и черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения электрон-позитронных пар, либо тормозного и фотоядерного взаимодействий мюона со средой.

Таким образом, световое поле, инициируемое мюоном в среде, можно разделить на две составляющие. Первая составляющая излучает непрерывно с постоянной линейной плотностью. Линейная плотность и угловое распределение фотонов в этом источнике обоснованы черенковскими фотонами самого мюона. Вторая составляющая формируется локальными источниками на траектории мюона –  $\delta$ -электронами, электрон-позитронными парами и посредством тормозного или фотоядерного взаимодействия. [4]

## **2.2. Нейтринные телескопы, основанные на эффекте Черенкова-Вавилова.**

Первое время уровень знаний о природных потоках нейтрино высоких энергий определялся детекторами так называемого первого поколения, такими как NT200/NT200+, AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array), а также ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental RESearch), функционирующего с 2006 года. Эти установки характеризуются эффективным объёмом регистрации вторичных мюонов и ливней порядка  $10^7 \text{ м}^3$  в отношении к регистрации нейтрино энергией свыше 10 ТэВ.

За время эксплуатации телескопов первого поколения (начиная с 1990г.) были достигнуто уровни точности, примерно на два порядка превышающие таковые у подземных детекторов, таких как SuperKamiokande и MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory), что со всей очевидностью доказало эффективность размещения детекторов нейтрино в естественных средах. Полученные на этих установках результаты побудили к разработке и созданию нейтринных телескопов с характерным масштабом порядка  $1 \text{ км}^3$ , обладающих на порядок большей чувствительностью к природным потокам нейтрино высоких энергий.

В настоящее время в мире активно развиваются несколько крупномасштабных нейтринных экспериментов следующего поколения в естественных средах: IceCube на Южном полюсе, KM3NeT (Cubic Kilometer Neutrino Telescope) в Средиземном море и Baikal-GVD (Baikal Gigaton Volume Detector) на озере Байкал, которые находятся на разных стадиях разработки и реализации. Конфигурация, архитектура измерительных и коммуникационных систем каждого из этих детекторов, а также их возможности при решении задач, обусловлены их местоположением, свойствами среды, степенью сложности инженерно-технических решений при создании и



эксплуатации установки и возможностями модификации конфигурации и изменением светосилы телескопа.

Общий вид конфигурации данных телескопов представляет собой модульную структуру, формируемую из нескольких функционально независимых установок – кластеров, представляющих собой набор вертикальных гирлянд. Модульная структура позволяет проводить набор экспериментальных данных уже на ранних стадиях развёртывания проектов, практически неограниченно увеличивать объём установки и адаптировать конфигурацию к меняющимся требованиям. Также телескопы снабжаются массивом башен акустических детекторов, – гидрофонов, – для позиционирования тех элементов структур, которые не закреплены жёстко.

Гирлянда формируется из набора секций оптических модулей, монтируемых на грузонесущих кабелях. Секция – функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггеров и передачи данных. Оптический модуль представляет собой стеклянный корпус с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), являющимися основными регистрирующими элементами, и управляющими электроприборами.

### 2.2.1. Baikal-GVD. [5]

Предварительная стадия реализации проекта окончилась в 2015 г. установкой базового кластера, состоящего из 192 оптических модулей, расположенных в 8 гирляндах – одной центральной и семи периферийных. Периферийные гирлянды расположены на расстоянии 60 м от центральной. Такая конструкция позволяет эффективно детектировать треки мюонов и ливни. Гирлянды закреплены на дне озера тяжёлыми якорями и поддерживаются сверху узлом буйв. Таким образом, кластер не является жёстко закреплённым, – гирлянды могут в некоторой степени двигаться.

Каждая секция содержит 12 оптических модулей, расположенных на расстоянии 15 метров вдоль гирлянды, а также центральный модуль и служебный модуль. Верхние оптические модули располагаются на глубине 700 м, нижние – на глубине 1240 м. В оптических модулях данного детектора используются ФЭУ Hamamatsu-R7081HQE

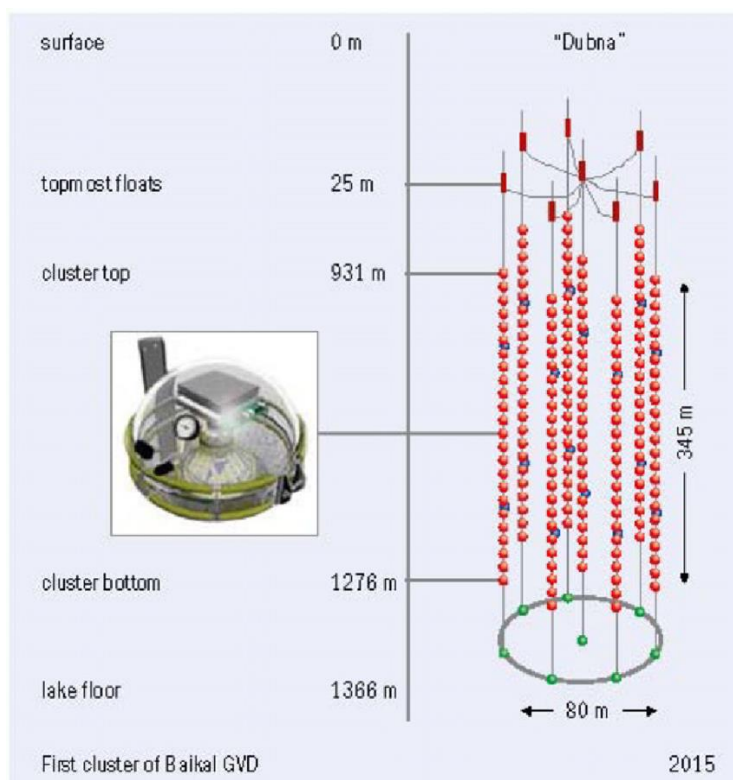


Рис. 2. Схематическое изображение секции кластера Baikal-GVD. Слева – оптический модуль.

с полусферическими фотокатодами диаметром 250 мм и с высокой квантовой чувствительностью. Аналоговые сигналы со всех оптических модулей секции передаются в центральный модуль по коаксиальным кабелям одинаковой длины. По этим же кабелям к оптическим модулям подводится низковольтное питание. В центральном модуле осуществляется преобразование аналоговых сигналов оптических модулей в цифровой код и передача информации по линии Ethernet. Служебный модуль предназначен для калибровки временных каналов установки, электропитания оптического модуля, а также для определения расположения гирлянды относительно донных маяков. Местоположение гирлянды определяется гидроакустической системой измерения координат.

Работа всех кластеров точно синхронизирована во времени. Таким образом, ливни частиц или треки мюонов в разных кластерах могут быть объединены в береговом центре управления. Это позволяет комбинировать данные из всех задействованных кластеров.

Следующим этапом развития Baikal-GVD является создание первой очереди телескопа (GVD-I), состоящей из 8 кластеров объёмом  $0.4 \text{ км}^3$  каждый, содержащими суммарно 288 оптических модулей. Строительство планируется завершить в 2021 г.

