

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Московский государственный университет имени М.В.

Ломоносова»

Физический факультет

Кафедра Общей Ядерной Физики

**Дипломная работа**

**«Влияние свойств среды на детектирующие способности  
средиземноморских нейтринных телескопов»**

Выполнил студент

413 группы

Шаяхметов Глеб Эмилевич

Научный руководитель

к.ф. - м.н., доцент

Широков Евгений Вадимович

Москва, 2022 г.

## Содержание

Введение .....	3
1. Обнаружение нейтрино .....	5
2. Черенковское излучение .....	8
3. Введение в KM3NeT .....	11
4. Блоки детектирования KM3NeT .....	15
4.1 Цифровые оптические модули KM3NeT .....	16
4.2 Основные компоненты ЦОМ .....	17
4.3 Электроника внутри ЦОМ .....	20
5. Оптические свойства глубоководной среды .....	22
5.1. Измерение оптических параметров .....	22
5.2. Параметры передачи света .....	22
6. Обработка результатов .....	24
6.1 Цели и задачи .....	24
6.2. Описание модели .....	24
6.3. Соленость .....	25
6.4. Длина пропускания и глубина .....	27
6.5. Сравнение возможных мест расположения детекторов в Средиземном море .....	28
6.6. Результаты моделирования .....	29
Заключение .....	31

## Введение

Нейтрино, элементарная субатомная частица без электрического заряда, очень малой массы и  $1/2$  единицы спина. Нейтрино принадлежат к семейству частиц, называемых лептонами, на которые не действует сильное взаимодействие. Скорее нейтрино подвержены слабому взаимодействию, лежащему в основе некоторых процессов радиоактивного распада. Существует три типа нейтрино, каждый из которых связан с заряженным лептоном, т. е. электрон, мюон и тау, и поэтому им присвоены соответствующие названия электрон-нейтрино, мюон-нейтрино и тау-нейтрино. Каждый тип нейтрино также имеет компонент антивещества, называемый антинейтрино. Термин нейтрино иногда используется в общем смысле для обозначения как нейтрино, так и его античастицы.

Основные свойства электронного нейтрино — отсутствие электрического заряда и малая масса — были предсказаны в 1930 году австрийским физиком Вольфгангом Паули для объяснения очевидных потерь энергии в процессе радиоактивного бета-распада. Физик итальянского происхождения Энрико Ферми развил (1934 г.) теорию бета-распада и дал название «частице-призраку». Электрон-нейтрино испускается вместе с позитроном в положительном бета-распаде, а электрон-антинейтрино излучается вместе с электроном в отрицательном бета-распаде.

Несмотря на такие предсказания, нейтрино не обнаруживались экспериментально в течение 20 лет из-за слабости их взаимодействия с веществом. Поскольку нейтрино не заряжены электрически, они не испытывают электромагнитных сил и, следовательно, не вызывают ионизации вещества. Кроме того, они реагируют с веществом только через слабое взаимодействие. Таким образом, нейтрино являются наиболее проникающими субатомными частицами, способными проходить через огромное количество атомов, не вызывая никакой реакции. Только 1 из 10 миллиардов этих частиц, преодолевая сквозь вещество расстояние, равное

диаметру Земли, вступает в реакцию с протоном или нейтроном. Наконец, в 1956 году группа американских физиков под руководством Фредерика Рейнса сообщила об открытии электронного антинейтрино. В их экспериментах антинейтрино, испускаемые в ядерном реакторе, реагировали с протонами с образованием нейтронов и позитронов. Уникальные и редкие энергетические сигнатуры этих последних побочных продуктов предоставили доказательства существования электронного антинейтрино.

Открытие второго типа заряженных лептонов, мюона, стало отправной точкой для окончательной идентификации второго типа нейтрино, мюонных нейтрино. Идентификация мюонного нейтрино в отличие от электронного нейтрино была осуществлена в 1962 г. на основе результатов эксперимента на ускорителе частиц. Мюонные нейтрино высоких энергий производились при распаде пи-мезонов и направлялись на детектор для изучения их реакций с веществом. Хотя они так же неактивны, как и другие нейтрино, было обнаружено, что мюонные нейтрино производят мюоны, но никогда не производят электроны в тех редких случаях, когда они реагируют с протонами или нейтронами. Американские физики Леон Ледерман, Мелвин Шварц и Джек Стейнбергер получили Нобелевскую премию по физике 1988 года за установление идентичности мюонных нейтрино.

## 1. Обнаружение нейтрино

Обнаружение нейтрино всегда было тяжелой задачей в первую очередь из-за того, что нейтрино участвует только в слабом взаимодействии.

Мы можем обнаружить присутствие нейтрино в нашем эксперименте, только если оно взаимодействует с чем-либо. Нейтрино взаимодействуют двумя способами:

- взаимодействия заряженного тока, при которых нейтрино превращается в эквивалентный заряженный лептон (например, обратный бета-распад,  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ ) — эксперимент обнаруживает заряженный лептон;
- взаимодействия с нейтральным током, когда нейтрино остается нейтрино, но передает энергию и импульс всему, с чем оно взаимодействовало — мы обнаруживаем эту передачу энергии либо потому, что мишень отскакивает (например, нейтрино-электронное рассеяние,  $\nu + e \rightarrow \nu + e$ ), либо потому что он распадается (например,  $2H + \nu \rightarrow p + n + \nu$ ).

Заряженно-токовые взаимодействия происходят через обмен  $W_{\pm}$  бозоном, нейтрально-токовые через обмен  $Z_0$  бозоном.

В принципе, с взаимодействиями заряженных токов легче работать, потому что характерное поведение электронов и мюонов в детекторах нам известно и поэтому их довольно легко идентифицировать. У них также есть то преимущество, что они «помечают» нейтрино: если электрон производится, он произошел от электронного нейтрино. Однако должно быть достаточно доступной энергии ( $E > mc^2$ ) - это означает, что для нейтрино очень низкой энергии (например, солнечных и реакторных нейтрино) взаимодействия заряженных токов возможны только для электрон-нейтрино.

На протяжении многих лет в нейтринных экспериментах использовались различные детекторные технологии, в зависимости от

требований конкретного исследования. Желательные особенности нейтринного эксперимента обычно включают несколько из следующих:

- низкий энергетический порог, позволяющий обнаруживать и изучать низкоэнергетические нейтрино (особенно солнечные нейтрино);
- хорошее угловое разрешение, позволяющее точно реконструировать направление обнаруженной частицы (особенно для астрофизических нейтрино);
- хорошая идентификация частиц, так что электроны и мюоны могут быть хорошо разделены (необходимо для экспериментов с колебаниями);
- хорошее измерение энергии, позволяющее реконструировать энергию нейтрино (полезно для измерения колебаний и астрофизики);
- большое временное разрешение, позволяющее изучать временную эволюцию переходных сигналов (важно для нейтрино сверхновых и важно для других астрофизических источников);
- идентификация заряда, чтобы можно было разделить лептоны и антилептоны

Невозможно иметь все эти вещи в одном эксперименте — например, эксперименты с очень низким энергетическим порогом, как правило, не имеют хорошего углового или энергетического разрешения.

