

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Физический факультет

Кафедра Общей Ядерной Физики

Дипломная работа
**«Оптимизация размещения оптических модулей нейтринного
телескопа KM3NeT с учётом оптических свойств среды»**

Выполнил студент
413 группы
Шишкин Василий Юрьевич
Научный руководитель
к.ф. - м.н., доцент
Широков Евгений Вадимович

Москва, 2022 г.

Оглавление

Введение.....	3
1. Возникновение астрофизических нейтрино.....	6
2. Черенковский метод детектирования.....	7
2.1. Краткая историческая справка.....	7
2.2. Теоретическое описание метода.....	8
2.3. Оптические свойства.....	12
3. KM3NeT.....	15
3.1. Краткое введение.....	15
3.2. Оптический модуль.....	17
3.2.1. Механика модуля.....	18
3.2.2. ФЭУ.....	19
3.2.3. Электроника и сбор данных.....	20
3.3. Детекторная единица.....	21
3.3.1. Система развертывания.....	22
4. Моделирование и результаты.....	23
4.1. Проблема оптимального расположения оптических модулей.....	23
4.1. Работа в GEANT4.....	24
4.1.1. Геометрия детектора, оптические модули.....	24
4.1.2. Оптические свойства среды.....	26
4.1.3. Генератор частиц.....	26
4.2. Визуализация в ROOT.....	28
4.3. Анализ.....	28
4.3.1. Результаты для 10 ГэВ.....	29
4.3.2. Результаты для 1 ТэВ.....	31
4.3.3. Результаты для 100 ТэВ.....	33
Заключение.....	35
Список литературы.....	36

Введение.

Нейтрино (итал. neutrino – нейтрончик, обозн. ν) – 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 для электронного нейтрино – 0,28 эВ). Отличительная особенность – крайне высокая проникающая способность при низких энергиях и значительное её уменьшение с увеличением энергии. При энергиях порядка 3–10 МэВ имеют длину свободного пробега в веществе порядка 10^{18} м. Практически все типы космических объекты для нейтрино прозрачны. Изучение нейтрино в настоящий момент является одним из самых актуальных и перспективных направлений физики, поскольку за нейтрино скрываются явления, выходящие за рамки стандартной модели.

Гипотеза о нейтрино была выдвинута в 1930 г. В. Паули с целью разрешить парадоксы β -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 β -распаде – две разные. Имя последней («нейтрино») было дано Э. Ферми на Сольвеевской конференции в 1933 г.,

который после сформулировал квантовую теорию β -распада. Согласно теории Ферми, взаимодействие 4 частиц, участвующих в распаде, происходит в одной точке пространства одновременно. Эта теория объяснила основные черты β -распада (форму спектра, связь граничной энергии со временем распада) и т. о. явилась первым подтверждением гипотезы о нейтрино.

Проблемы регистрации нейтрино высоких энергий, с которыми имеют дело нейтринные телескопы, 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 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 и для получения ответов на множество актуальных для науки вопросов.

Кроме того, регистрация нейтрино от далёких источников важна для исследования их осцилляций в вакууме.

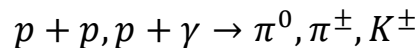
Малое сечение взаимодействия с веществом создаёт определённые трудности в обнаружении нейтрино высоких энергий. Чтобы зарегистрировать столько редкие события, требуются гигантские объёмы детекторов. Поток нейтрино резко падает с увеличением энергии, однако возрастает сечение взаимодействия. При энергиях 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) или массивных слабо взаимодействующих частиц, предсказываемых в моделях с топологическими дефектами.

1. Возникновение астрофизических нейтрино.

Нейтрино образуются во всех космических объектах, начиная земной атмосферой и заканчивая активными ядрами галактик. На рис. 1 показан теоретический потоковый спектр нейтрино разных энергий и от разных источников. Нейтринные телескопы работают с нейтрино трёх последних диапазонов.

Нейтрино, сверхвысоких энергий, по являются при выбросе протонов, и их взаимодействиями с межзвёздной средой в реакциях вида:



Образовавшиеся мезоны далее распадаются с участием нейтрино в реакциях вида $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ и подобных. Энергии в этих реакциях большие, и при этом направление движения нейтрино практически совпадает с направлением инициирующего протона. Это позволяет точно определить направление на источник.

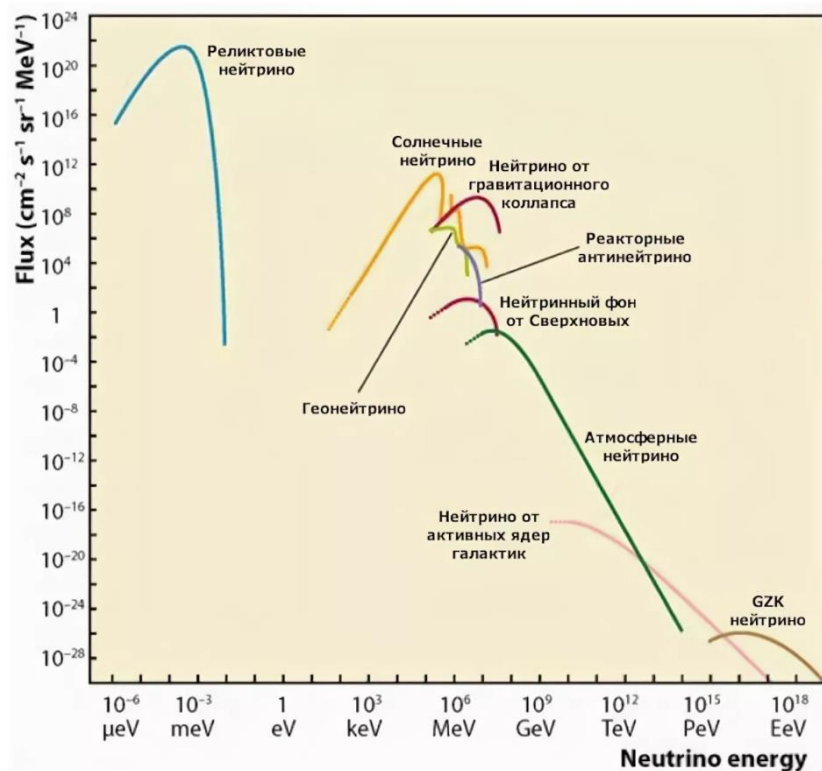


Рис. 1. Спектр нейтрино.

2. Черенковский метод детектирования.

Большинство нейтринных телескопов, включая KM3NeT, рассчитанных на нейтрино высоких энергий, используют методы регистрации, основанные на эффекте Черенкова-Вавилова. Наиболее успешным современным работающим телескопом является IceCube, расположенный в Антарктиде. На данный момент в этом детекторе зарегистрированы и подтверждены два события с нейтрино сверхвысоких энергий, что, учитывая огромные трудности в их детектировании, является важным достижением, но в то же время говорит о нужде создать гораздо большие объёмы детекторов.

2.1. Краткая историческая справка.

Метод детектирования на основе эффекта Черенкова-Вавилова был предложен и теоретически описан в 1960 г. М. А. Марковым.

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), являющийся предшественником KM3NeT. Эти установки характеризуются эффективным объёмом регистрации вторичных мюонов и атмосферных ливней порядка 10^7 м³ в отношении к регистрации нейтрино энергией свыше 10 ТэВ.

За время эксплуатации телескопов первого поколения (начиная с 1990г.) были достигнуты уровни точности, примерно на два порядка превышающие таковые у подземных детекторов, таких как SuperKamiokande и MACRO, 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 км³,

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, Baikal-GVD (Baikal Gigaton Volume Detector) на озере Байкал и, собственно, KM3NeT, 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.

2.2. Теоретическое описание метода.

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 θ_C к траектории движения частицы в каждый момент времени из каждой точки траектории. Значение угла θ_C определяется выражением $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$, где $\beta = \frac{v}{c}$ — скорость частицы относительно скорости света в вакууме, и для воды и льда, являющихся веществом детекторов, составляет примерно 42° . Зная последовательность и интенсивность 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:

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

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:

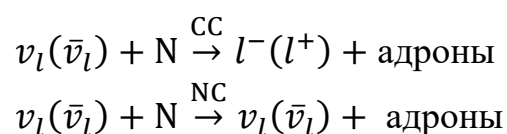
$$\frac{dn_C}{d\lambda} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2}$$

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

В детекторе регистрируются высокоэнергичные мюоны, образовавшиеся в результате взаимодействия нейтрино с нуклонами. Среди лептонов только мюоны способны пройти достаточно большое расстояние в веществе, практически не меняя направление.

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:



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

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- + \dots$$

с энергией в резонансе $E_0 = M_w^2/2m_e = 6,3$ ПэВ и сечением взаимодействия $5,02 \times 10^{-7}$ барн. При этой энергии в энергетическом спектре сечения наблюдается пик, называемый резонансом Глэшоу.