### 2.2.2. KM3NeT. [6]

Основными участниками проекта KM3NeT являются коллаборации ANTARES (Франция, Италия, Голландия и др.), NEMO (NEutrino Mediterranean Observatory) (Италия) и NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research) (Греция).

Телескоп будет обладать распределённой инфраструктурой, сформированной из нескольких блоков, каждый из которых представляет собой полномасштабный нейтринный телескоп. Каждый из блоков содержит массивы гирлянд оптических модулей и башен гидрофонов для позиционирования, которые также тестируются для детектирования нейтрино гидроакустическим методом.

Инфраструктура KM3NeT разделена на несколько частей:

1) KM3NeT-Fr: установочная площадка в 10 км к западу от телескопа ANTARES на глубине 2450 м.

2) KM3NeT-It: на глубине 3500 м примерно в сотне километрах от мыса Капо-Пассеро в Сицилии, где ранее функционировал телескоп NEMO.

3) KM3NeT-Gr: в 30 км к западу от острова Пилос в Греции; на глубинах 3000-4500 м. Ныне используется для проверки и квалификации.

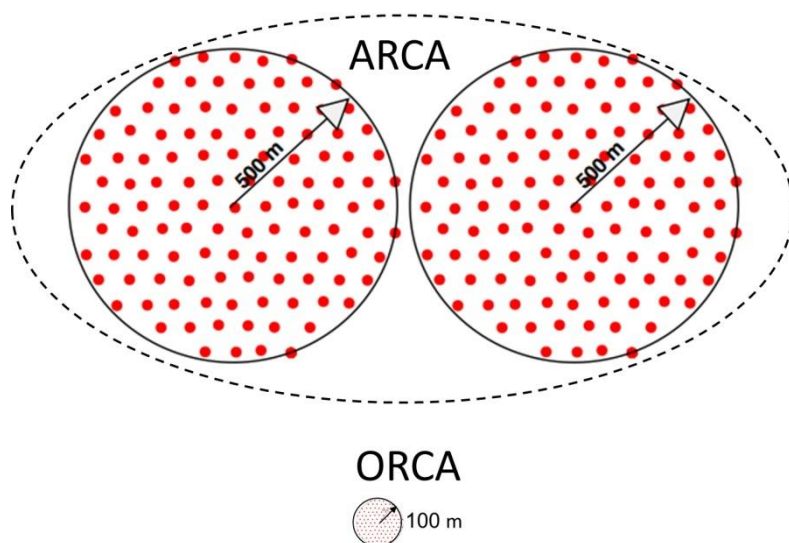


Рис. 3. Сравнительные размеры детекторов ARCA и ORCA проекта KM3NeT

В проекте используются два вида телескопов с разной конфигурацией: ARCA (*Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss*) и ORCA (*Oscillation Research with Cosmics in the Abyss*) [7]. Детекторы ORCA конструируются на площадке KM3NeT-Fr, и в январе текущего года конструкция первой фазы (ORCA6), содержащей 6 гирлянд, была завершена. Детектор ARCA размещается на площадке KM3NeT-It, и первая гирлянда была установлена в декабре 2015 г.

В детекторе ARCA гирлянды имеют длину около 600 м, на каждой из которых закреплены по 18 оптических модулей. Гирлянды располагаются на расстоянии около 90 м друг от друга. Структура детектора ORCA более плотная – гирлянды имеют длину около 150 м, располагаясь при этом на расстоянии приблизительно 20 м друг от друга. Интервал между оптическими модулями на гирлянде – 9 м. Количество оптических модулей в ARCA превышает таковое в ORCA вдвое (4000 и 2000 соответственно), однако объём первого больше в 100 раз.

Цифровые оптические модули (DOM – Digital Optical Module), используемые в детекторах, содержат 31 ФЭУ размеров 3 дюйма (около 7,6 см), которые помещены в сферу диаметром 17 дюймов (около 43,2 см), изготовленную из специального стекла, способного выдержать давление воды на большой глубине. Вся информация с каждого оптического модуля передаётся непосредственно в береговой центр управления и сбора данных по оптоволоконной линии связи. [8]

Конечной целью проекта является размещение в каждой из инфраструктурных частей по два блока, содержащих по 115 гирлянд, общим объёмом порядка 4-5 км<sup>3</sup>, в зависимости от выбранного расстояния между гирляндами в детекторах, устанавливаемых в KM3NeT-Gr.



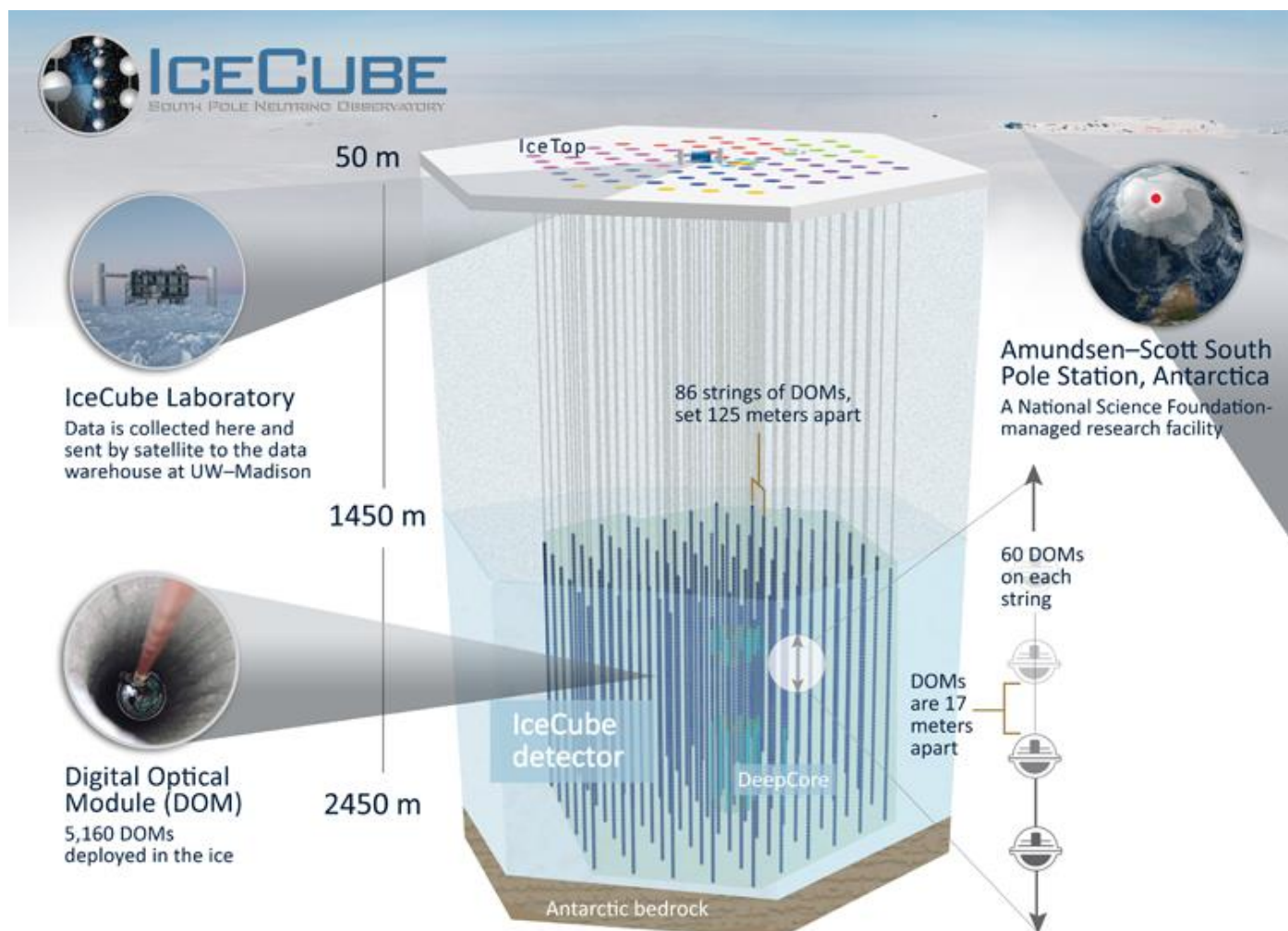
**Рис. 4.** Слева – гирлянда оптических модулей. Справа – цифровой оптический модуль эксперимента KM3NeT.