На сегодняшний день существует несколько экспериментальных методов обнаружения нейтрино, в этой работе будет рассмотрен метод на основе Черенковского излучения.

Почему изучать нейтрино важно?

Нейтринная астрономия — это новый и уникальный метод наблюдения за Вселенной. Нейтрино может выходить из источников, окруженных плотным веществом или полями излучения, и может

перемещаться на большие расстояния без поглощения и взаимодействия, что делает эту частицу уникальной. Эта специфика нейтринной астрономии означает, что помимо знаний о космических ускорителях, которые могут быть увидены через другие каналы, она может привести к открытию неизвестных до сих пор объектов. Для известных источников высоких энергий, таких как активные ядра галактик, гамма-всплески, микроквазары и остатки сверхновых, нейтрино позволят однозначно различать адронные и электронные механизмы ускорения и более точно локализовать места ускорения, чем детекторы заряженных космических лучей. Способность нейтрино покидать плотные источники означает, что могут быть обнаружены новые места компактного ускорения. Кроме того, эта особенность дает эксклюзивный сигнал для косвенных поисков темной материи, основанных на обнаружении высокоэнергетических продуктов аннигиляции частиц темной материи, которые могли быть скоплены в ядрах плотных объектов, таких как Солнце, Земля и центр Галактики. В этом вопросе угловое разрешение нейтринного телескопа имеет особое значение: не только для разрешения и корреляции источников с другими инструментами, использующими другие мессенджеры, но и потому, что оно играет важную роль в отсеке фона. Поток нейтрино от взаимодействия космических лучей с атмосферой («атмосферные нейтрино») является непреодолимым источником фона, который отличается от нейтринного сигнала от удаленных объектов только в энергетическом спектре. Чтобы отличить сигнал от точечных источников на этом фоне, хорошее угловое разрешение значительно улучшает чувствительность телескопа. При заданной энергии это угловое разрешение зависит от оптических рассеивающих свойств среды и размера детектора.

## 2. Черенковское излучение

Явление, которое мы сейчас называем «Черенковским излучением», было экспериментально изучено Павлом Черенковым, а теоретически — Ильей Франком и Игорем Таммом в середине 1930-х годов. За эту работу в 1958 г. Черенков, Франк и Тамм были удостоены Нобелевской премии. Экспериментальная деятельность была начата Черенковым в Ленинграде в 1933 г. под руководством отца нелинейной оптики С.И. Вавилова и продолжена после переезда Вавилова и его группы в Ленинград. Пьер и Мария Кюри в первые годы 20-го века были хорошо знакомы с голубоватым свечением, наблюдаемым в темноте от стеклянных сосудов, содержащих соли радия. Это было «Черенковское излучение», но никаких систематических исследований этого явления не проводилось до тех пор, пока Маллетт не изучил этот эффект более подробно, отметив, что синее свечение исходило от ряда прозрачных объектов, когда поблизости находился радиоактивный источник. Маллетт определил спектр света (используя спектрометр, разработанный Фабри), установив с помощью фотографических методов, что спектр был непрерывным и простирался, по крайней мере, до его предела измерения в 370 нм. Однако Маллетт продолжил свои исследования, не упуская из виду поляризацию излучения и, что особенно важно, асимметрию его излучения. Экспериментальная методика, принятая Черенковым и предложенная Вавиловым, заключалась в облучении различных жидкостей  $\gamma$ -лучами от источника радия массой 104 мг. Его первоначальной задачей было изучение свечения флуоресценции, индуцированной солями уранила. Его ранние эксперименты проводились с использованием наблюдений невооруженным глазом с интенсивностью излучения, определяемой с помощью метода, называемого «гашением», в котором глаз, адаптированный к темноте, использовался с градуированным клином для калибровки интенсивности света. Черенков обнаружил, что свет излучался даже тогда, когда в сосуде находилась только серная кислота, растворитель ураниловой соли. Далее он продемонстрировал, что свет



наблюдается в ряде различных растворителей. Наблюдение за поляризацией было важным ключом к окончательной интерпретации, но решающим прорывом стало открытие Черенкова в 1936 г., что излучение испускается асимметрично только в прямом направлении по отношению к направлению входящего пучка  $\gamma$ -квантов, под углом в соответствии с принципом Гюйгенса. Асимметричное излучение исключало объяснение, предложенное Вавиловым, а именно то, что наблюдаемое было излучением комптоновских электронов, созданных гамма-лучами, тормозящимися в жидкости, т. е. тормозным излучением в оптическом диапазоне. Именно Вавилов попросил Тамма изучить это явление теоретически, и он и Франк, который также помогал Черенкову в некоторых из более поздних наблюдений, разработали теорию, в которой излучение приписывалось дипольному излучению, возникающему из-за нестационарной поляризации атомов в среде, пересекаемой заряженными частицами. Когда такая частица медленно движется через среду, излучение возбужденных диполей испускается симметрично вокруг пути. Однако если скорость частицы будет больше фазовой скорости света, то всплески электромагнитного излучения от всех точек вдоль трассы будут синфазными, а на удалении от нее будет электромагнитная волна. Уравнение, определяющее угол раскрытия конуса, по которому распространяется излучение, имеет вид

$$\cos\theta = 1/\beta n \quad (1)$$

где  $\theta$  — угол раскрытия конуса,  $n$  — показатель преломления среды и  $\beta = v/c$ , где  $v$  — скорость частицы, а  $c$  — скорость света. Из этого уравнения видно, что существует пороговое значение  $\beta$ , ниже которого не будет когерентного излучения по отношению к траектории частицы, и что для высокоскоростной частицы с  $\beta \sim 1$  существует максимальный угол излучения, Черенковский угол  $\theta_{max} = \cos^{-1}(1/n)$ . Черенковское излучение часто называют аналогом ударной волны, испускаемой в акустическом диапазоне снарядом или самолетом, движущимся в воздухе со скоростью, превышающей скорость звука, или носовой волной, создаваемой лодкой,

движущейся по воде. Признавая эту аналогию, Тамм в своей Нобелевской лекции ввел выражение «поющие электроны», хотя, конечно, любая заряженная частица соответствующей скорости будет производить Черенковское излучение. В первых работах Черенкова заряженными частицами были комптоновские электроны, произведенные фотонами из радия. Это затрудняло проверку угловой зависимости от  $\beta$  уравнения 1, поскольку электроны имели целый диапазон энергий. Черенков первым предположил, что излучение можно использовать для обнаружения заряженных частиц.