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:

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

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:

$$N_C^{\text{tot}} = n_C L_C = BE_{\text{sh}}[\text{ГэВ}]$$

Область энергии мюонов, доступная для исследования с помощью нейтринных телескопов, простирается от несколько десятков ГэВ до сверхвысоких энергий. Нижняя граница по энергии связана с тем, что частица обязана двигаться со скоростью, превышающей фазовую скорость света в воде для возможности её регистрации. Световой поток, испускаемый при прохождении мюона в воде, включает в себя черенковское излучение, инициируемое электрическим зарядом мюона, черенковское излучение δ -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 – δ -электронами, электрон-позитронными парами и посредством тормозного или фотоядерного взаимодействия.

Для эффективного детектирования требуются огромные объёмы детекторов, и здесь играет роль крупное достоинство метода – относительно малая стоимость создания больших детектирующих объёмов.

К недостаткам 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, а именно накладывает верхнюю границу на расстояние между струнами и БД (см. раздел 3).

2.3. Оптические свойства.

Для того, чтобы точно определять геометрию светового конуса, следует иметь представление о том, как свет распространяется в морской воде. На это влияет рассеяние и поглощение света. Рассеяние света в морской воде зависит от молекулярного рассеяния, и от рассеяния на крупных частицах. Рассеяние на молекулах должно рассматриваться с точки зрения волновой оптики, поскольку размеры частиц сопоставимы с размером волны. Поэтому результатом является дифракция света на молекуле. Строго говоря, обычно рассматривается рассеяние на некотором конгломерате частиц, поскольку они находятся так близко, что рассеянный от них свет интерферирует.

Распространение фотонов (а значит, и временное распределение фотонов на расстоянии R от источника) определяется следующими неотъемлемыми оптическими параметрами: групповой скоростью света в среде v_g , длиной поглощения λ_{abs} и объемной функцией рассеяния $\beta(\theta) = \tilde{\beta}(\theta)/\lambda_{sct}$ с единицами $m^{-1} \cdot sr^{-1}$ (где $\tilde{\beta}(\theta)$ — нормированное распределение углов рассеяния, а λ_{sct} — длина рассеяния). Функция рассеяния грубо описывается длиной рассеяния λ_{sct} и средним косинусом распределения углов рассеяния (или параметром асимметрии) $\langle \cos\theta \rangle = 2\pi \int \tilde{\beta}(\theta) \cos\theta d(\cos\theta)$, в предположении определенной формы распределение углов рассеяния.

Для изотропного источника фотонов с интенсивностью I_0 интенсивность I , регистрируемая на расстоянии R от источника ФЭУ с активной площадью A , равна

$$I = I_0 \frac{A}{4\pi R^2} e^{-\frac{R}{\lambda_{\text{att}}^{\text{eff}}}}$$

Где $\lambda_{\text{att}}^{\text{eff}}$ — эффективная длина затухания, полученная из общего числа фотонов (т. е. из интегральных временных распределений), зарегистрированных для двух расстояний от источника до детектора. Приближенное вырождение уменьшает количество параметров, необходимых для характеристики временного распределения фотонов на расстоянии R от источника. В частности, сильных корреляций можно ожидать, если попытаться извлечь $\langle \cos\theta \rangle$ и λ_{sct} по отдельности, в то время как $\lambda_{\text{att}}^{\text{eff}}$ определяемая как

$$\lambda_{\text{sct}}^{\text{eff}} \equiv \frac{\lambda_{\text{sct}}}{1 - \langle \cos\theta \rangle}$$

описывает основную часть рассеяния.

Распределение углов рассеяния описывается, согласно подходу Мореля и Луазеля: распределение углов рассеяния выражается как взвешенная сумма рассеяния молекул и частиц. Молекулярное рассеяние описывается формулой Эйнштейна-Смолуховского для чистой воды:

$$\widetilde{\beta}^m(\cos\theta) = 0.06225(1 + 0.835 \cos^2\theta),$$

что напоминает формулу

$$\widetilde{\beta}^{\text{Ray}}(\cos\theta) = \frac{3}{16\pi}(1 + \cos^2\theta),$$

соответствующую рэлеевскому рассеянию. Множитель 0,835 (а не 1) объясняется анизотропией молекул воды. Рассеяние частиц описывается табличным распределением Мобли $\widetilde{\beta}^p(\cos\theta)$, полученным путем

усреднения аналогичных угловых распределений частиц, измеренных Петцольдом в самых разных морях, на длине волны 514 нм.

Полное нормированное распределение углов рассеяния имеет вид:

$$\tilde{\beta}(\cos \theta) = \eta \tilde{\beta}^m(\cos \theta) + (1 - \eta) \tilde{\beta}^p(\cos \theta)$$

где η есть отношение молекулярного рассеяния к полному. Средний косинус полного углового распределения рассеяния равен

$$\langle \cos \theta \rangle = (1 - \eta) \times \langle \cos \theta \rangle^p = (1 - \eta) \times 0.924,$$

так как средний косинус распределения Петцольда равен 0,924. В природных водах η обычно меньше 0,2, поэтому $\langle \cos \theta \rangle$ велик, и использование выражения для $\lambda_{\text{sct}}^{\text{eff}}$ оправдано.

3. KM3NeT.

3.1. Краткое введение

Детекторы KM3NeT представляют из себя трёхмерные матрицы из оптических модулей, расположенные в большом объёме воды в средиземном море. Модули датчиков регистрируют время прихода света, яркость света и геометрическое положение датчика в момент прихода света. Измерения передаются на компьютеры диспетчерской на берегу – на береговую станцию – по оптоволоконной сети. На береговой станции интеллектуальное программное обеспечение фильтрует необработанные данные и реконструирует на основе измерений следы частиц, проходящих через детектор. Результаты отправляются через общедоступный Интернет в центры обработки данных KM3NeT для дальнейшего изучения учеными. Инфраструктура нейтринных исследований KM3NeT будет состоять из нейтринных детекторов двух типов: детекторы телескопа ARCA (*Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss*) будут оптимизированы для регистрации нейтрино самых высоких энергий, а геометрия детектора ORCA (*Oscillation Research with Cosmics in the Abyss*) оптимальна для регистрации нейтрино более низких энергий, необходимых для определения иерархии масс нейтрино. В частности, плотность модулей датчиков света в объёме обнаружения различна для ARCA и ORCA. На этапе строительства KM3NeT 2.0 телескоп детектор ARCA будет состоять из двух блоков объёмом около 1 кубического километра каждый. В этом объёме расположено более 4000 оптических модулей, закрепленных на вертикальных струнах высотой около 700 м. Плотность оптических модулей в детекторе ORCA намного выше: около 2000 модулей в объёме примерно в 125 раз меньшем, чем у блока ARCA.

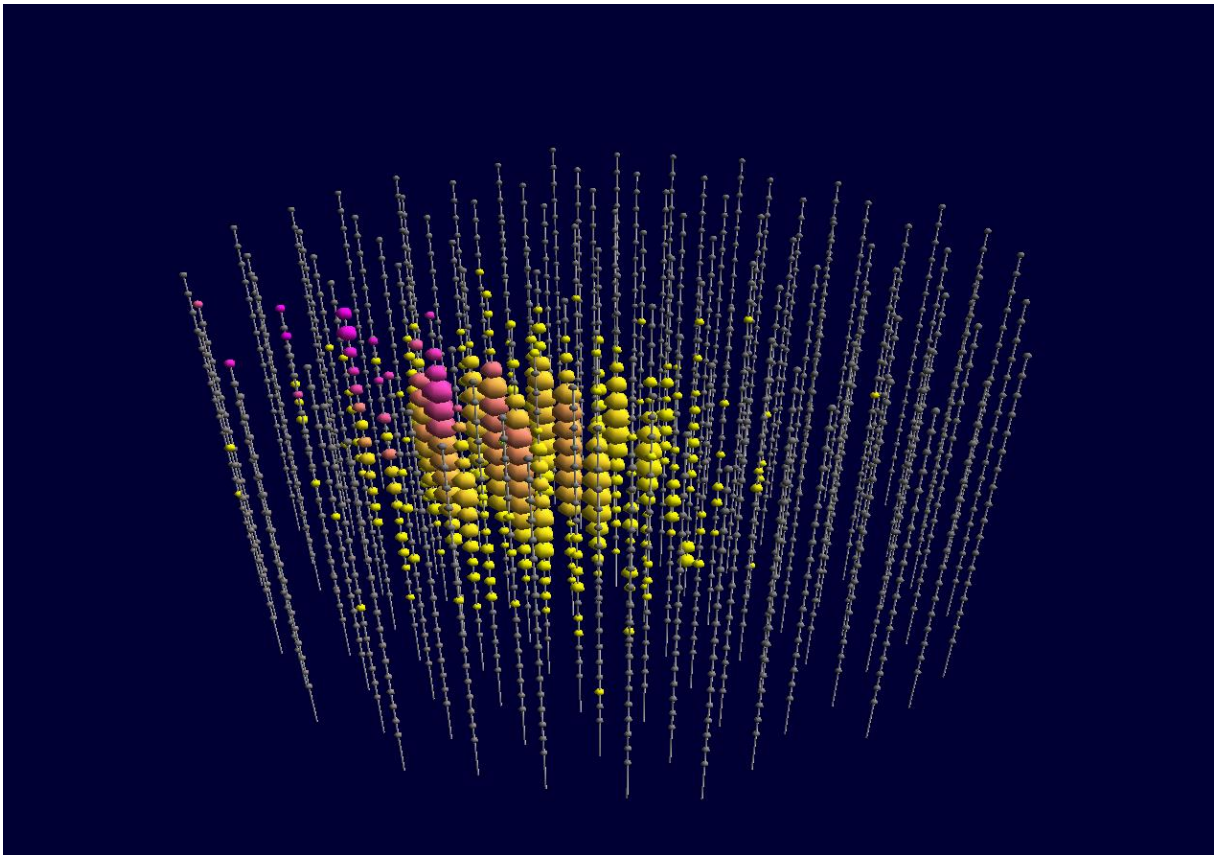


Рис. 2. Схематичная модель детектора и срабатывания оптических модулей.

