

Возможности акустической системы нейтринного телескопа KM3Net

А. А. Брусницын,^{1*} Е. В. Широков²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 02.04.2018; Подписана в печать 10.04.2018)

Астрономия высоких энергий изучает фундаментальные вопросы, а также позволяет обнаруживать галактические и внегалактические объекты. KM3Net — крупнейший строящийся нейтринный телескоп северного полушария. Его проектируемый объем будет составлять 5 км^3 , предполагаемая дата окончания постройки 2020 г. Детектор находится на глубине 3500 м на расстоянии 100 км от берега Капо-Пассеро. Акустическое позиционирование структуры детектора будет обеспечиваться путем детектирования акустических сигналов, вырабатываемых на длинной базовой линии акустическими маяками. В качестве приемников используются система акустических датчиков, движущихся вместе с конструкцией блока детектирования. Для нахождения местоположения каждого детектора, требуется знания о скорости распространения акустической волны. Для этого установлены модули для нахождения проводимости, температуры и глубины, а также модуль для определения солености воды. Анализ данных будет проходить в режиме реального времени. На данный момент была создана и протестирована программа для калибровки местоположения всех элементов детектора.

PACS: 29.85.Ca 29.85.Fj

УДК: 53.087.45

Ключевые слова: нейтрино, нейтринные телескопы, KM3Net, акустический метод, геометрическая триангуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Астрономия высоких энергий крайне важна для понимания устройства нашей вселенной, так как позволяет обнаруживать галактические и внегалактические объекты, а также дает информацию о фундаментальных проблемах физики, связанных с происхождением космических лучей, поиском темной материи. Один из самых многообещающих способов изучения космоса связан с регистрацией нейтрино высоких и ультравысоких энергий. Фотоны или протоны высоких энергий либо поглощаются после взаимодействия с космическим микроволновым фоновым излучением, либо сильно отклоняются магнитными полями галактик. В отличие от них, обладая высочайшей проникающей способностью, нейтрино с энергиями десятки ГэВ и выше, могут донести до нас информацию, практически не меняя своей траектории, что невозможно добиться другими методами. Поэтому исследование на глубоководных нейтринных телескопах в настоящее время является одной из самых актуальных задач нейтринной физики. Это, безусловно, мощнейший инструмент получения информации о различных объектах во Вселенной.

Построение нейтринных телескопов требует детектирующий объем колоссальных размеров, так как нейтрино имеет малое сечение взаимодействия, а при

энергиях свыше 1010 эВ значения потоков тоже будет крайне мало. На данный момент основной способ обнаружения — это оптический метод, основанный на регистрации вторичной частицы, порожденной астрофизическим нейтрино с помощью эффекта Вавилова-Черенкова. При этом эффективный объем может достигать $1\text{--}5 \text{ км}^3$ с разнесенными на 40-60 м детекторами. В качестве альтернативы этому методу рассматривается акустический метод, регистрирующий акустические волны, образованные при взаимодействии нейтрино со средой с эффективной длиной пробега до 10 км. Это в свою очередь позволит задействовать объемы, превышающие 100 км^3 с расстоянием между детектирующими модулями порядка нескольких километров. Однако, у этого метода есть свои недостатки: с текущим оборудованием нижняя граница по энергии нейтрино будет 1018 эВ.

Одной из современных установок, где возможна проверка данного метода, является сооружаемый в Средиземном море телескоп KM3Net. В настоящий момент акустические системы, входящие в состав детектора, выполняют различные технические функции, но в дальнейшем могут быть использованы и для решения физических задач. В данной работе пойдет речь об итальянской части этого эксперимента.

1. KM3NET-IT

Итальянская часть детектора развертывается вблизи берега Сицилии недалеко от Капо-Пассера на глу-

*E-mail: aa.brusnicyn@physics.msu.ru

бине 3500 м. Km3NeT используют под себя основу инфраструктуры от детектора NEMO. Детектирующие модули состоят из двух типов различных по геометрии и использованному оборудованию: башни и струны [1,2].