### 3. Введение в KM3NeT

Обнаружение нейтрино высоких энергий от астрофизических источников является основной физической задачей детектора KM3NeT. Изучение нейтрино высоких энергий, образующихся в галактических и внегалактических источниках, может пролить свет на механизмы образования частиц высоких энергий и, если нейтрино будут обнаружены из определенных источников, может дать важные ограничения на модели ускорения. Более того, обнаружение нейтрино даст четкий признак наличия адронных процессов в образовании частиц высоких энергий. В многокомпонентном подходе обнаружение нейтрино высоких энергий также прольет свет на до сих пор неизвестное происхождение наблюдаемых космических лучей высоких энергий и гамма-лучей высоких энергий.  $\gamma$ -кванты высоких энергий могут образовываться как по адронным, так и по лептонным каналам. Более того, внегалактические  $\gamma$ -кванты вследствие взаимодействия с межгалактической средой приходят к Земле с уменьшенным потоком и искаженным энергетическим спектром. Космические лучи высокой энергии, которые в основном представляют собой протоны, отклоняются межгалактическими магнитными полями и не могут использоваться для указания на источники. Нейтрино, являющиеся нейтральными и слабо взаимодействующими частицами, не отклоняются и не поглощаются и могут достичь Земли, неся важную информацию о далекой и бурной Вселенной. С экспериментальной точки зрения обнаружение нейтрино высоких энергий является сложной задачей. Нужны большие детекторы с размерами порядка кубического километра и очень низким фоном. Наиболее эффективный метод регистрации нейтрино в диапазоне энергий от 100 ГэВ до 100 ПэВ основан на регистрации с помощью оптических сенсоров Черенковских фотонов, испускаемых вторичными частицами, образующимися при взаимодействиях нейтрино, происходящих в объеме внутри или вокруг детектора. Для поддержания фона на приемлемом уровне детекторы должны быть экранированы от

частиц, образующихся при взаимодействии космических лучей с атмосферой. Для удовлетворения этих требований детекторы нейтрино высоких энергий размещают под тысячами метров льда или воды. На сегодняшний день детектор IceCube размером около 1 кубического километра работает на глубинах от 1450 до 2450 м во льдах Южного полюса. С помощью детектора IceCube обнаружен поток нейтрино высоких энергий астрофизического происхождения. Также существует Байкальский нейтринный телескоп, струны с оптическими модулями которого спускаются на плоское дно озера на глубину 700-1300м.

Детектор KM3NeT можно описать как трехмерную матрицу фотосенсоров, чувствительных к Черенковскому излучению, испускаемому продуктами нейтринных взаимодействий на глубине. Время прибытия Черенковского света на каждый датчик вместе со знанием их пространственного положения используются для реконструкции траектории частицы, производящей Черенковский свет, и направления движения нейтрино. Интенсивность обнаруженного света может предоставить дополнительную информацию об энергии нейтрино. Фотодатчики называются цифровыми оптическими модулями (ЦОМ, DOM на англ.), и они подвешены в море в вертикальных конструкциях, называемых блоками детектирование (БД, DU на англ.). Модульная конструкция позволяет использовать разное расстояние между БД и ЦОМ, чтобы охватить разные диапазоны энергий в соответствии с физическими задачами. После первого этапа строительства KM3NeT 2.0 преследует две научные цели: открытие и наблюдение источников нейтрино высоких энергий во Вселенной и определение иерархии масс нейтрино. Две цели для двух детекторов: ARCA, который оптимизирован для наблюдения за астрофизическими нейтрино с энергией выше ТэВ, и ORCA, более плотный детектор, нацеленный на колебания атмосферных нейтрино в диапазоне нескольких ГэВ. Две цели, два детектора, расположенные на двух разных морских участках: ARCA, расположенный на участке KM3NeT-It, на юге

побережья Сицилии в Италии, в 100 км от берега Капо Пассеро, на глубине 3400 м, и ORCA, расположенный на площадке KM3NeT-Fr, в 40 км от берега Тулона, Франция, на глубине 2475 м.