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.

KM3NeT есть прямая эволюция проектов ANTARES и NEMO.

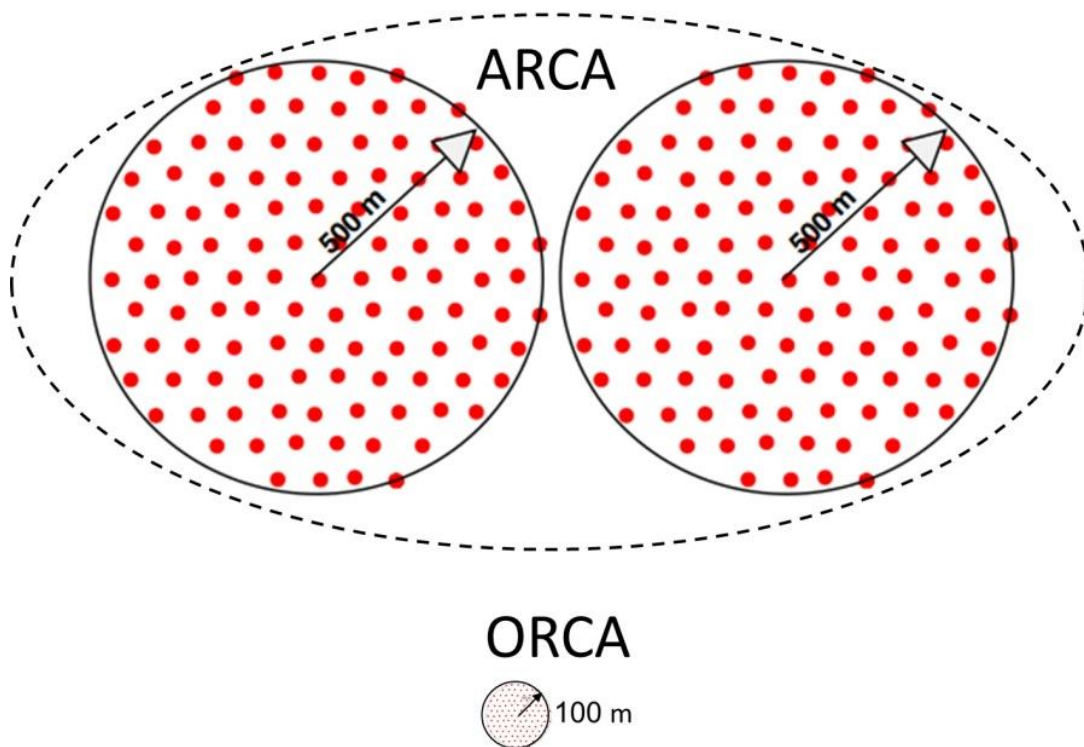


Рис. 3. Сравнение объёмов ARCA и ORCA.

3.2. Оптический модуль.

Главнейший компонент детектора – цифровой оптический сенсорный модуль (DOM, ЦОМ). Основой цифрового оптического модуля KM3NeT является устойчивая к давлению стеклянная сфера, в которой размещается 31 3-дюймовых ФЭУ. Эта конструкция имеет много преимуществ по сравнению с конструкцией, содержащей один ФЭУ, и использует хорошие оптические свойства средиземноморской морской воды, в частности большие длины рассеяния. Конструкция позволяет уместить в 3 раза большую эквивалентную площадь фотокатода одного 10-дюймового ФЭУ в 17-дюймовой сфере. Сегментация позволяет извлекать информацию о направлении потока фотонов, а подсчет фотонов может быть выполнен в первом порядке путем подсчета количества ФЭУ, которые зарегистрировали фотон. Подавление фотонов окружающего фона может быть облегчено требованием совпадений. Сбор данных основан на принципе передачи всех данных на берег. Время попадания и ширина

импульса всех зарегистрированных фотонов отправляются на берег через оптический Ethernet-кабель с временными интервалами по 100 мс, где массив ЦП применяет триггерные алгоритмы для извлечения сигналов из фона с частотой 7 кГц на ФЭУ. Это явно использует хорошие оптические свойства, поскольку информация о времени прихода фотона не разбавляется рассеянием.



Рис. 4. Цифровой оптический модуль.

3.2.1. Механика модуля.

Сфера из боросиликатного стекла диаметром 17 дюймов поставляется в виде двух половин, которые соединяются после интеграции механики и инструментов. Верхняя полусфера содержит механическую структуру, которая обеспечивает теплопровод к воде через стекло и

формирует механическую основу для остальных компонентов и большей части электроники. ФЭУ размещаются в опорных конструкциях, напечатанных на 3D-принтере. Нижняя опорная конструкция содержит 3 кольца по 6 ФЭУ и 1 ФЭУ, направленный строго вниз. Верхняя опорная конструкция имеет 2 кольца по 6 ФЭУ. Опорная конструкция также содержит кольца отражателей вокруг ФЭУ, манометр и светодиодный маячок. Важно отметить, что структуры образуют барьер для силиконового геля, который находится между стеклом и ФЭУ. В верхней полусфере просверлено отверстие, в которое монтируется ввод (пенетратор) для двух медных проводов и одного или двух световодов. Пенетратор собственной разработки состоит из титанового фланца, в который вставлена керамическая заглушка. Производство перемещается в промышленность, где используются запатентованные технологии для пробки («уплотнения»), которая представляет собой либо эпоксидную смолу, либо легкоплавкое стекло. Вокруг собранной сферы устанавливается титановый хомут, который используется для крепления ЦОМ на блок детектирования (БД).

3.2.2. ФЭУ.

Размеры ФЭУ подобраны так, чтобы максимально увеличить площадь фотокатода на ЦОМ, они составляют около 3 дюймов в диаметре и имеют уменьшенную длину. Основными временными характеристиками являются среднеквадратичное значение времени прохождения менее 2 нс, тогда как квантовая эффективность составляет более 23% при длине волны 404 нм и более 18% при 470 нм. Темновая скорость счета на уровне фотоэлектронов 0,3 не должна превышать 2 кГц, но обычно оказывается намного меньше 1 кГц. Чтобы свести к минимуму старение ФЭУ, которые имеют скорость счета около 7 кГц, требуется относительно низкий коэффициент усиления около $3 \cdot 10^6$ при типичном рабочем напряжении около кВ. В качестве ФЭУ используется Hamamatsu R12199. Для будущих расширений также рассматриваются PMT от ETL и HZC. К внутренней

части стекла приклеен пьезоакустический гидрофон, в первую очередь для акустического позиционирования, а также для тестирования гидроакустического метода детектирования, который в данной работе не рассматривается. Мезонинная плата компаса и наклономера, которая обменивается данными через I²C, предоставляет данные об ориентации.

3.2.3. Электроника и сбор данных.

Основными платами электроники являются плата питания, плата центральной логики (CLB), платы сбора сигналов и базы ФЭУ. Плата питания преобразует поступающие 12 В в необходимые напряжения 1, 1,8, 2,5, 3,3 (дважды) и 5 В с помощью высокоэффективных преобразователей постоянного тока и содержит датчики тока. На задней части ФЭУ установлена базовая плата ФЭУ. Эта плата содержит схему Кокрофта-Уолтона, управляемую специально разработанной интегральной схемой, которая обеспечивает требуемое и регулируемое высокое напряжение от входа 3,3 В. Вторая специализированная ASIC содержит предварительный усилитель, компаратор и драйвер низковольтного дифференциального сигнала (LVDS) для преобразования импульса ФЭУ в цифровой сигнал, который имеет высокий уровень, пока импульс превышает регулируемый порог. Эта ASIC также обеспечивает связь I²C с ФЭУ для установки его значений и считывания его уникального идентификатора. Две платы сбора сигналов, одна для нижней и одна для верхней полусферы, направляют сигналы ФЭУ на CLB и обеспечивают соединение с пьезоэлектрическим гидрофоном. В CLB находится Xilinx Kintex FPGA, который реализует всю цепочку сбора данных, синхронизацию времени, связь Ethernet и медленное управление. Реализованы два ЦП, один из которых предназначен для двусторонней связи с берегом, чтобы обеспечить контроль и мониторинг оборудования. Прошивка и программное обеспечение FPGA можно обновлять через Ethernet с берега с помощью

отказоустойчивой процедуры. В CLB размещается небольшая съемная клетка с форм-фактором, в которой установлен лазерный приемопередатчик с шагом, определенным в сети ИТУ, с интервалом 50 ГГц. Под стеклом на верхней полусфере установлена светодиодная мигалка с платой драйвера, которая подключается к CLB, обеспечивающему настраиваемые триггеры и питание до 30В. Общая потребляемая мощность ЦОМ при работе составляет менее 7,5 Вт.