### 2.2.3. IceCube. [9]

IceCube, – нейтринная обсерватория на Южном Полюсе, – является первым созданным гигантским детектором нейтрино, который был первоначально разработан для наблюдения нейтрино астрофизической природы. Обсерватория представляет собой детектор частиц объёмом 1 км<sup>3</sup> и расположена вблизи станции Амундсена-Скотта. Эффективной средой детектора является антарктический лёд. Строительство детектора проходило с 2005 по 2010 г.

Телескоп расположен на глубине 1350-2450 м и содержит 5160 оптических модулей, расположенных на 86 гирляндах. Гирлянды размещены на гексагональной сетке с интервалом 125 метров и вмещают 60 оптических модулей каждая. Интервал между оптическими модулями на 80 гирляндах составляет 17 м.

Шесть гирлянд в центре массива были развернуты более компактно, с горизонтальным разнесением около 70 метров и расстоянием между оптическими модулями вдоль гирлянды 7 метров. Эта более плотная конфигурация формирует субдетектор DeepCore, имеющий сниженный энергетический порог нейтрино – примерно 10 ГэВ, создавая возможность для изучения осцилляций нейтрино.

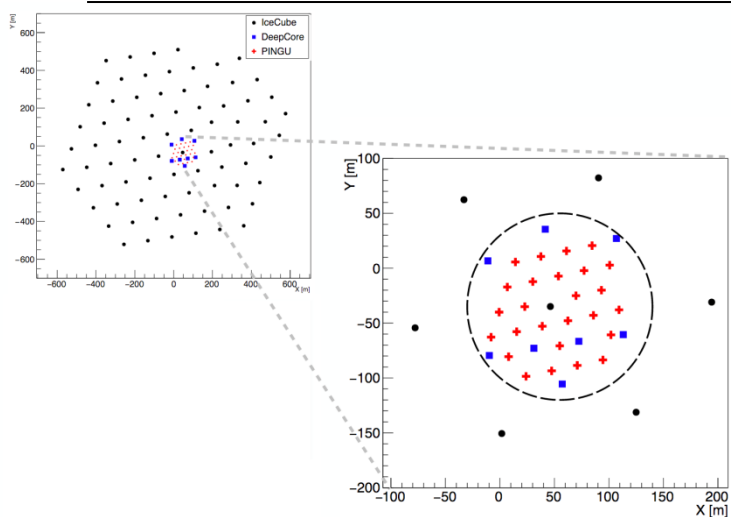


**Рис. 5.** Схематичное изображение нейтринного телескопа IceCube. Отмечено расположение центральной части телескопа с большей плотностью размещения оптических модулей – DeepCore и поверхностной установки IceTop для регистрации широких атмосферных ливней. Также схематически изображен отрезок гирлянды оптических модулей (справа).

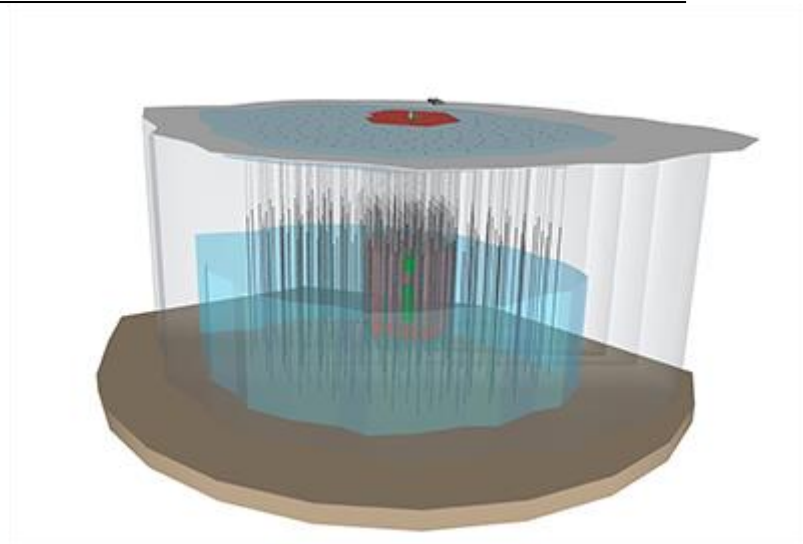
На поверхности ледового покрова непосредственно над нейтринным телескопом располагается установка IceTop, состоящая из 81 станции, расположенных поверх того же количества гирлянд IceCube. Все станции имеют по два резервуара, каждый из которых оборудован двумя оптическими модулями, обращенными вниз. IceTop, созданный в качестве калибровочного детектора для IceCube, также обнаруживает атмосферные ливни от первичных космических лучей в диапазоне энергий от

300 ТэВ до 1 ЭэВ. Поверхностный массив измеряет направления прибытия космических лучей в южном полушарии, а также поток и состав космических лучей.

Дальнейшими планами усовершенствования является создание детектора нового поколения IceCube-Gen2. Прозрачность антарктического льда позволяет увеличить интервал между гирляндами до 250 м, вместо нынешних 125 м. Развертывание датчиков на гирляндах с большими расстояниями позволит эффективному объему IceCube-Gen2 быстро расти при сравнительно скромных затратах. Приблизительно удвоив количество уже установленной аппаратуры, телескоп достигнет увеличения объема примерно до  $10 \text{ км}^3$ . Целью новой обсерватории является исследование потоков нейтрино в области энергий выше 1 ПэВ. IceCube-Gen2 включает в себя проект детектора нейтрино низких энергий с порогом регистрации мюонов порядка нескольких ГэВ и эффективным объёмом 6 Мт – PINGU (The Precision IceCube Next Generation Upgrade), за счёт дальнейшего насыщения центральной части телескопа DeepCore дополнительными гирляндами фотодетекторов в количестве 26 штук. В свою очередь количество оптических модулей на каждой гирлянде увеличится до 192. Одной из основных задач, на решение которых нацелена установка PINGU, является определение иерархии массовых состояний нейтрино.