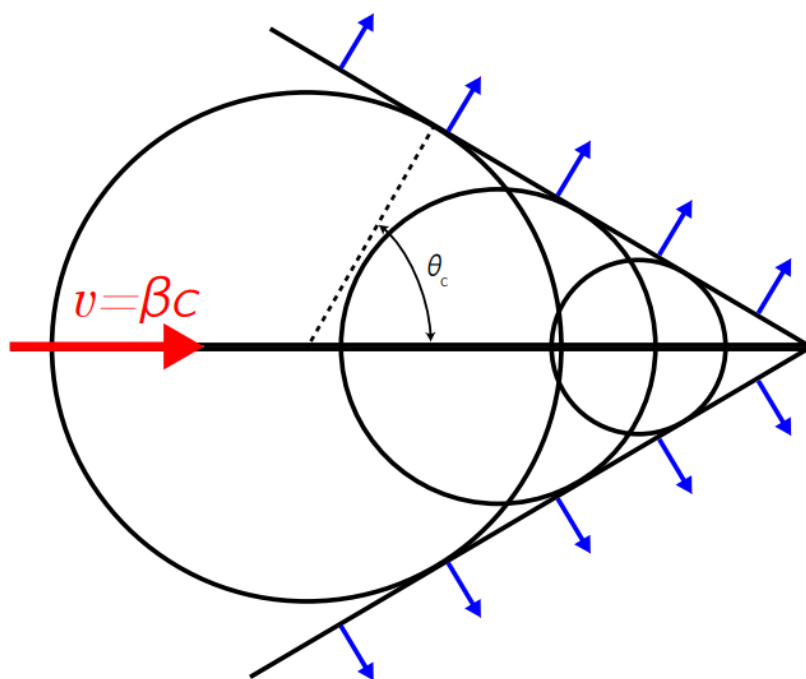


Рис. 1. Создание частицей Черенковского конуса

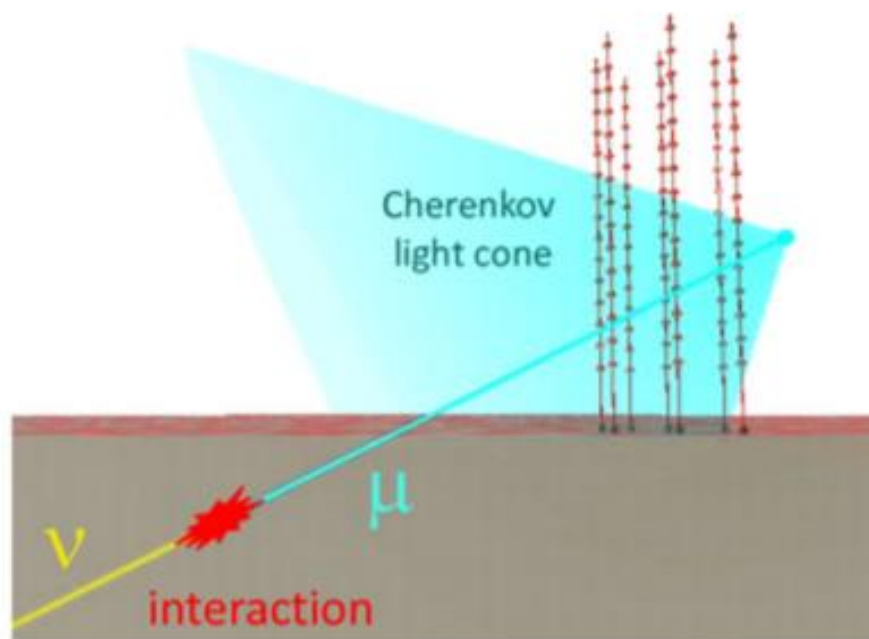


Рис. 2. Принцип регистрации мюонных нейтрино высоких энергий в подводном нейтринном телескопе. Входящее нейтрино взаимодействует с материалом вокруг детектора,

создавая мюон. Мюон излучает Черенковский свет в морской воде, который затем регистрируется матрицей датчиков света. Исходный спектр света, излучаемого мюоном, ослабляется в воде, так что преобладающий обнаруженный диапазон длин волн составляет от 350 до 500 нм.

## 4. Блоки детектирования КМЗНеТ

Рассмотрим подробнее, из чего состоят оптически блоки детектора КМЗНеТ. Блоки обнаружения, состоящие из двух параллельных вертикальных тросов Дупеета, закреплены на морском дне и удерживаются в натянутом состоянии с помощью системы подводных буюв наверху. Каждый блок обнаружения оснащен 18 цифровыми оптическими модулями (ЦОМ), а также содержит все необходимые устройства для передачи данных и электропитания. В глубокой воде все ЦОМы крепятся к тросам внешним титановым хомутом. К тросам также прикреплен вертикальный электрооптический кабель (англ. VEOC), который содержит два медных провода для передачи энергии и 18 оптических волокон для передачи данных. На рисунке 1 показан художественный вид блока детектирования КМЗНеТ. В месте расположения каждого ЦОМ два силовых проводника и одно волокно разветвляются с помощью коммутационной коробки, расположенной снаружи каждого ЦОМ. Для морских развертываний струнообразная структура БД наматывается вокруг большой сферической рамы, ракеты-носителя, в полостях которой расположены ЦОМ. Надводное судно используется для развертывания ракеты-носителя в заданной точке на морском дне с точностью до 1 метра. В глубине морских участков механическая система, активируемая дистанционно управляемым аппаратом, запускает вертикальное развертывание струны. Ракета-носитель начинает подниматься на поверхность, медленно вращаясь и выпуская ЦОМ. В конце пустая пусковая установка всплывает на поверхность и извлекается для последующего развертывания, оставляя БД в вертикальном положении. В конфигурации ARCA с энергиями мишеней выше 1 ТэВ каждый БД имеет высоту около 700 м, а ЦОМ расположены на расстоянии 36 м по вертикали. Расстояние по горизонтали БД составляет около 95 м. Для конфигурации ORCA, предназначенной для более низких энергий в диапазоне нескольких ГэВ, каждый БД имеет высоту около 200 м, а

расстояние между ЦОМ по вертикали составляет 9 м. Расстояние по горизонтали БД составляет около 20 м.

#### **4.1 Цифровые оптические модули KM3NeT**

Цифровые оптические модули (ЦОМ), которые представляют собой чувствительную часть нейтринного телескопа, состоят из устойчивых к давлению прозрачных стеклянных сосудов диаметром 17 дюймов, в каждом из которых находится 31 фотоумножитель (ФЭУ) с диаметром фотокатода 3 дюйма и все связанные с ними входная и считывающая электроника. На рисунке 2 представлено схематическое изображение ЦОМ. Решение с несколькими ФЭУ представляет собой инновационный дизайн, учитывая, что оптические модули всех других нейтринных телескопов, ANTARES, Baikal и IceCube, имеют оптические модули с одним большим фотоумножителем, обычно с диаметром фотокатода 10 дюймов. ЦОМ с несколькими ФЭУ предлагает несколько преимуществ по сравнению с традиционными оптическими модулями, использующими один большой ФЭУ: он почти в три раза превышает площадь фотокатода одиночной стеклянной сферы, оснащенной 10-дюймовым ФЭУ, и имеет почти однородное угловое покрытие. Влияние магнитного поля Земли на ФЭУ малых размеров незначительно, поэтому магнитный экран не требуется. Поскольку каждый ФЭУ работает независимо, можно выполнять точный подсчет фотонов, поскольку можно с высокой эффективностью идентифицировать прибытие более одного фотона в ЦОМ. Сегментированная схема фотокатода также предоставляет информацию о направлении с почти изотропным полем зрения и обеспечивает подавление оптического фона в воде на уровне обнаружения. Предлагаемая конструкция ЦОМа соответствует всем основным требованиям, предъявляемым проектом: низкий уровень зашумленности сигналов; точность синхронизации порядка 1 нс, необходимая для точной реконструкции треков частиц и эффективного подавления фона. Он также



должен выдерживать условия окружающей среды и эксплуатации, такие как гидростатическое давление до 400 бар, коррозию, удары и вибрацию, а также обеспечивать срок службы более 10 лет.

#### **4.2 Основные компоненты ЦОМ**

ЦОМ состоит из прозрачного сферического стеклянного сосуда, в котором находится 31 ФЭУ, связанная с ними внешняя и считывающая электроника, компоненты калибровки и вспомогательные системы для контроля и управления. Вид ЦОМ внутри показан на рис. 2. Сосуд представляет собой 17-дюймовую устойчивую к давлению стеклянную сферу производства Nautilus, состоящую из двух отдельных полусфер из боросиликатного стекла толщиной 14 мм. Стекло обеспечивает достаточную устойчивость к воде и экстремальному гидростатическому давлению глубоководной среды, сохраняя при этом прозрачность более 95% при длине волны 350 нм. Два полушария составляют две разные части ЦОМа, обычно называемые верхней и нижней частями. 31 ФЭУ расположены в виде 5 колец по 6 ФЭУ плюс один ФЭУ внизу, направленный вертикально вниз. Нижняя полусфера содержит 19 ФЭУ, верхняя полусфера — 12 ФЭУ.