3.3. Детекторная единица.

Блок детектирования (БД) представляет собой структуру, которая выстраивает 18 ЦОМ в вертикальную струну и обеспечивает подключение к оптико-электрической сети морского дна. Вертикальный электрооптический кабель (VEOC) содержит оптические волокна и два медных провода и соединяется с основой-контейнером. Механическая основа БД состоит из двух канатов Дупеета толщиной 4 мм. Наверху две веревки соединены с бумом из пеноматериала с открытыми порами. Каждый ЦОМ обеспечивает около 11 кг плавучести. В конфигурации ARCA вертикальное расстояние между ЦОМ составляет около 36 метров, а в конфигурации ORCA — около 9 метров. VEOC состоит из гибкой полиэтиленовой трубки шириной 7 мм, заполненной маслом. Таким образом, это система сбалансирована с давлением. В каждом ЦОМ, в коммутационной коробке, также сбалансированной с давлением, одно волокно разделяется, и преобразователь постоянного тока понижает напряжение примерно с 400 В до 12 В для ЦОМ. Вдоль линии размещаются дистанционные стержни, а VEOC направляется с помощью зажимов и ползунков. Механизм, напечатанный на 3D-принтере, обеспечивает правильное направление VEOC в процессе развертывания. Тросовая система обеспечивает ограниченную внутреннюю коррекцию ориентации ЦОМ в случае незначительных смещений или из-за динамических сил. Якорь удерживает БД на месте благодаря своему весу и содержит разъем для влажного соединения соединительного кабеля,

который подключается к сети на морском дне. Цилиндрическое основание-контейнер содержит мощностную, электронику охраны мощности и временную электронику, а также оптические компоненты для усиления оптического сигнала и мультиплексирования 18 каналов ЦОМ на одно волокно. Двусторонняя связь с контейнером позволяет контролировать и мониторить сигнал, а также включать и выключать БД. В БД также находятся акустический передатчик и приемник для акустического позиционирования.

3.3.1. Система разворачивания.

Поскольку веревки не могут выдержать вес якоря и, в частности, обеспечить быстрое разворачивание нескольких БД, используется специальное устройство разворачивания, называемое LOM. Это сферическая конструкция диаметром 2 м с тремя дорожками, каждая из которых может удерживать 6 ЦОМ, канаты, ВЕОС и поддерживающую механику, а также имеет муляжи стеклянных сфер для обеспечения плавучести. Этот узел с намотанными на него ЦОМ и канатами устанавливается на якорь БД, а буй позиционируется через вертикальную ось. Эта сборка может быть развернута с корабля, после чего погружной дистанционно управляемый робот подключает ее к сети морского дна и тянет за веревку, чтобы освободить LOM. В то время как LOM разворачивается вверх, ЦОМ выходят из устройства, и струна полностью разворачивается. LOM всплывает на поверхность и извлекается.

4. Моделирование и результаты.

4.1. Проблема оптимального расположения оптических модулей.

Пространственные параметры нейтринного телескопа, а именно расстояние между соседними модулями, в существенной мере определяют пространственное и энергетическое разрешение. С увеличением расстояния разрешение падает, поскольку меньшее количество черенковских фотонов от мюона долетает до меньшего числа оптических модулей. С уменьшением расстояния разрешение растёт, однако с какого-то момента возникает вопрос о целесообразности – большая плотность размещения оптических модулей значит большую удельную стоимость детектора. Размещать модули следует с идеей того, чтобы при событии в детекторе как можно меньшее количество модулей срабатывали «вхолостую», то есть чтобы срабатывало минимальное количество модулей для получения желаемого разрешения.

В данной работе проводится моделирование срабатываний детектора и их качественный анализ в зависимости от энергии и взаимного расположения модулей.

Алгоритмы моделирования и анализа были написаны на языке C++ с использованием библиотек GEANT4 и ROOT, разработанных ЦЕРНом. GEANT4 — инструментарий для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло. Позволяет имплементировать геометрию детектора и считывающие элементы. ROOT — пакет объектно-ориентированных программ и библиотек, специально предназначенный для использования в качестве платформы для обработки экспериментальных данных физики высоких энергий. В данной работе ROOT используется для визуализации.

4.2. Работа в GEANT4.

4.2.1. Геометрия детектора, оптические модули.

Детектор представляется в виде сетки оптических модулей. Струны организованы в виде шестиугольника, что очень близко к фактической (планируемой) конфигурации ORCA и ARCA.

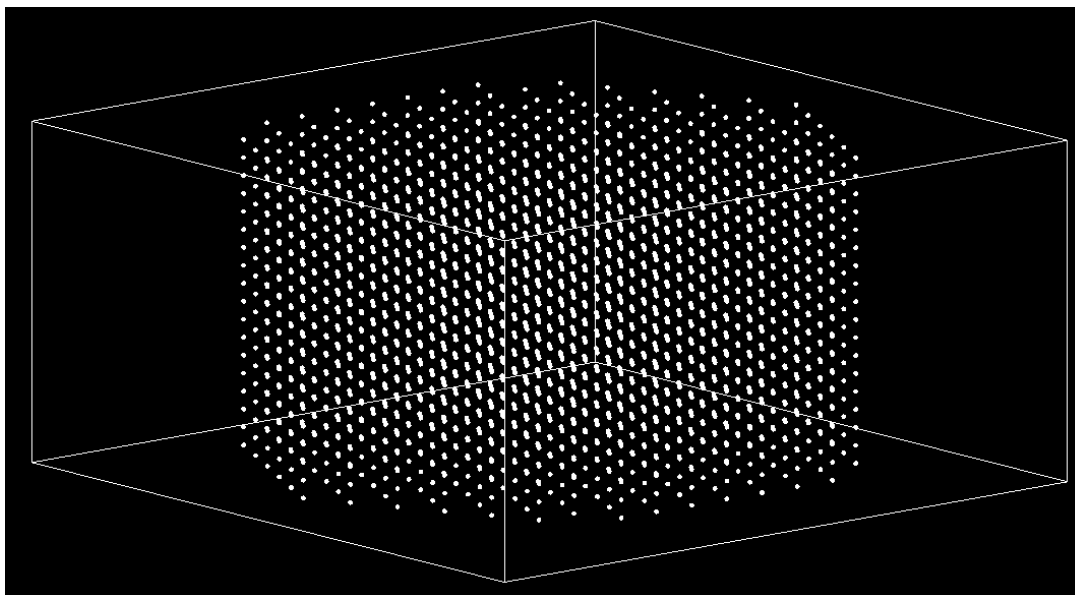


Рис. 5. Визуализация модели детектора в интерфейсе GEANT4. Параллелепипед – границы моделируемого объёма.

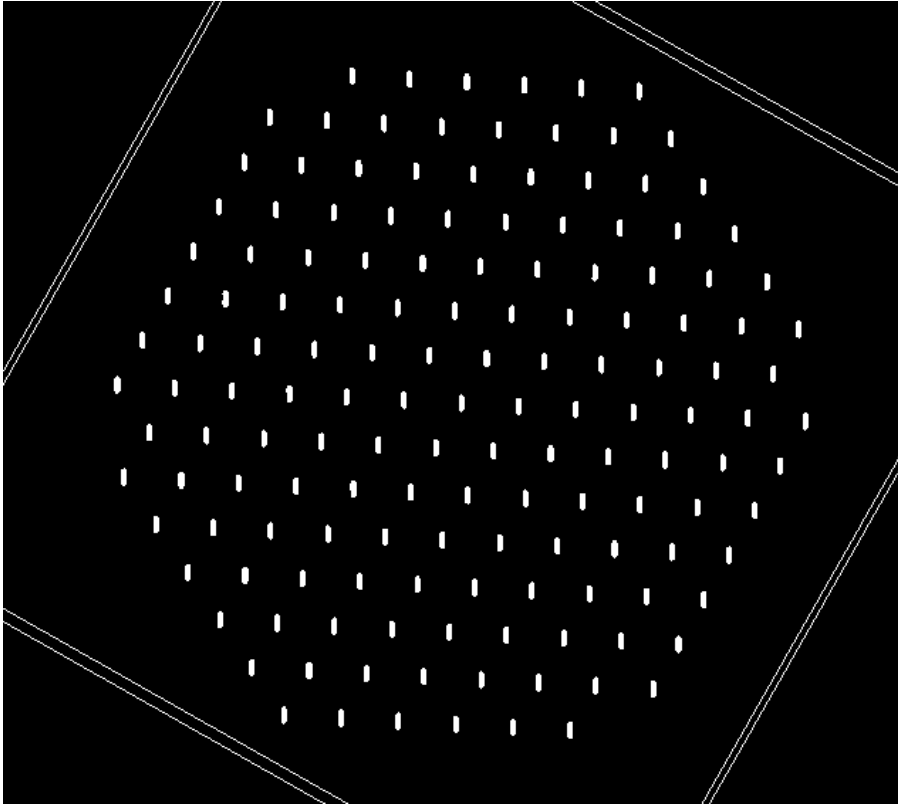


Рис. 6. Визуализация модели детектора в интерфейсе GEANT4. Вид сверху.