**Рис. 6.** Схематическое расположение PINGU в детекторе IceCube. На вставке сверху справа красные крестики показывают предполагаемые местоположения гирлянд PINGU. Модули PINGU будут размещены в самом чистом льду на дне детектора.



**Рис. 7.** Возможная конфигурация IceCube-Gen2. IceCube (красный) и субдетектор DeepCore (зеленый) показывают текущую конфигурацию. Синим обозначен полный эффективный объем детектора следующего поколения.

В июле 2018 года коллаборация IceCube объявила, что они обнаружили высокоэнергетическое нейтрино, попавшее в детектор в сентябре 2017 года, указывающее на его источник – блазар TXS0506+056, расположенный на расстоянии 5,7 миллиардов световых лет в направлении созвездия

Ориона. Это первый случай, когда нейтринный детектор использовался для определения местоположения и идентификации космического объекта. [10]

### **2.3. Проблемы и перспективы метода.**

Успешная работа детекторов первого поколения: NT-200, AMANDA, ANTARES и IceCube привела научное общество к осознанию необходимости разработки, координации и согласования своих последующих планов и созданию с этой целью Глобальной Нейтринной Сети (Global Neutrino Network – GNN) с участием всех действующих в этой области международных коллабораций – ANTARES, «Байкал», IceCube и KM3NeT. GNN стремится разработать последовательную стратегию и использовать синергетические эффекты сотрудничества.

Черенковские телескопы следующего поколения достигнут высокой чувствительности к потокам нейтрино высоких энергий.

К проблемам можно отнести тот факт, что нет точного способа определить, было ли вызвано регистрируемое событие (мюон или ливень) нейтрино или другой нейтральной частицей, способной рассеяться на электроны. Также длина затухания черенковского излучения сравнительно невелика, что создаёт определённые трудности в увеличении объёмов детекторов.

## **3. Гидроакустический метод детектирования нейтрино.**

Впервые акустическое излучение в веществе при прохождении через него ионизирующих частиц было открыто Г. А. Аскарьяном в 1957 г. Теоретические и экспериментальные исследования получили дальнейшее развитие с 1977 года Аскарьяном и Б. А. Долгошеиным. Основная идея заключается в том, что нейтрино высоких энергий взаимодействует с подходящей средой, такой как лёд, вода или соль, рождая адронные ливни в реакциях с нуклонами (см 2.1). Последующие ливни инициируют в среде акустический импульс, который может быть зарегистрирован. [11-12]

### **3.1. Теоретическое описание.**

Преимуществом данного метода над методом на основе эффекта Черенкова-Вавилова является существенно большая длина затухания звука в воде по сравнению с длиной затухания черенковского излучения – более 1 км в сравнении с ~50 м. Вследствие этого приёмники сигнала могут находиться на значительном расстоянии друг от друга. Это позволяет многократно увеличить объёмы детекторов и снизить затраты, а также регистрировать нейтрино с энергиями  $10^{20}$  эВ и выше.

Порождённый нейтрино высоких энергий адронный ливень возникает в среде практически мгновенно, поскольку частицы движутся со скоростью, близкой к скорости света, и занимая

сравнительно малый объем (длина не превышает нескольких метров, а радиус – 20-30 см) ионизирует вещество вокруг. В этой же области пространства ионизация приводит к мгновенному тепловому расширению. Возникает импульс давления, порождающий акустическую волну, интенсивность которой пропорциональна удельной плотности потерь энергии ионизирующими частицами. Данный механизм преобразования энергии излучения в энергию звуковых волн носит название терморационного.

Акустический сигнал точечного излучателя (микроимпульса) можно описать как решение дифференциального уравнения:

$$\nabla^2 \left( p + \frac{1}{\omega_0} \dot{p} \right) - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = - \frac{\beta}{C_p} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (14)$$

где  $p(\vec{r}, t)$  – отклонение давления в воде от гидростатического давления  $p_0$ ,  $c_s$  – скорость звука в среде,  $\beta \approx 1.2 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$  – объемный коэффициент теплового расширения,  $C_p \approx 3,8 \times 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  – теплоемкость при постоянном давлении.

$\epsilon(\vec{r}, t)$  – функция, характеризующая плотность мощности тепловых источников звука. Её временная зависимость, как правило, принимается в виде дельта-функции:

$$\frac{\partial}{\partial t} \epsilon(\vec{r}, t) = \tilde{\epsilon}(\vec{r}) \delta(t - t_0) \quad (15)$$

так как время распространения частиц (образования ливня) много меньше других характерных времен процесса генерации звука.

Координатная часть функции определяется суммарной энергией нейтрино, вызвавшего каскад, и ее пространственным распределением:

$$\tilde{\epsilon}(\vec{r}) = \frac{1}{E} \frac{1}{2\pi r} \frac{d^2 E}{dr dz} \quad (16)$$

Фронт волны имеет характерную форму диска в ближней зоне и несколько отличную – в дальней. При этом наблюдается сильная зависимость амплитуды от угла  $\alpha$  отклонения от плоскости, перпендикулярной оси ливня.

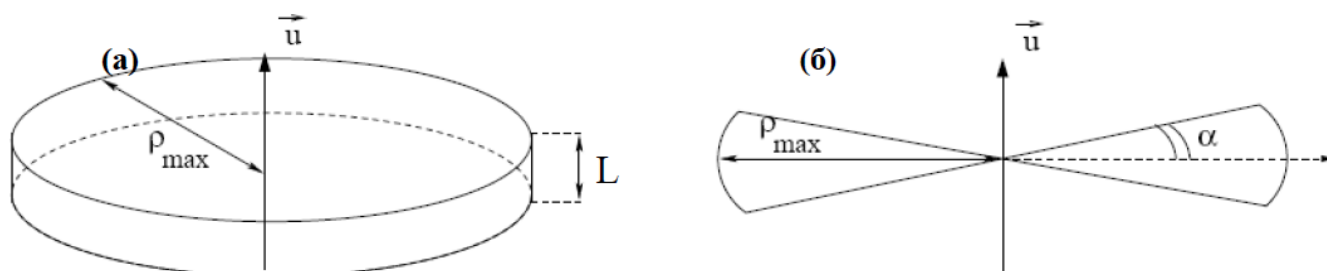


Рис. 8. Форма волнового фронта в ближней (а) и дальней (б) зоне.

Такая форма сигнала предоставляет возможность определить направление нейтрино. Если хотя бы три массива гидрофонов окажутся в области фронта, то возможно с высокой точностью восстановить направление оси ливня и прилёта нейтрино.

При дальнейшем распространении акустической волны важнейшим моментом является затухание звука, а также различные шумы. При этом низкие частоты затухают меньше высоких. Зависимость интенсивности звукового сигнала от расстояния включает в себя факторы, зависящие как от свойств самого звука (в частности частоты), так и от свойств среды. А именно: геометрические факторы – обусловленные формой волнового фронта при распространении звука в среде, физические процессы в среде – поглощение звука, связанное с теплопроводностью и вязкостью среды, плюс молекулярное поглощение, и отражение звуковой волны от дна, поверхности и различных объектов. В целом затухание звука зависит в наибольшей степени от частоты и хорошо изучено для различных сред, в том числе для морской воды и арктического льда.