Рис. 3. Вид блока детектирования

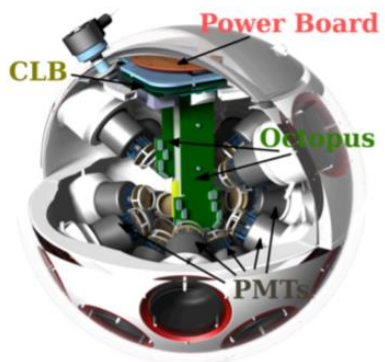


Рис. 4. Сверху: изображение ЦОМ с коммутационной коробкой и креплением на двух параллельных веревках. Внизу: эскиз внутренних компонентов ЦОМ.

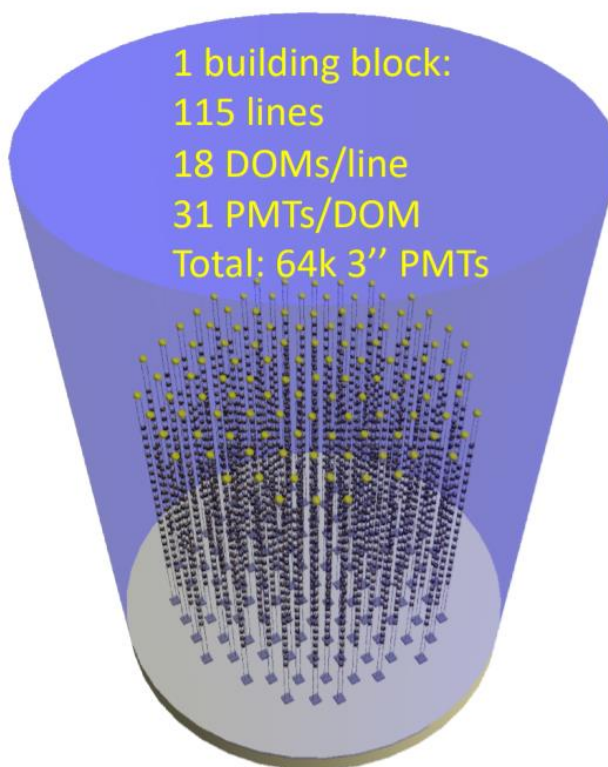


Рис. 5. Схема детектора ORCA, состоящего из 115 струн, 18 ЦОМ на одну линию, 31 ФЭУ в одном ЦОМе

Сами ФЭУ имеют выпуклый бищелочной фотокатод диаметром 80 мм и 10-каскадную диодную структуру. Внутри ЦОМа все ФЭУ удерживаются на месте нейлоновой опорной конструкцией, напечатанной на 3D-принтере, что обеспечивает высокую точность, прочность и легкость. Для повышения эффективности сбора фотонов без увеличения диаметра ФЭУ кольцо отражателя окружает лицевую сторону каждого ФЭУ под углом  $45^\circ$  к оси ФЭУ. Таким образом, КПД увеличивается на 20–40%. Пространство между опорной конструкцией, окнами ФЭУ и стеклянной сферой заполнено оптическим силиконовым гелем, обеспечивающим оптическую и механическую связь. Опорная конструкция и гель достаточно гибкие, чтобы быть устойчивыми к вибрации и ударам при обращении и развертывании, а также допускают деформацию стеклянной сферы под гидростатическим давлением в глубоководных районах. Алюминиевая

охлаждающая конструкция обеспечивает теплопроводность между компонентами внутри и окружающей средой снаружи сферы. Основные теплые части монтируются внутри ЦОМа в тепловом контакте с этой алюминиевой конструкцией. Потребляемая мощность ЦОМа со всеми операционными системами составляет около 7 Вт. Специально разработанный титановый пенетратор установлен на верхней полусфере ЦОМа и содержит два медных провода для передачи энергии и один оптический кабель для передачи данных. На верхней полусфере также установлен вакуумный клапан для обеспечения вакуума у ФЭУ под давлением 0,2 бар во время закрытия двух полусфер. Внутри установлен манометр для контроля относительного давления в ФЭУ. На рис. 3 показан покомпонентный вид всего ЦОМ. Оптический модуль также содержит три дополнительные сенсорные системы. На верхней полусфере установлен светодиодный маяк для подачи калиброванных световых импульсов в воду для освещения соседних оптических модулей для калибровки времени. На внутреннюю поверхность нижней полусферы приклеен акустический пьезодатчик для измерения положения совместно с системой акустического позиционирования на морском дне. Система компаса, установленная в качестве мезонина на основной электронной плате, предоставляет данные компаса, наклона и акселерометра, используемые для восстановления ориентации ЦОМа в воде.

#### **4.3 Электроника внутри ЦОМ**

Все электронные устройства, работающие в ЦОМ, были разработаны для обеспечения считывания на основе концепции «все данные на берег», в которой все аналоговые сигналы от каждого ФЭУ, которые превышают заданный порог, оцифровываются, а все цифровые данные отправляются на берег по оптоволоконной сети Ethernet. Каждый ФЭУ работает как отдельный оптический датчик, с индивидуальной маломощной высоковольтной базой со встроенным усилением и настраиваемым пороговым значением. Время прибытия фотона и время превышения порога

каждого у ФЭУ записываются отдельным преобразователем времени и в цифру, реализованным в программируемой пользователем матрице (ППМ). Порог устанавливается на уровне 0,3 средней высоты одиночного фотонного импульса, а база высокого напряжения устанавливается для обеспечения усиления в  $3 \times 10^6$  раз для каждого ФЭУ. ППМ монтируется на центральной логической плате (ЦЛП), которая передает данные на берег через сеть Ethernet из оптических волокон с помощью лазерного приемника/приемопередатчика. Данные, предоставляемые ФЭУ, собираются и распределяются в ЦЛП с помощью двух так называемых осьминогов. Плата питания обеспечивает питание постоянным током для всех систем. Эта плата контролируется и управляется ППМ. Он питается от 12 В постоянного тока, подаваемого через пенетратор, установленный в верхней полусфере ЦОМа и подключенный к преобразователю постоянного тока, размещенному в коммутационной коробке снаружи стеклянной сферы. Каждый ЦОМ в блоке обнаружения обменивается данными на выделенной длине волны, которая мультиплексируется с другими длинами волн ЦОМ для передачи по одному оптическому волокну на берег. Трансляция сигнала береговых часов, необходимая для отметки времени в каждом ЦОМ, встроена в протокол Gb-Ethernet. Протокол White Rabbit модифицирован для реализации трансляции тактового сигнала и позволяет синхронизировать с разрешением 1 нс все ФЭУ внутри ЦОМ и все ЦОМ, установленные в БД КМ3NeT.