Варьируемые параметры – горизонтальное и вертикальное расстояние между модулями, количество модулей в струне и количество струн на диагонали шестиугольника. Последние два параметра изменялись только на промежуточных стадиях разработки программы, и в финальных измерениях имели значения 18 и 15 соответственно, что соответствует ARCA.

Оптические модули в рамках данной работы представляются в виде сфер диаметром 17 дюймов (43,2 см), регистрирующих исключительно оптические фотоны. Каждому модулю приписываются следующие параметры: координаты положения в пространстве, идентификатор и накопленная энергия. Кроме того, у модулей задана квантовая эффективность в зависимости от длины волны, соответствующая фотоумножителям Hamamatsu R12199-02, фактически используемых в KM3NeT (рис. 7).

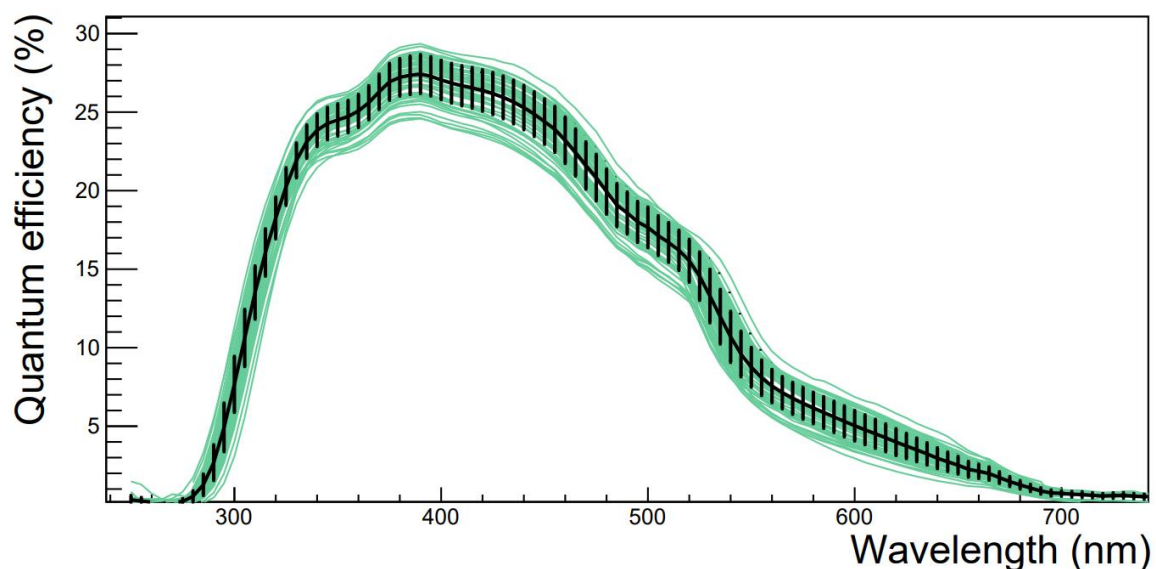


Рис. 7. Квантовая эффективность фотоумножителей Hamamatsu R12199-02.

4.2.2. Оптические свойства среды.

Среда детектора – вода – задана из списка веществ GEANT4, в котором определяется их плотность и атомарный состав. В качестве свойств имплементированы показатель преломления и коэффициент поглощения, используемые зависимости которых от длины волны представлены на рис. 8 и 9.

4.2.3. Генератор частиц.

Использован простейший генератор частиц, позволяющий задать тип частицы, точку рождения, направляющий вектор и энергию. Для моделирования генерируются мюоны, рождающиеся на нижней границе моделируемого объёма и влетающие в детектор снизу примерно вдоль струн.

Refractive index of water versus wavelength

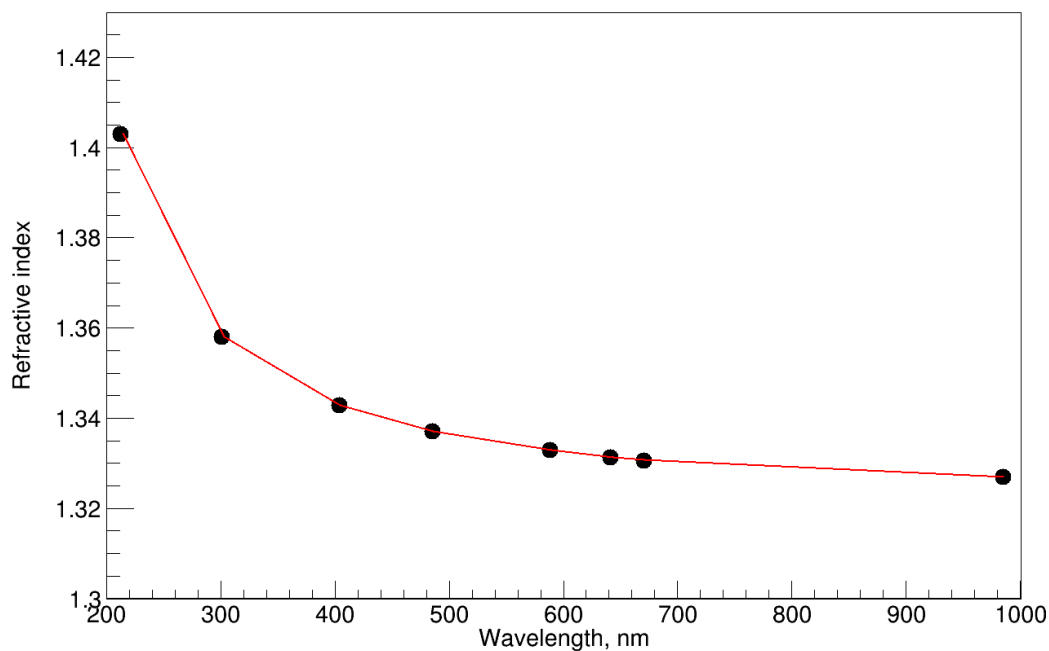


Рис. 8. Используемая зависимость показателя преломления воды от длины волны.

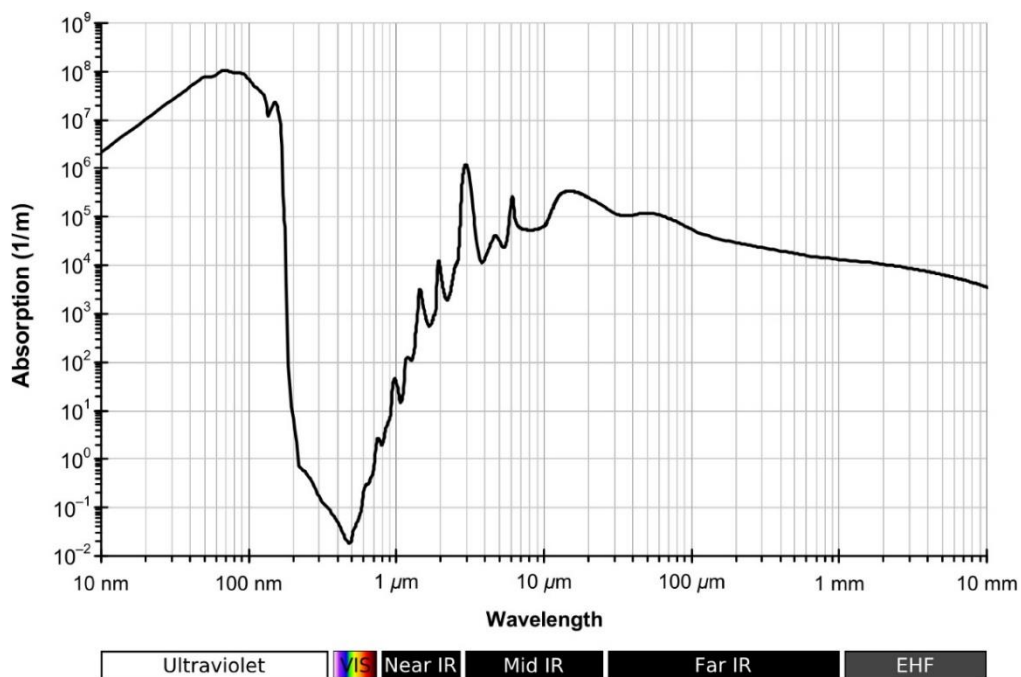


Рис. 9. Используемая зависимость коэффициента поглощения воды от длины волны (использован интервал от 100 нм до 1 мкм).

4.3. Визуализация в ROOT.