Существенным обстоятельством, определяющим эффективность детектирования, является шум моря. В области частот 50 кГц, в которой находится максимум спектра акустического сигнала, шум определяется скоростью ветра на поверхности моря. В области выше 50 кГц преобладает тепловой шум. Также необходимо учитывать техногенный шум и шум от морской флоры и фауны, однако последние могут быть отсечены различными алгоритмами.

Среди детекторов, применяющих или планирующих применять данный метод наряду с черенковским – рассмотренные ранее детекторы Baikal-GVD, KM3NeT, IceCube. [13]

### 3.2. Нейтринные телескопы, имеющие в составе гидроакустические устройства.

В современных черенковских детекторах установлены акустические системы позиционирования – башни гидрофонов [8, 14]. Задача гидрофонов – преобразовать энергию волны в цифровой сигнал и в итоге – в информацию об этой волне. Наиболее распространённая и применяемая конфигурация – на основе пьезоэффекта. Вторым типом, находящимся на стадии разработки и тестирования, являются оптоволоконные гидрофоны, преимуществом которых является отсутствие дополнительной электроники возле каждого гидрофона, что должно облегчить их размещение и снизить стоимость.

Существовал ряд тестовых проектов, испытывающих гидроакустический метод детектирования заряженных частиц – таких как, например, SAUND (Phase I и Phase II), NEMO (Phase I и Phase II), который являлся предшественником KM3NeT, а также SPATS, ныне являющейся частью телескопа IceCube [14]. В SPATS сбор данных



**Рис. 9.** Внешний вид акустического модуля SPATS.



проходит в фоновом режиме.

### **3.3. Проблемы и перспективы.**

Одна из основных проблем развития акустического метода детектирования нейтрино – незавершённость экспериментально проверенной теоретической модели. До сих пор известно лишь качественное представление процессов выделения тепла в объёме в результате ионизации каскадом, и как именно информация о первоначальном нейтрино переходит в параметры акустического сигнала. Помимо этого, даже сегодня имеется недостаток статистики. Разрабатываемые проекты акустических и гибридных детекторов могут решить эту проблему.

В настоящее время гидроакустический метод пока нереализуем, но в перспективах весьма результативен и потенциально может увеличить статистику на порядки.

## **4. Детектирование нейтрино радио-методом.**

В настоящее время активно развивается метод обнаружения широких атмосферных ливней путём детектирования радиоизлучения от них при помощи массивов радиоантенн, действенность которого продемонстрировано такими экспериментами как AERA, CODALEMA, LOFAR и Tunka-Rex. Основной движущей силой данного метода является коллаборация GRAND (The Giant Radio Array for Neutrino Detection) (Китай) [15].

### **4.1. Теоретическое описание.**

Широкие атмосферные ливни, инициированные частицами очень высоких энергий, испускают когерентные импульсные радиосигналы, слабо затухающие в атмосфере, которые способны покрыть большую площадь – до 100 км<sup>2</sup> на земле, в десятках километров от источника ливня. Поскольку радиоантенны недорогие и надёжные, они подходят для создания гигантских массивов детекторов, которые способны фиксировать даже самые слабые потоки частиц очень высоких энергий. Такая технология расширит возможности обнаружения ливней, инициированных высокоэнергетическими нейтрино.

По мере развития ливня в атмосфере, геомагнитное поле разделяет положительные и отрицательные заряды. Это создает изменяющийся во времени электрический ток, который индуцирует геомагнитное радиоизлучение. Кроме того, избыток отрицательного заряда накапливается в ливне во время распространения вследствие Комптоновского рассеяния, которое также вызывает радиоизлучение. Процесс известен как эффект Аскарьяна. В плотных средах, как, например, лёд, доминирует эффект Аскарьяна, в воздухе же доминирует геомагнитный эффект. Оба вида излучения когерентны при длинах волн больше размеров ливня, поэтому амплитуда сигнала

пропорциональна энергии электромагнитного компонента ливня для частот до 100 МГц. Каждый тип излучения имеет различную картину поляризации. Поскольку излучающие частицы являются релятивистскими, излучение происходит в прямом направлении, внутри узкого конуса с полушириной, равной черенковскому углу. Для воздуха черенковский угол составляет около  $1^\circ$ - $2^\circ$ . Для наблюдателя, расположенного под этим конкретным углом к ливню, радиосигналы, излучаемые из всех точек вдоль ливня, приходят одновременно, усиливая сигнал по «черенковскому кольцу», вплоть до частот ГГц. Для наиболее наклонных ливней, инициированных нейтрино, пролетающими почти горизонтально (т. н. скимминговые нейтрино), черенковские расстояния много больше, нежели для ливней с малыми зенитными углами.

Различные механизмы радиоизлучения от атмосферных ливней в сочетании с эффектом Черенкова приводят к сложным диаграммам излучения с точки зрения амплитуды, частоты и поляризации. Они хорошо изучены и могут быть смоделированы очень подробно, если известна геометрия ливня. Радиообнаружение атмосферного ливня большим количеством антенн в разных локациях может быть использовано для восстановления геометрии ливня и определения свойств первичной частицы. Для вертикальных ливней след радиоизлучения небольшой и концентрированной; для его детектирования необходимы плотные антенные массивы с интервалами менее 100 м. Для ливней, наклоненных на  $75^\circ$ , вытянутая зона радиоизлучения охватывает площадь в несколько десятков км<sup>2</sup>, и для ее детектирования подходят более разреженные массивы антенн.

Для энергий выше  $10^{17}$  эВ Земля становится непрозрачной даже для скимминговых нейтрино. Если нейтринное взаимодействие является заряженным током, оно производит исходящий высокоэнергетический заряженный лептон того же аромата, что и взаимодействующее нейтрино, чьи продукты распада или взаимодействия могут наблюдаться, в зависимости от аромата и от того, способен ли заряженный лептон выйти в атмосферу. [17]