## 5. Оптические свойства глубоководной среды

### 5.1. Измерение оптических параметров

Изучение оптических свойств глубоководной среды проводилось в рамках многолетней программы, охватывающей все сезоны. Морская вода поглощает и рассеивает свет в зависимости от температуры воды, солености, а также характеристик и концентрации взвешенных частиц. Эти параметры различны на разных морских участках и могут изменяться во времени. Кроме того, интенсивность и временная зависимость фонового света от радиоактивности и биолюминесценции были измерены в ходе долгосрочных исследовательских кампаний и в эксперименте ANTARES.

### 5.2. Параметры передачи света

На передачу света через среду влияют поглощение и рассеяние. Преобладают процессы рассеяния, при которых изменяется только направление света, тогда как явления рассеяния, при которых также изменяется длина волны фотона (например, эффект комбинационного рассеяния), происходят реже. Рассеяние может происходить либо на молекулах (рэлеевское рассеяние), либо на твердых частицах (рассеяние Ми). Чтобы правильно описать прозрачность морской воды в зависимости от длины волны, необходимо измерить параметры, описывающие поглощение и рассеяние, такие как длина поглощения  $L_a(\lambda)$  длина рассеяния  $L_b(\lambda)$  и длина затухания  $1/L_c(\lambda) = 1/L_a(\lambda) + 1/L_b(\lambda)$ . Каждая из этих длин представляет собой путь, после которого пучок начальной интенсивности  $I_0$  и длины волны  $\lambda$  уменьшается в  $e$  раз за счет поглощения, рассеяния или того и другого в соответствии с формулой

$$I_{a,b,c}(x) = I_0 e^{\left(-\frac{x}{L_{a,b,c}}\right)}$$

где  $x$  — оптический путь, пройденный лучом. В литературе также используются коэффициенты поглощения и рассеяния ( $a = 1/L_a(\lambda)$ ) и

$b = 1/L_b$ ,  $(\lambda)$  соответственно) используются для описания пропускания света через вещество. Сумма коэффициентов рассеяния и поглощения называется коэффициентом ослабления  $c$ . Другими параметрами, обычно используемыми в литературе, являются эффективная длина рассеяния.

$$L_b^{eff} = \frac{L_b(\lambda)}{1 - \langle \cos\theta \rangle} = \frac{1}{b_{eff}}$$

И эффективная длина затухания

$$L_c^{eff} = \frac{1}{c_{eff}} = \frac{1}{a + b^{eff}}$$

где  $\langle \cos\theta \rangle$  — средний косинус угла рассеяния. Оценка последнего параметра затруднительна, так как для этого требуется знание другого неотъемлемого оптического свойства, функции объемного рассеяния  $b(\theta)$ , которую необходимо измерять с помощью соответствующих устройств. Используя изотропный источник света, можно также измерить так называемую длину пропускания  $L_\beta(\lambda)$ , характеризующую изменение интенсивности света в зависимости от расстояния  $R$  между источником и детектором:

$$I(\lambda, R) = \frac{I_0(\lambda)}{4\pi R^2} e^{-\frac{R}{L_\beta(\lambda)}}$$

Длина пропускания может быть определена для конкретных значений  $\lambda$  путем подгонки  $I(\lambda, R)$  к данным, полученным с фиксированным  $I_0(\lambda)$  и несколькими значениями  $R$ .

Прямое сравнение между измеренными значениями  $L_\beta(\lambda)$  и  $L_c^{eff}$  требует знания объемной функции рассеяния как функции  $\lambda$  или значения  $\langle \cos\theta \rangle$ .

## 6. Обработка результатов

### 6.1. Цели и задачи

Целью экспериментальной части работы являлось выяснения, как оптические параметры среды влияют на точность восстановления трека прилетевшей вторичной частицы, а также её энергии. Для того, чтобы точнее определить, откуда прилетела частица, нужно, чтобы она смогла засветить как можно большее количество оптических модулей, которые есть в установке, потому что каждый оптический модуль имеет размер, который вносит свою погрешность. Также вносит погрешность и расстояние между соседними модулями. Может случиться так, что граница Черенковского конуса прошла между модулями и сработали только часть из них.

Поэтому в данной работе будет выясняться, при каких значениях параметров среды (соленость, глубина погружения, длины эффективная длина поглощения) получится фиксация наибольшего количество срабатываний оптических модулей.

Для этого будет использоваться пакет ЦЕРНа Geant4, позволяющий моделировать физические процессы, а также пакеты Root и программа OriginPro для визуальной обработки полученных данных.

### 6.2. Описание модели

Для проведения большего правдоподобия была построена модель, близкая к KM3NeT:

- В объеме размером 750м \* 500м \* 750м расположены 4050 детекторов
- Конфигурация детекторов по осям (x, y, z): 15 \* 18 \* 15 соответственно
- Радиус детектора 21.59 см
- Регистрация фотона от Черенковского излучения носит вероятностный характер



- Закон дисперсии имеет линейный вид, либо задается по каждой точке, а промежуточные точки заполняются линейной интерполяцией (для упрощения)

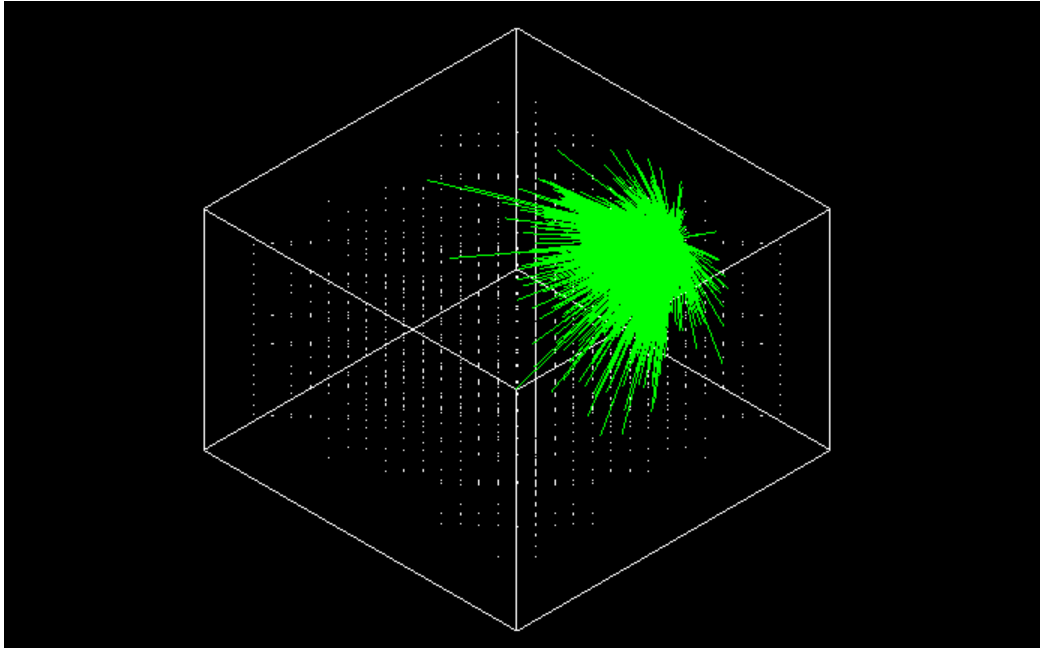


Рис. 6. Вид симуляции в программе Geant4

### 6.3. Соленость

Содержание солей в морской воде определяет ее физические и химические свойства, такие как электропроводность, плотность и химическая активность.