За событие в каждом оптическом модуле накапливается суммарная энергия от черенковских фотонов мюона. В конце события положение каждого оптического модуля и соответствующая ему энергия записываются в ROOT-файл.

Алгоритм ROOT считывает данные из этого файла для визуализации. Оптические модули представляются в виде сфер, объём которых пропорционален накопленной в них энергии, но при этом не меньше заданного минимального. Модули, в которых накопилось наибольшее количество энергии, подсвечиваются красным, а в которых меньшее – зелёным. Модули, в которые ничего не попало, подсвечиваются белым. Трек мюона обозначается линией бирюзового цвета.

4.4. Анализ.

Для визуализации и анализа проведены эксперименты для разных энергий и разных расстояний между соседними модулями. Выбранные энергии – 10 ГэВ, 1 ТэВ и 100 ТэВ.

Далее подписи к рисункам в формате «Энергия мюона, горизонтальное расстояние между модулями (м) x вертикальное расстояние между модулями (м)».

4.4.1. Результаты для 10 ГэВ.

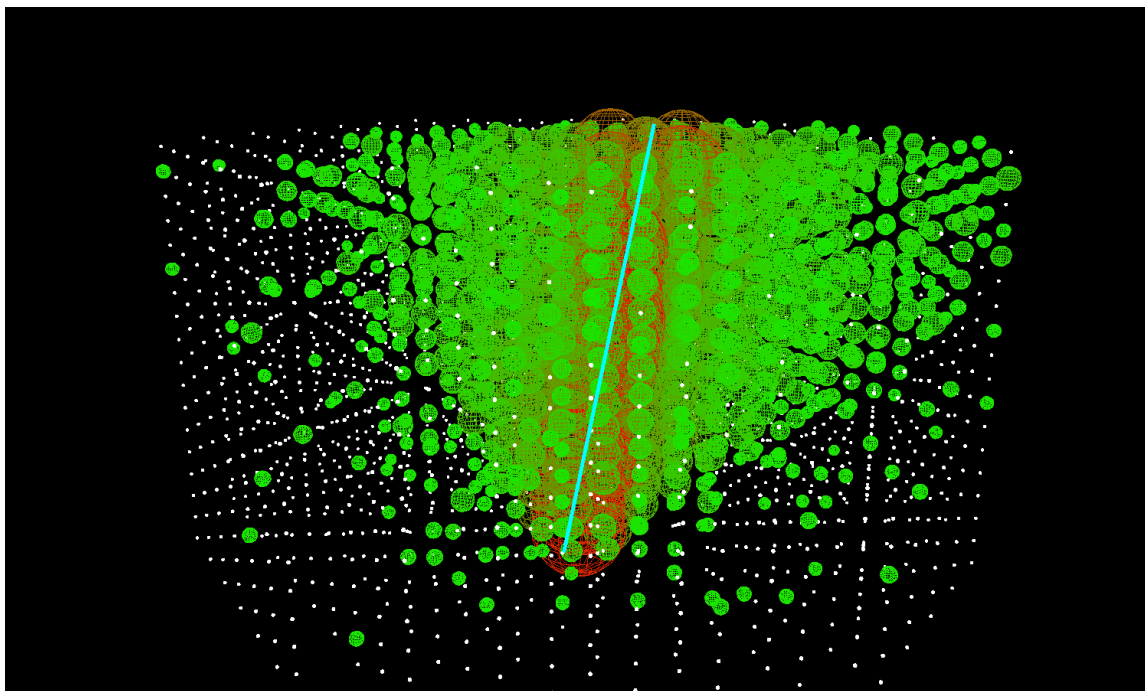


Рис. 10. 10 ГэВ, 10x4.

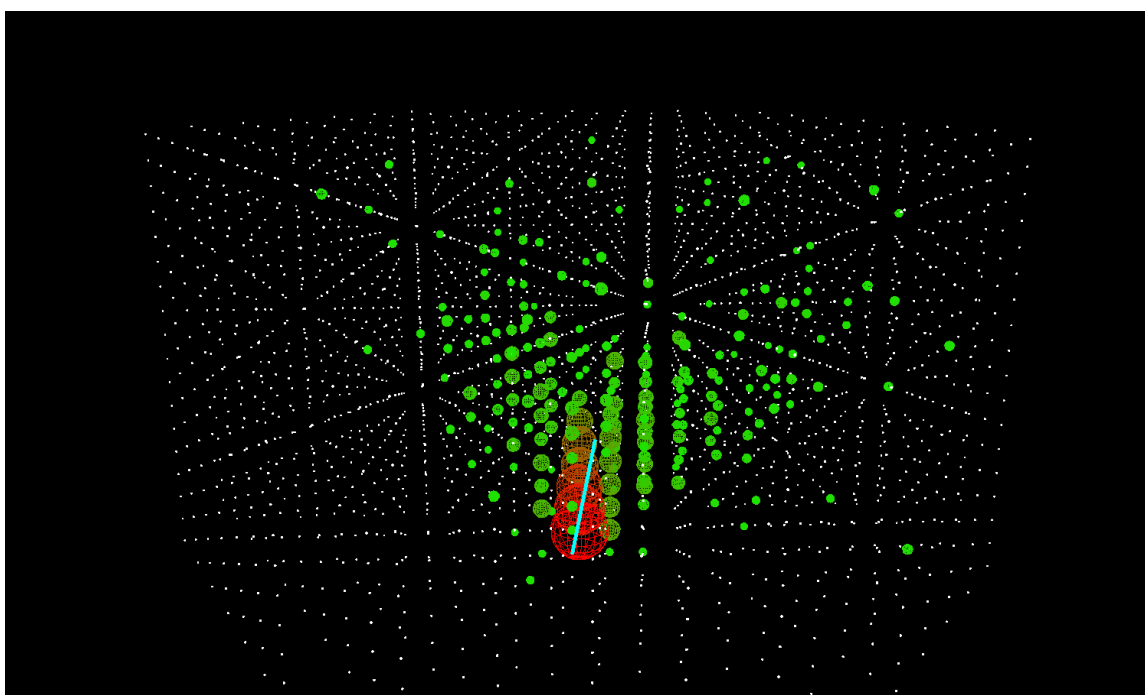


Рис. 11. 10 ГэВ, 20x8. Параметры примерно соответствуют ORCA.

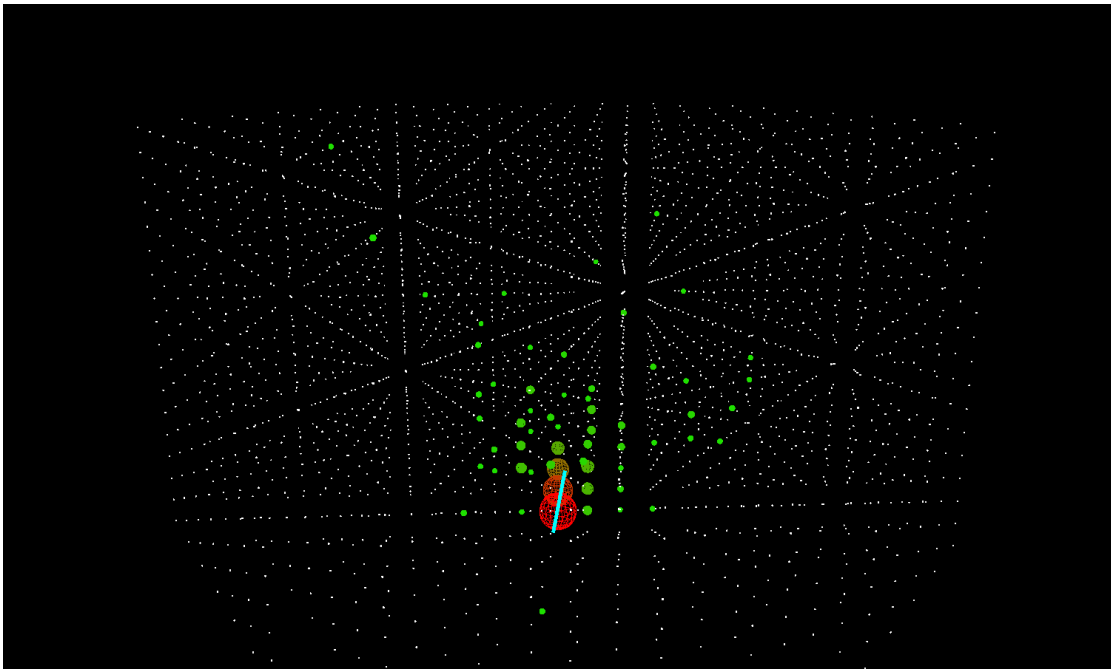


Рис. 12. 10 ГэВ, 30x12.

Видно, что в случае рис. 10 засвечивается большая часть детектора, что не оптимально. В случае же рис. 12 модули срабатывают очень разреженно, и при этом трек мюона проходит малую часть детектора. В этом случае разрешение будет скудным. На рис. 11 видно более оптимальное срабатывание. Аналогичные рис. 11 параметры планируются быть использованы в ORCA.