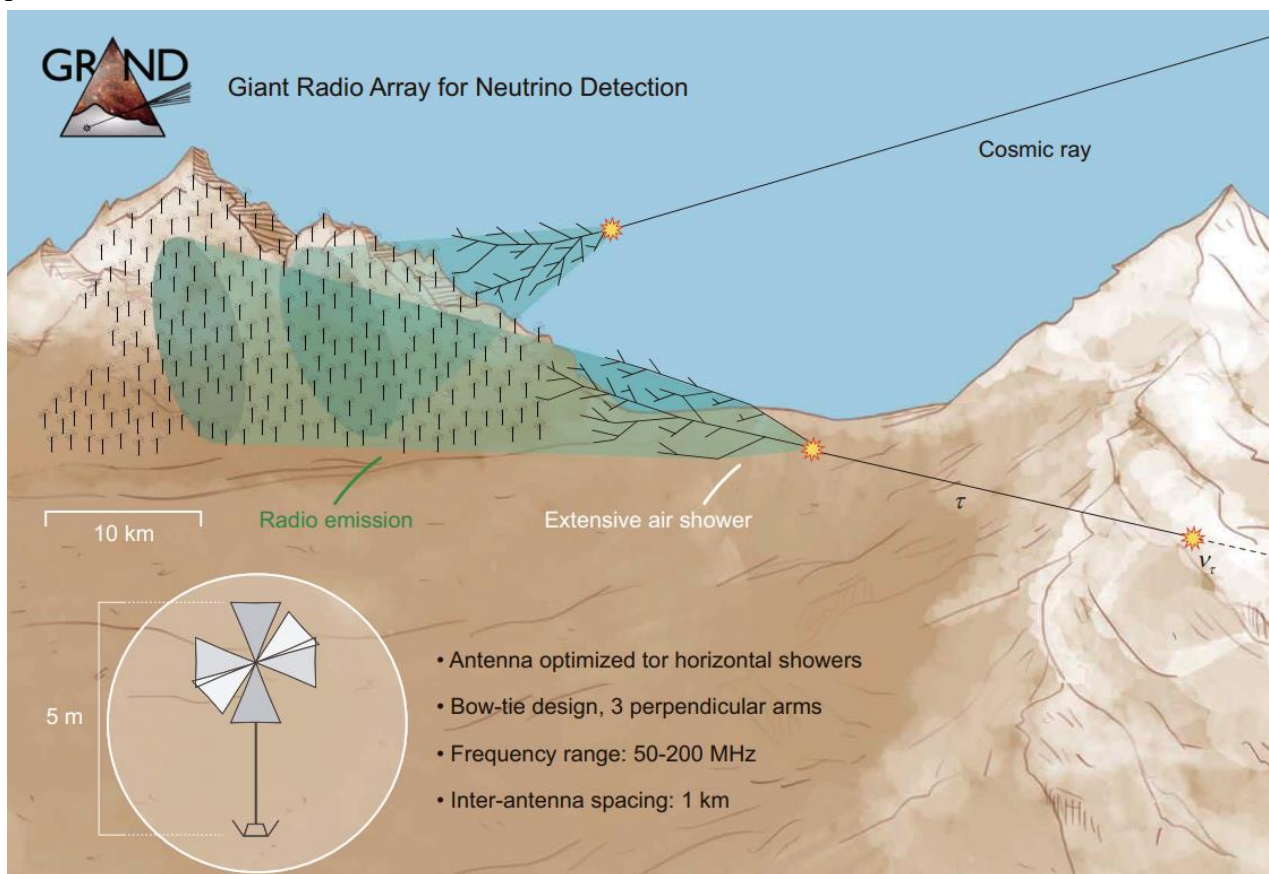
## 4.2 Ограничения по аромату нейтрино.

Если взаимодействующее нейтрино представляет собой  $\nu_e$ , выходящий электрон инициирует электромагнитный ливень, который быстро затухает из-за потерь энергии на излучение. Обычно ливень недолговечен, сконцентрирован вблизи вершины нейтринного взаимодействия и не обнаруживается в радиодиапазоне. При сверхвысоких энергиях, если  $\nu_e$  взаимодействует вблизи поверхности Земли, часть ливня может выйти в атмосферу и произвести когерентное переходное излучение в диапазоне МГц-ГГц, которое может быть фиксировано. Эффект Ландау-Померанчука-Мигдала [16] подавляет радиационные потери и удлиняет ливень, еще больше улучшая его шансы на выход в атмосферу. Однако при энергиях порядка 1 ЭэВ максимальная глубина столба, которую может проходить ливень, составляет 3000-4000 г/см<sup>2</sup>, что соответствует всего лишь 30-40 м под землей. Следовательно, эффективный объем для этого канала обнаружения невелик.

Если взаимодействующее нейтрино представляет собой  $\nu_\mu$ , образующийся высокоэнергетический мюон может вылететь из-под земли и выйти в атмосферу, поскольку радиационные потери подавляются благодаря большей массе мюона. Однако, поскольку пробег мюона в атмосфере составляет несколько километров, вероятность того, что он распадется над массивом антенн и создаст обнаруживаемый воздушный поток, ничтожно мала.

Вероятностью событий, соответствующих  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ , пренебрегают.

Если взаимодействующее нейтрино является  $\nu_\tau$ , то можно обнаружить образующийся тау-лептон. С одной стороны, тау-лептон тяжелее мюона, поэтому радиационные потери подавляются еще сильнее. С другой стороны, короткое время жизни тау ( $0,29$  пс) дает ему пробег  $50$  м на ПэВ энергии, вплоть до распада. В результате тау-лептон, рожденный из  $\nu_\tau$  сверхвысоких энергий под землей, может выйти из породы и распасться над антенным массивом, инициируя детектируемый атмосферный ливень. Поскольку вероятность распада тау-лептона в адроны – в основном пионы – составляет около  $65\%$  и почти  $20\%$  – в электроны, вероятность распада тау-лептона, создающего атмосферный ливень, высока: только когда тау-лептон превращается в мюон ( $17\%$  случаев), ливень не излучает радиосигнал. Кроме того, поскольку при распаде тау-лептона образуется новое  $\nu_\tau$ , ослабление потока нейтрино из-за взаимодействия вещества при его распространении внутри Земли частично компенсируется за счет регенерации  $\nu_\tau$ . Однако, поскольку исходящий  $\nu_\tau$  получает только  $30\%$  энергии исходного тау-лептона, многократные регенерации сдвигают поток к более низким энергиям.



**Рис. 10.** Принцип обнаружения GRAND, показанный для одного из массивов GRAND10k с 10000 антеннами. Космические лучи сверхвысоких энергий и гамма-лучи (не показаны) взаимодействуют в атмосфере, в то время как  $\nu_\tau$  сверхвысоких энергий взаимодействуют под землей и создают тау-лептоны высокой энергии, которые вылетают в атмосферу и распадаются. Последующие широкие атмосферные ливни испускают радиоизлучение, которое детектируется антеннами. На вставке изображен эскиз HorizonAntenna.