Эти параметры актуальны для КМЗNeT, так как влияют на конструкцию телескопа. Наблюдаемые временные или локальные вариации солености невелики. Измерения показывают, что соленость Средиземного моря немного увеличивается с запада на восток, примерно с 38,45 psu в Тулоне до 38,75 psu в Пилосе. (psu - практические единицы солености, основанные на измерениях электропроводности. 1 psu примерно равен 1 г соли на литр воды)

Вероятно, наиболее важным аспектом преобладающего значения солености является то, что оно прямо пропорционально содержанию калия

в морской воде, который вносит свой вклад в оптический фон за счет распада природного радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$ .

Ниже приведены результаты симуляции для различных показателей солености воды. Были выбран достаточно широкий диапазон, чтобы оценить разницу на границах значений солености, которые можно увидеть в природе и где потенциально может разместиться детектор размером в один кубический километр.

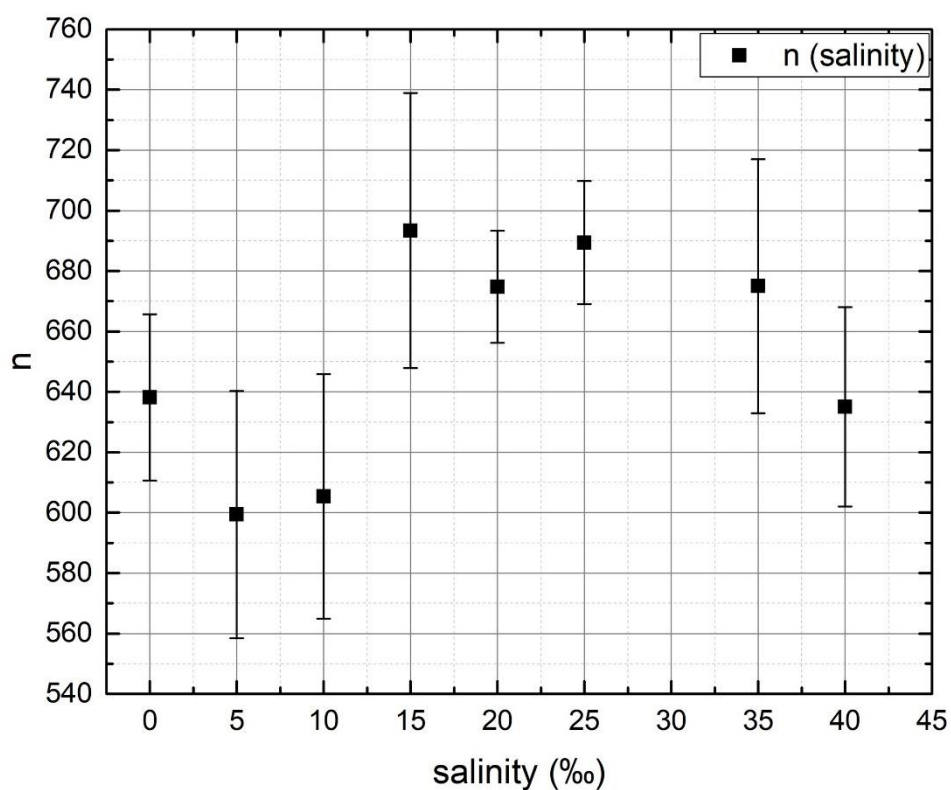


Рис. 7. График зависимости числа срабатываний детекторов от солености воды

При подсчитывании числа событий брались средние значения за 5 моделирования и считалась их средняя ошибка. Диапазон солености был выбран от 0 ‰ (например, озеро Байкал, соленость которого составляет 0.096г/л) до 40 ‰ (что соответствует Мертвому морю).

Можно заметить, что значения не отличаются сильно друг от друга, нет четкой зависимости и есть большой разброс выборочных значений от среднего. Это означает, что случайность многих процессов вносит гораздо больший вклад в изменения числа засветов, чем изменение солености воды.

#### 6.4. Длина пропускания и глубина

Измерения светопропускания:

Участок в Тулоне изучался в течение многих лет с помощью специальных установок, предназначенных для определения оптических свойств воды.

Измерения, проведенные в период между 1997 и 2000 гг., были сделаны для синего (473 нм) и УФ (375 нм) света. Результирующие длины поглощения, рассеяния и эффективного затухания приведены в таблицах ниже. С 2008 года ведется непрерывный мониторинг длины передачи по данным аппаратуры ANTARESa. Световые сигналы от оптических маяков (длины волн 400 и 470 нм, периодически включаются в целях калибровки), регистрируемые оптическими модулями, расположенными на разных расстояниях, позволяют измерять свет на месте. передачи в зависимости от расстояния. Моделирование Монте-Карло, проведенное группой ANTARES, показывает, что для разумных моделей рассеяния длина поглощения при 470 нм обычно на 5 м больше, чем длина пропускания.

Date	Effective attenuation length (m)	Absorption length (m)	Effective scattering length (m)
July 1998	$60.6 \pm 0.4 \pm 5$	$68.6 \pm 1.3 \pm 5$	$265 \pm 4 \pm 28$
Mar. 1999	$51.9 \pm 0.7 \pm 1$	$61.2 \pm 0.7 \pm 1$	$228 \pm 11 \pm 24$
June 2000	$46.4 \pm 1.9 \pm 2$	$49.3 \pm 0.3 \pm 2$	$301 \pm 3 \pm 27$

Таблица 1. Оптические свойства воды, измеренные на участке в Тулоне с использованием синего света ( $\lambda = 470$  нм). Первая ошибка статистическая, вторая систематическая

Date	Effective attenuation length (m)	Absorption length (m)	Effective scattering length (m)
July 1999	21.9 ± 0.8 ± 2	23.5 ± 0.1 ± 2	119 ± 2 ± 10
Sept.1999	22.8 ± 0.3 ± 2	25.6 ± 0.2 ± 2	113 ± 3 ± 10
June 2000	26.0 ± 0.5 ± 1	28.9 ± 0.1 ± 1	133 ± 3 ± 12

Таблица 2. Оптические свойства воды измерены на полигоне в Тулоне с использованием УФ-излучения

( $\lambda = 375$  нм). Первая ошибка статистическая, вторая систематическая.