4.4.2. Результаты для 1 ТэВ.

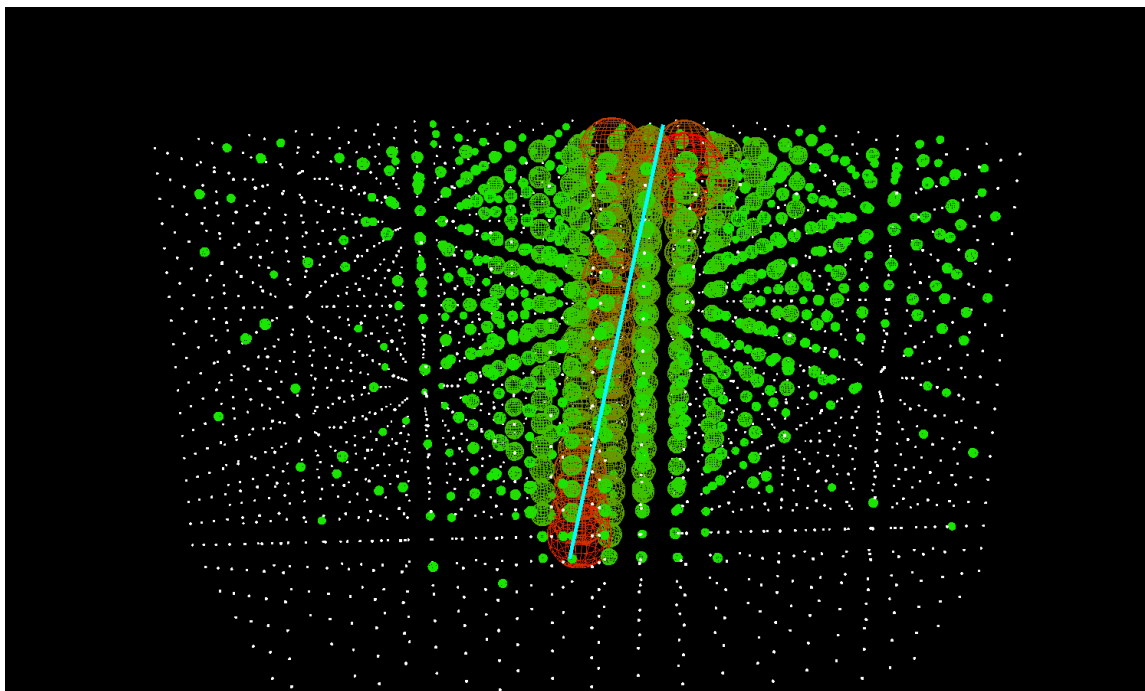


Рис. 13. 1 ТэВ, 15x6.

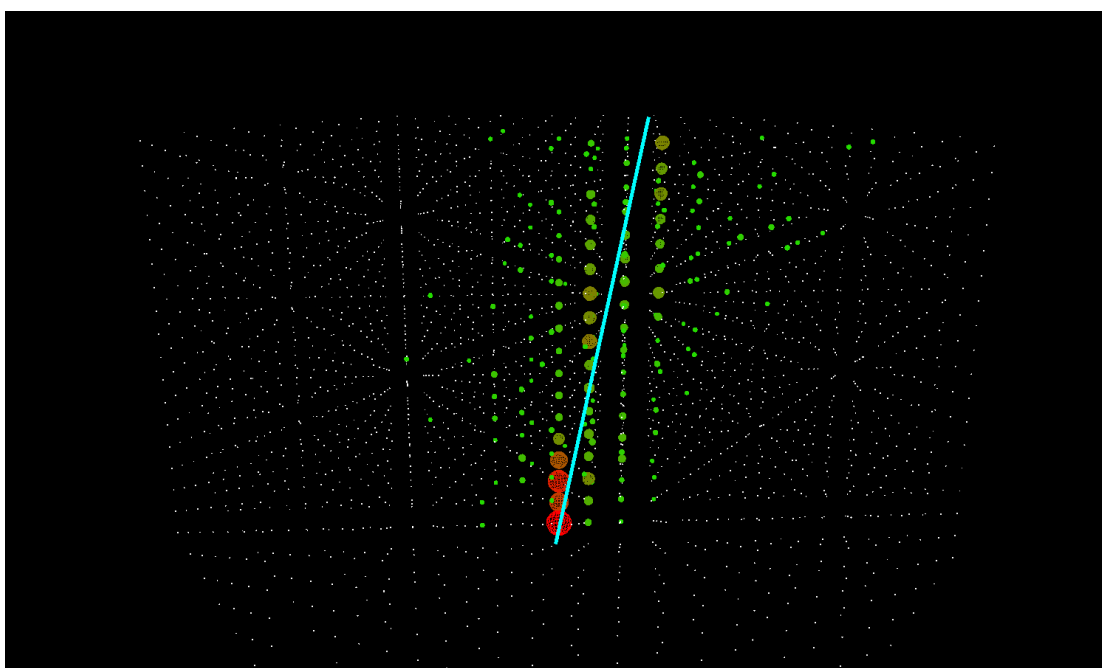


Рис. 13. 1 ТэВ, 45x18.

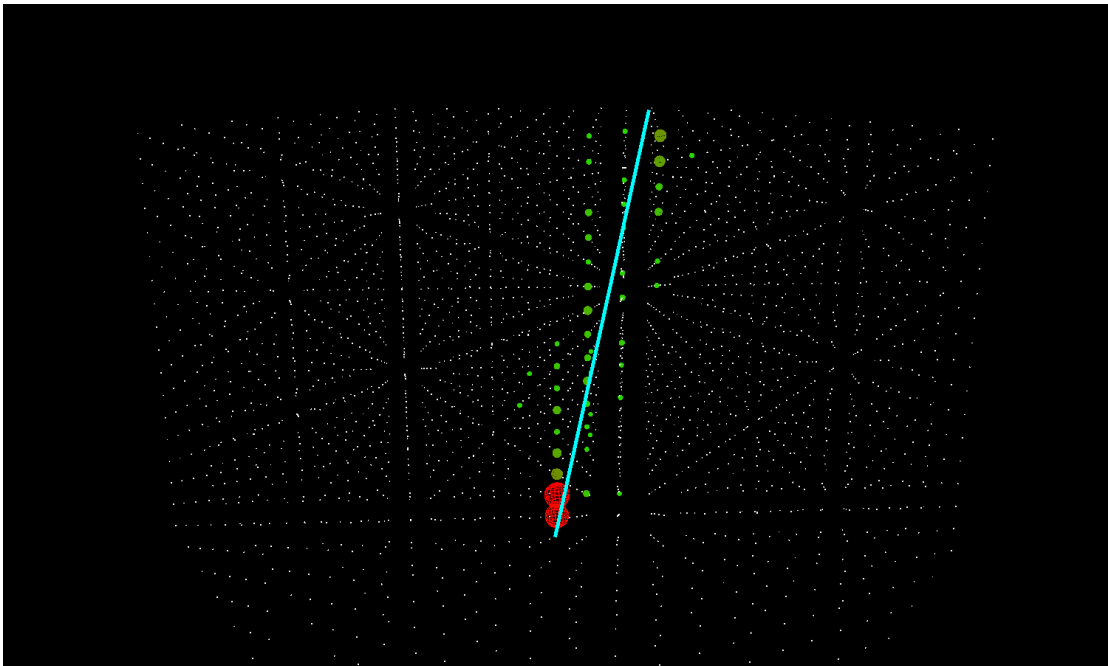


Рис. 14. 1 ТэВ, 90x36. Параметры примерно соответствуют ARCA.

Для рис. 12 похожая картина: срабатывает слишком большая часть детектора. На рис. 14 снова модули срабатывают слишком разреженно. На рис. 13 срабатывание оптимальное.

4.4.3. Результаты для 100 ТэВ.