Также могут быть детектированы и скимминговые нейтрино, взаимодействующие в атмосфере. Вероятность взаимодействия в атмосфере не пренебрежимо мала, хотя все же значительно меньше, чем для скимминговых нейтрино, взаимодействующих под землёй. В атмосферных явлениях все нейтринные ароматы могут быть обнаружены через адронные ливни, которые они инициируются в реакциях заряженного тока и нейтрального тока.[17]

### **4.3 GRAND.**

GRAND позиционируется как детектор следующего поколения, предназначенный для детектирования космических частиц сверхвысокой энергии, таких как космические лучи, нейтрино и фотоны. Он будет состоять из 200 000 радиоприемников, размещенных на площади более 200 000 квадратных километров, размером примерно с Великобританию, в благоприятных горных районах мира. Это будет самый большой наземный детектор среди когда-либо созданных. По причинам, описанным выше, телескоп GRAND нацелен на детектирование в основном тау-нейтрино, которые взаимодействуют под землёй или внутри гор, после чего тау-лептон вылетает в атмосферу и путём распада инициирует широкий атмосферный ливень, чьё радиоизлучение фиксируется радиоприемниками. [15]

#### **4.3.1 Детектирующее устройство.**

GRAND разработали антенны, оптимизированные для эффективного детектирования радиоизлучения вдоль горизонта, которые имеют название HorizonAntenna. HorizonAntenna – это активная антенна в форме бабочки с относительно ровным откликом в зависимости от азимутального направления и частоты. Антенна рассчитана на диапазон 50-200 МГц. Её дизайн основан на «антенне-бабочке» [18], разработанной для эксперимента CODALEMA и позже использованной в AERA [19]. Она имеет 3 перпендикулярных плеча, ориентированных вдоль двух горизонтальных направлений и, соответственно, вертикального. В HorizonAntenna использует тот же малошумный усилитель, но его излучающий элемент в два раза меньше, чем в CODALEMA и AERA, тем самым увеличивается чувствительность в диапазоне 50-200 МГц. Вся эта конструкция размещается на деревянном шесте на высоте 5 м, чтобы снизить влияние отражения сигнала от поверхности земли.

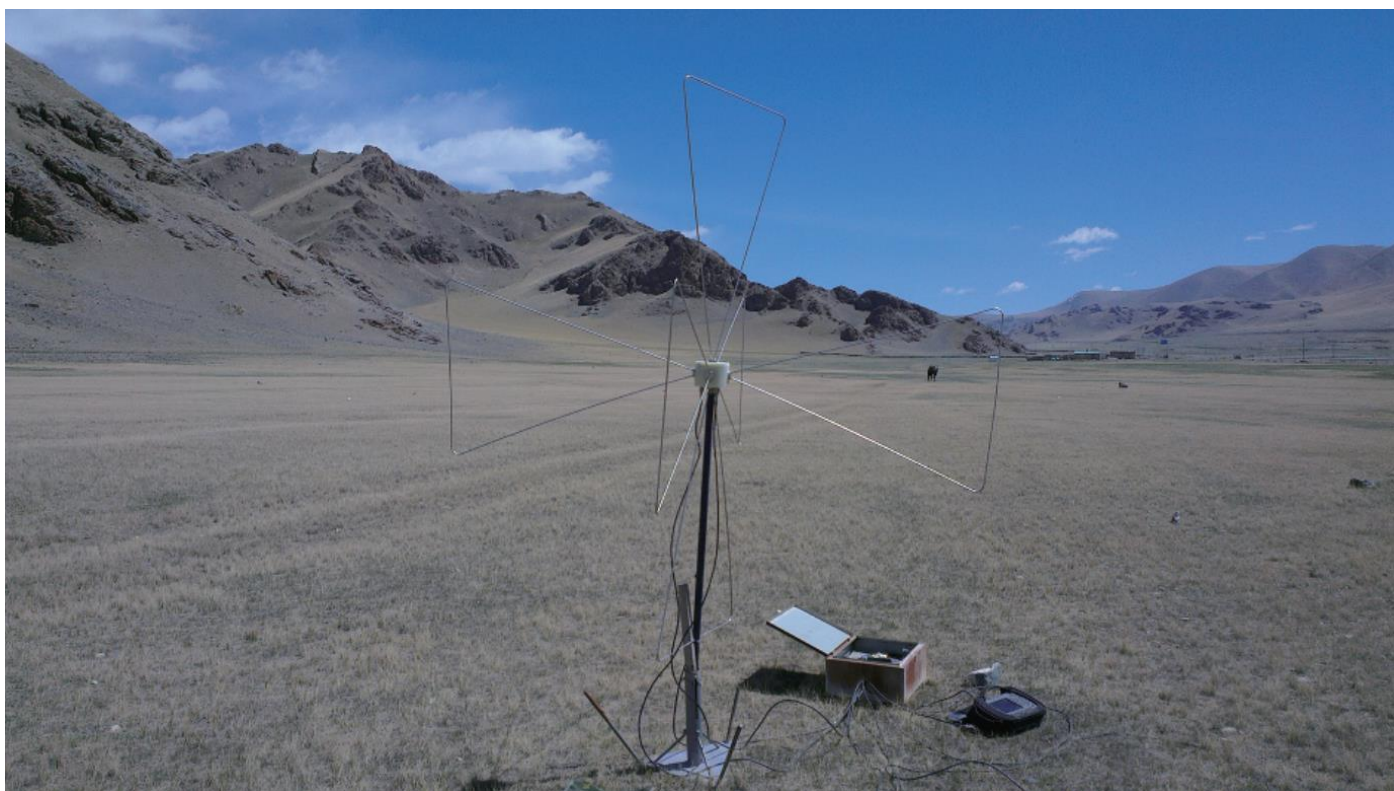
GRAND будет модульным и строится поэтапно, и размер массивов будет постепенно расти. Планируется возведение следующих фаз проекта.

#### **4.3.2. GRANDProto35 (2018).**

GRANDProto35, первый этап строительства, заложил основу для будущих этапов. Его цель – достичь эффективности более 80% для радиообнаружения ливня и уменьшения фона, соответствующее соотношению ложных срабатываний и истинных положительных результатов

ниже 10%. GRANDProto35 опирается на опыт TREND и был размещён на том же месте, в горах Тянь-Шаня, в китайской провинции Синьцзян. Как подсказывает название, массив состоит из 35 детекторов – бабочковидных антенн. Антенны развернуты в инфраструктуре массива 21 CentiMeter (21CMA) [20], в прямоугольной решетке длиной 800 м по оси восток-запад и 2400 м по оси север-юг. Эта установка оптимизирована для обнаружения потоков, распространяющихся с севера, направления, из которого их радиоизлучение является наиболее интенсивным, поскольку геомагнитный эффект максимален.

Для проверки эффективности антенн GRANDProto35 также включает в себя автономный поверхностный массив детекторов частиц, размещённый вместе с массивом антенн. Он состоит из сцинтилляционных пластин размером 70,7 см × 70,7 см × 2 см, соединенных с фотоумножителями Hamamatsu R7725. Для того чтобы соответствовать ожидаемой эффективности радиобнаружения, сцинтилляторы смонтированы на опорной конструкции, которая наклонена на север. Эта установка оптимизирует эффективную площадь для ливней, наклоненных примерно на 40° с севера. Сбор данных и срабатывания массива сцинтилляторов полностью независимы от радиомассивов: аналоговые сигналы, собранные фотоумножителями, передаются по оптоволоконному кабелю в центральную цепочку сбора данных, где они оцифровываются в реальном времени. Если в сигналах от трех или более сцинтилляторов одновременно наблюдается импульс, сигналы записываются на диск. В автономном режиме можно количественно оценить эффективность радиобнаружения и отсеять фоновые события.



**Рис. 11.** Одна из антенн, используемая в GRANDProto35, развёрнутая на строительной площадке в горах Тянь-Шаня в Китае.