## 6.5. Сравнение возможных мест расположения детекторов в Средиземном море

Ниже приведена таблица с сравнительными характеристиками мест расположения

Site	Depth m	376 nm	386 nm	400 nm	425 nm	445 nm	463 nm	502 nm	520 nm
N4.5	4100	21.0±0.5	24.8±0.7	29.2±0.9	36.0±1.3	42.3±1.8	46.1±2.0	28.7±0.8	21.3±0.5
CP2	3400	18.6±0.4	21.8±0.5	25.6±0.7	32.4±1.1	38.5±1.5	42.0±1.7	27.1±0.8	20.9±0.5
N4.5	3000	21.9±0.5	25.7±0.7	30.5±1.0	37.8±1.5	43.8±1.9	47.2±2.2	29.3±0.9	21.5±0.6
CP1	3100	19.9±0.4	23.2±0.6	27.8±0.8	34.6±1.2	41.5±1.7	44.1±1.9	28.5±0.8	21.8±0.5
CP2	3000	19.5±0.4	23.0±0.5	27.3±0.8	34.1±1.2	39.6±1.6	43.7±1.8	27.6±0.8	21.1±0.5

Таблица 3. Длина пропускания (в метрах) для света с разными длинами волн в точках Пилос (N4.5) и Капо-Пассеро (CP1 и CP2) для самых больших и близких глубин.

Далее было проведено моделирование с использованием параметров среды в каждом предполагаемом месте расположения. Исходя из вычислительных мощностей компьютера и времени одного моделирования, было принято решение проводить аналогично по 5 моделирований для каждого набора параметров.

## 6.6. Результаты моделирования

Ниже приведена таблица с полученными результатами моделирования.

Название	N4.5	CP2	N4.5	CP1	CP2
Глубина, м	4100	3400	3000	3100	3000
<n>	687.60	529.20	702.00	539.40	536.40
$\sigma n$	33.39	42.82	89.46	46.45	43.12

Таблица 4. Результаты моделирования с помощью Geant4 для 5 различных мест размещения детектора

Из результатов видно, что наибольшее число засветов оказалось в N4.5, находящемся на глубине 3000 м, недалеко также N4.5, но глубина погружения уже на 1100м больше.

Разница в результатах между местами в первую очередь определяет разница в длинах пропускания света для каждой длины волны фотона. Разница между различными географическими локациями гораздо больше, чем между теми, которые находятся на разных глубинах в одном месте. Так, разница средних чисел засветов для источника NP4.5 (Пилос, Греция) и CP2 (Капо-Пассеро, Италия) на глубине 3000 м составляет 166, что примерно на 30% лучше результатов на CP2.

Как раз в 100 км от Капо-Пассеро строится нейтринный телескоп ARCA. И полученные при моделировании данные показывают, что Пилос может оказаться более подходящей, если рассматривать число событий. Конечно, также стоит учитывать, что при выборе места строительства телескопа должно обращать внимание на большое количество факторов: логистика и транспортировка модулей, возможность строительства, возможность обслуживания, поверхность дна и т.д.

## Заключение

В результате работы были изучены нейтринный телескоп KM3NeT, его устройство, свойства, а также какие физические задачи он помогает решать. С помощью моделирования физических процессов в пакете Geant4 было изучено, как влияют оптические свойства среды на детектирующие способности KM3NeT. В частности, рассмотрено влияние солёности на число засветов оптических модулей при одном событии. А также проведено сравнение различных мест для расположения детекторов в Средиземном море, данные по которым были предоставлены группой ANTARES.

## Список используемой литературы

1. Aiello, S., Albert, A., Alves Garre, S. et al. Determining the neutrino mass ordering and oscillation parameters with KM3NeT/ORCA. Eur. Phys. J. C 82, 26, 2022.
2. Дмитрий Заборов “Глубоководный детектор нейтрино KM3NeT-ORCA и его возможности по изучению осцилляций атмосферных и ускорительных нейтрино”, 2019
3. S. Adri´an-Mart´inez, M. Ageron, F. Aharonian, S. Aiello, A. Albert, F. Ameli, E. Anassontzis, M. Andre, G. Androulakis, M. Anghinolfi et.al. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Volume 43, Number 8 Letter of intent for KM3NeT 2.0
4. R. Coniglione, от имени коллаборации KM3NeT “The KM3NeT neutrino telescope”, 2016
5. V´eronique Van Elewyck (APC & Universit´e de Paris “KM3NeT/ORCA:Status, first data & perspectives for neutrino oscillation measurements”, 2021
6. Annarita Margiotta, от имени коллаборации KM3NeT “The KM3NeT deep-sea neutrino telescope”, 2014
7. M. Ageron , J.A. Aguilar , I. Al Samarai , A. Albert, F. Ameli , M. Andre´e , M. Anghinolfi, G. Anton, S. Anvar, M. Ardid, K. Arnaud, E. Aslanides, A.C. Assis Jesus, T. Astraatmadja, J.-J. Aubert, R. Auer, E. Barbarito, B. Baretl, S. Basa, M. Bazzotti, Y. Becherini, J. Beltramelli, A. Bersani, V. Bertin, S. Beurthey, S. Biagi, C. Bigongiari, M. Billault, R.

Blaes, C. Bogazzi, N. de Botton, M. Bou-Cabo, B. Boudahef, M.C.  
Bouwhuis, A.M. Brown, J. Brunner,<sup>2</sup> J. Busto, L. Caillat, A. Calzas, F.  
Camarena, A. Capone, L. Caponetto, C. Carloganu, G. Carminati, E.  
Carmona, J. Carr, P.H. Carton, B. Cassano, E. Castorina, S. Cecchini, A.  
Ceres, Th. Chaleil, Ph. Charvis, P. Chauchot, T. Chiarusi, M. Circella, C.  
Compere, R. Coniglione, X. Coppolani, A. Cosquer, H. Costantini, N.  
Cottini, P. Coyle, S. Cuneo, C. Curtil “ANTARES: The first undersea  
neutrino telescope”, 2011

8. C. Rabouille от имени коллаборации KM3NeT “Technical Design  
Report for a deep-sea research infrastructure in the Mediterranean Sea  
incorporating a very large volume neutrino telescope”