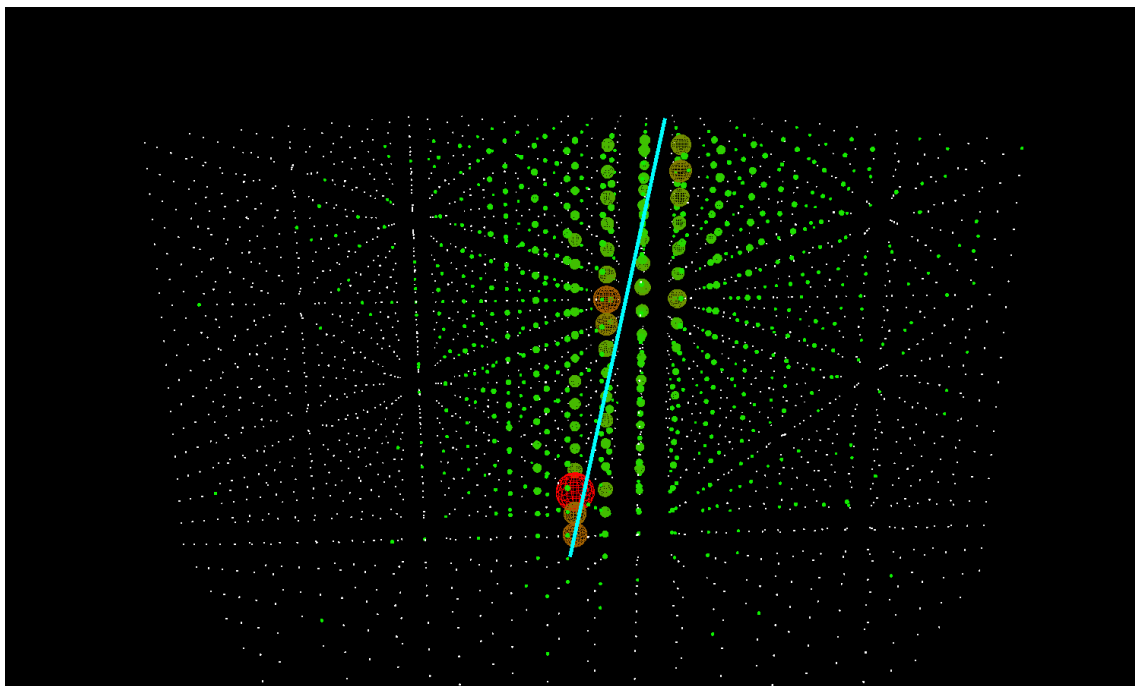


Рис. 15. 100 ТэВ, 30x12.

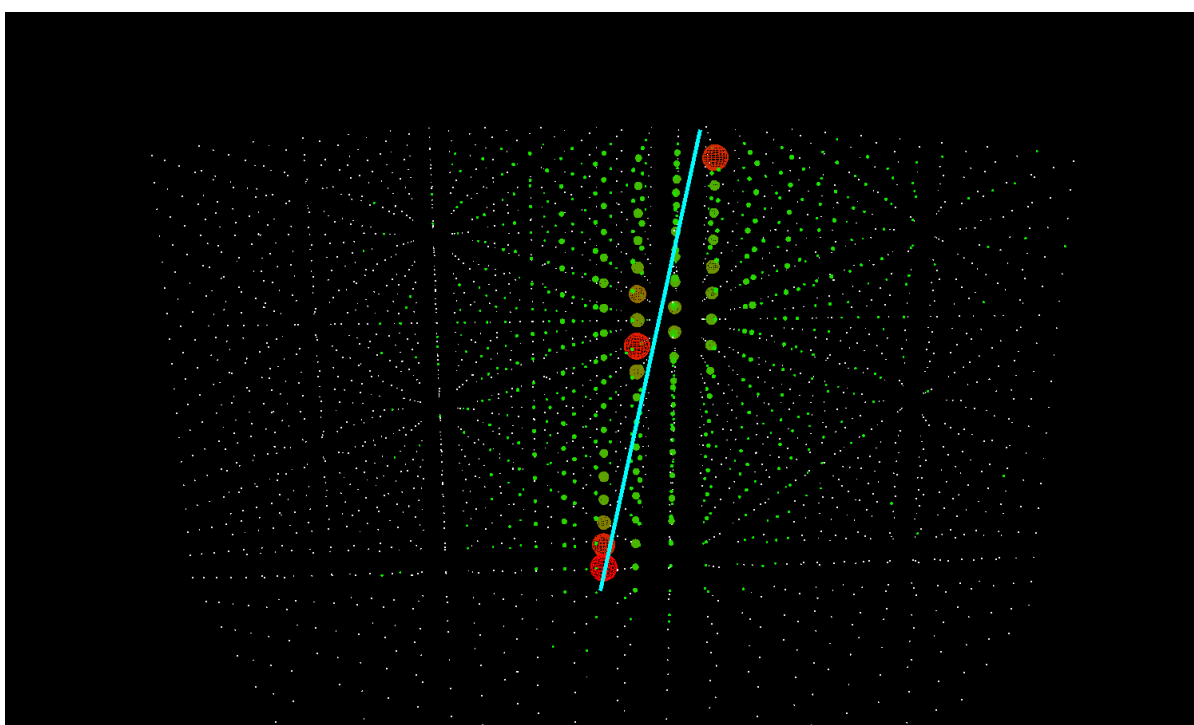


Рис. 16. 100 ТэВ, 45x18.

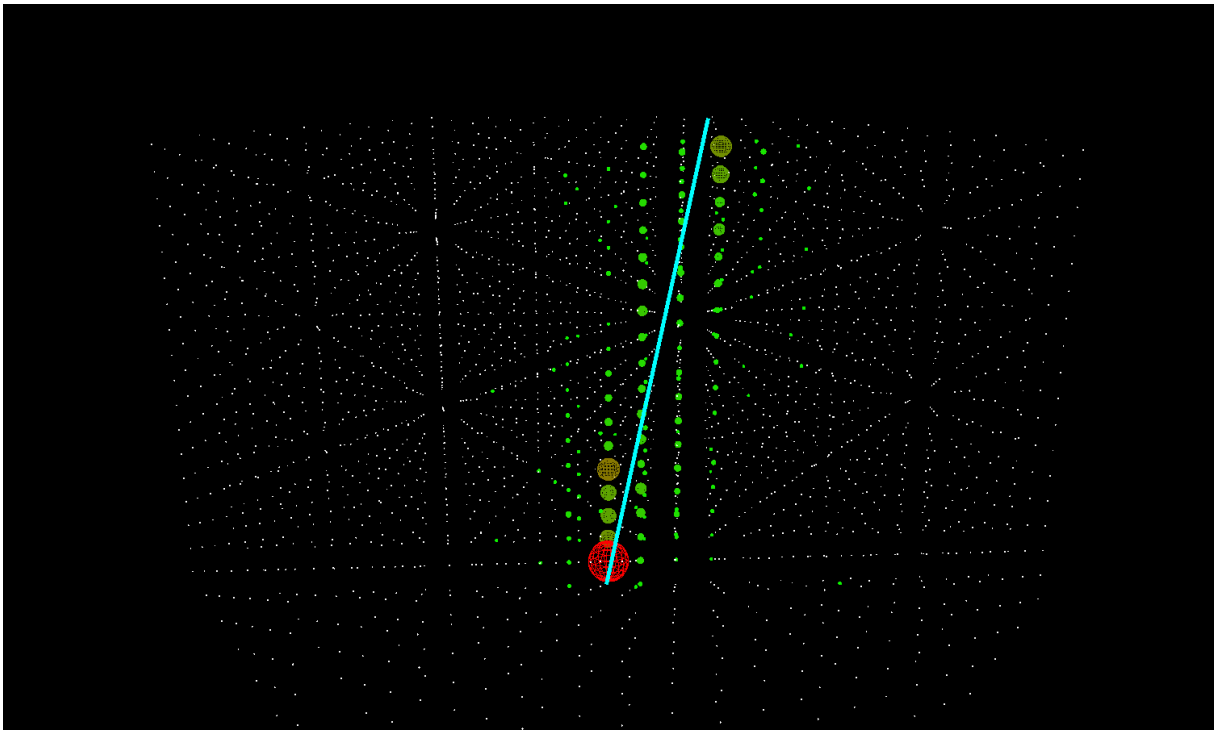


Рис. 17. 100 ТэВ, 90x36. Параметры примерно соответствуют ARCA.

Видно, что для случаев на рис. 15 и 16 срабатывает слишком большая часть детектора, поэтому расстояние между модулями следует увеличить. На рис. 17 срабатывание оптимальное. Аналогичные рис. 17 параметры планируются быть использованы в ARCA.

Заключение.

В рамках данной работы проведено моделирование нейтринного телескопа KM3NeT и взаимодействия с ним высокоэнергичного мюона (потенциально образовавшегося от высокоэнергичного нейтрино) с помощью алгоритмов, написанных на языке C++ с использованием библиотек GEANT4, а также визуализированы события для разных энергий мюона и различных пространственных параметров детектора. На рисунках продемонстрированы срабатывания детектора для разных параметров.

Список литературы.

1. Сайт проекта - <https://www.km3net.org/>
2. Letter of Intent for KM3NeT 2.0 - <https://arxiv.org/abs/1601.07459>.
3. Физика нейтрино сверхвысоких нейтрино – Е. В. Широков.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino/uen/index.html>
4. Способы детектирования нейтрино.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino1/neutino07.htm>
5. Космические лучи высоких энергий и эффект Грейзена–Зацепина–Кузьмина/ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/77/3/036901>
6. Физика взаимодействия нейтрино в нейтринных телескопах -
https://www.researchgate.net/publication/354493658_Neutrino_Interaction_Physics_in_Neutrino_Telescopes
7. Цифровой оптический модуль KM3NeT -
https://www.researchgate.net/publication/326504151_The_Digital_Optical_Module_of_KM3NeT
8. Характеристика фотоумножителей Hamamatsu для нейтринного телескопа KM3NeT -
https://www.researchgate.net/publication/325480540_Characterisation_of_the_Hamamatsu_photomultipliers_for_the_KM3NeT_Neutrino_Telescope
9. Пропускание света в глубоководных водах на месте установки нейтринного телескопа Antares - <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0412126.pdf>