### **4.3.3. GRANDProto300 (2020).**

GRANDProto300 будет представлять собой массив из 300 антенн, развернутых на площади более 200 км<sup>2</sup>. В качестве антенн впервые будут использованы HorizonAntenna. GRANDProto300 будет действовать в качестве первопроходца для более поздних, масштабных этапов GRAND. Его главная цель – продемонстрировать эффективность метода детектирования GRAND. То есть что из одних только данных о радиоизлучении можно фиксировать практически горизонтальные атмосферные ливни, отделять их от фона и восстанавливать свойства первичных частиц с точностью, аналогичной стандартным методам, используемым для обнаружения космических лучей. Поскольку GRANDProto300 не будет достаточно большим, чтобы обнаружить астрофизические нейтрино, эффективность будет тестироваться на атмосферных ливнях, инициируемых сильно наклонёнными космическими лучами сверхвысоких энергий.

Данную фазу проекта планируется возводить на площадке в провинции Цинхай, на границе Тибетского плато. Строительство планируется завершить в 2021 г.

### **4.3.4. GRAND10k (2025).**

GRAND10k будет первым большим массивом GRAND и первым массивом, чувствительным к нейтрино сверхвысоких энергий. Он будет состоять из 10000 антенн, развернутых на площади около 10000 км<sup>2</sup>, в местах, тщательно отобранных с точки зрения их пригодности для обнаружения инициируемых нейтрино атмосферных ливней.

GRAND10k будет самым большим из построенных детекторов космических лучей сверхвысокой энергии с апертурой около 12000 км<sup>2</sup> × ср для энергий выше 10<sup>10</sup> ГэВ. Кроме того, в GRAND10k будут модифицированы радиоастрономические и космологические способы измерения, доступные для GRANDProto300.

### **4.3.5. GRAND200k (2030-е).**

GRAND200k будет полной запланированной конфигурацией GRAND. Будучи модульной конструкцией, он будет состоять из 20 независимых массивов по 10000 антенн каждая – реплик GRAND10k – построенных в отдельных географических точках, которые являются горячими точками для обнаружения нейтрино. В совокупности они составят 200 000 антенн, покрывающих 200 000 км<sup>2</sup>. Значительных изменений дизайна по сравнению с GRAND10k не предполагается; антенны, электроника, и сбор данных будут проверены на предыдущем этапе или ранее.

#### 4.4. Проблемы и перспективы.

Проблемой метода являются описанные ограничения по аромату нейтрино. Несмотря на то, что вероятность обнаружения электронных и мюонных нейтрино ненулевая, возможный детектируемый поток сокращается. Также существенной проблемой является непосредственное возведение столь обширных массивов детекторов, а именно поиск подходящих локаций, процессы возведения и снабжения электроникой. Однако если же удастся разрешить эти трудности, то созданные детекторы достигнут очень высокой точности и чувствительности в области детектирования космических лучей сверхвысоких энергий, в частности нейтрино, принося огромный вклад в нейтринную астрономию. На более поздних этапах собранная статистика позволит разрешить мелкие анизотропии и особенности вблизи высокоэнергетического конца их спектра.

#### 5. Заключение.

В процессе выполнения данной работы были изучены наиболее развитые и перспективные методы детектирования нейтрино высоких энергий. А именно метод, основанный на эффекте Черенкова-Вавилова, гидроакустический метод и набирающий обороты в последние годы метод детектирования радиоизлучения горизонтальных атмосферных ливней. В общих словах изложено теоретическое описание каждого из методов. Были рассмотрены самые продвинутые нейтринные телескопы, функционирующие в настоящее время: Baikal-GVD, IceCube, KM3NeT, а также GRAND. Изучены их конфигурации, принципы детектирования, перспективы и планы развития. Рассмотрены детектирующие единицы – оптические модули, гидрофоны и радиоантенны.

Помимо этого, подчеркнута важность исследований в области нейтринной астрофизики. Нейтрино несут ключевую информацию о космических объектах, галактических и внегалактических. Работа детекторов следующего поколения позволит раскрыть многие тайны, связанные со строением и свойствами множества объектов космоса. В будущем ожидаются значительные увеличения темпов сбора статистики, и на телескопы возлагаются большие надежды.

#### 6. Список литературы.

- [1] High-energy cosmic rays and the Greisen–Zatsepin–Kuz'min effect (2014).  
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/3/036901>
- [2] Физика нейтрино сверхвысоких энергий – Е. В. Широков.  
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino/uen/index.html>
- [3] Способы детектирования нейтрино. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino1/neutrino07.htm>

- [4] Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий (2015). DOI: [10.3367/UFNr.0185.201505j.0531](https://doi.org/10.3367/UFNr.0185.201505j.0531)
- [5] <https://baikalgvd.jinr.ru/> – сайт проекта.
- [6] <https://www.km3net.org/> – сайт проекта.
- [7] Status and first results from the ARCA and ORCA lines of the KM3NeT experiment (2019). <https://www.sci-hub.tw/10.1051/epjconf/201920901006>
- [8] Letter of intent for KM3NeT 2.0 (2016). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/43/8/084001>
- [9] <https://icecube.wisc.edu/> – сайт проекта.
- [10] Dissecting the region around IceCube-170922A: The blazar TXS 0506+056 as the first cosmic neutrino source (2018). DOI: [10.1093/mnras/sty1852](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1852)
- [11] Detection of underwater acoustic signals induced by ultra-high energy neutrinos interactions (2008). [https://www.roma1.infn.it/people/capone/AHEN/Thesis/FrancescoSimeone/Simeone\\_PhDThesis.pdf](https://www.roma1.infn.it/people/capone/AHEN/Thesis/FrancescoSimeone/Simeone_PhDThesis.pdf)
- [12] Акустические детекторы нейтрино – Дарья Бецис. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/acustdet/index.html>
- [13] The Acoustic Detection of Ultra-High Energy Neutrinos – a Status Report (2008). [https://icecube.wisc.edu/tev/proceedings/Thompson/009\\_TEVPA2.pdf](https://icecube.wisc.edu/tev/proceedings/Thompson/009_TEVPA2.pdf)
- [14] Background studies for acoustic neutrino detection at the South Pole (2018). <https://arxiv.org/pdf/1103.1216v2.pdf>
- [15] <http://grand.cnrs.fr/> – сайт проекта.
- [16] Characterization of neutrino signals with radiopulses in dense media through the LPM effect (1999). <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9901278v1>
- [17] The Giant Radio Array for Neutrino Detection (GRAND): Science and Design (2018). [doi.org/10.1007/s11433-018-9385-7](https://doi.org/10.1007/s11433-018-9385-7)
- [18] Antenna development for astroparticle and radioastronomy experiments (2012). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.10.141>
- [19] Antennas for the Detection of Radio Emission Pulses from Cosmic-Ray induced Air Showers at the Pierre Auger Observatory (2012). DOI: [10.1088/1748-0221/7/10/P10011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/10/P10011)
- [20] Radio Sources in the NCP Region Observed with the 21 Centimeter Array (2016). DOI: [10.3847/0004-637X/832/2/190](https://doi.org/10.3847/0004-637X/832/2/190)