Каждая башня в себя включает 8 этажей с длиной 8 м, разнесенных вертикально на 40 м, на каждом из которых расположены 6 ФЭУ для оптического метода и 2 гидрофона для акустического, показано на рис. 1. Струны же состоят из 18 этажей, по одному DOM (цифровой оптический модуль) на каждом, с расстоянием 36 м между модулями. Для акустического метода в каждый DOM был встроен пьезодатчик. Общая длина струны составляет около 700 м и погружена с 3500 м до 2800 м (рис. 1).

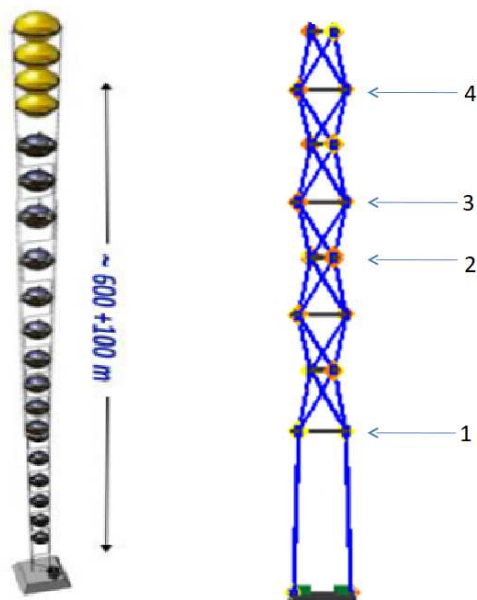


Рис. 1: «Струна» и структура башни: 1 — панель CTD, 2 — доплеровский датчик тока DCS, 3 — C-STAR, 4 — панель CTD

Кроме этого, на башнях и струнах присутствуют дополнительные детекторы для мониторинга температуры, солености, измерения ослабления синего света в морской воде, плотности воды, проводимости, а также есть доплеровские датчики тока, используемые для мониторинга глубоких морских течений. Все эти системы используются как в калибровке ФЭУ, так и в калибровке местоположения каждого из элементов детектора. Последнее особенно важно, потому что детектирующие модули имеют четкую фиксацию только на дне, а колебания струн и башен, вызванные течениями или другими морскими источниками колебаний, приводят к смещению детектора. Что в свою очередь оказывает влияние на определение источника нейтрино, для которого требуется знать точное время фикса-

ции сигнала и положение детектора, так как ошибка при реконструкции трека принесет огромный сдвиг положения источника нейтрино. Для этих целей ведется разработка акустической системы позиционирования.

2. APS(АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ)

На первом этапе эксперимента основной целью работы гидрофонов и пьезодатчиков будет определение местоположения каждого из элементов детектора. Для этого используется APS система, основанная на акустической триангуляции [1]. Она состоит из гидрофонов, пьезодатчиков, то есть приемников, и автомаяков. На приемниках будет происходить детектирование акустических сигналов, которые вырабатываются на длинной базовой линии (LBL) пятью фиксированными акустическими маяками, находящимся на морском дне, на расстоянии около 400 м от башни и в основании башни, рис. 2. Надо учитывать, что приемники тоже движутся вместе с механической конструкцией блока детектирования, следовательно, калибровка местоположения должна происходить в два этапа: первый — калибрует саму систему LBL, а второй — непосредственно несет ответственность за калибровку местоположения элементов детектора.

Вся калибровка будет происходить не в режиме онлайн, а на берегу в оффлайн режиме, где данные со всех акустических приемников оцифровываются в открытом море на частоте 192 кГц с разрешением 24 бит и непрерывно передаются на берег. Получаемые данные о временных отметках сравниваются с абсолютным временем с помощью специализированной системы, в которой происходит поэтапное сравнение с временными отметками GPS с берега. Среди прочего, используется независимый мониторинг угловой ориентации в реальном времени, который получается благодаря использованию курсор-вертикальной системы, включающий в себя трехосные гироскопы, акселерометры и магнитометры, размещенные внутри каждого DOM.

Система приемников и маяков была протестирована. Испытания были проведены в порту Гандии в Испании и получено, что детекторы позволяют измерить местоположения с хорошей точностью, лучше, чем 30 мкс, что соответствует лабораторным измерениям. Следовательно, можно сделать вывод, что система удовлетворяет требованиям к точности по APS. В сочетании с методами, разработанными для поиска времени прибытия(ТОА), по обработки акустических сигналов, APS готова к развертыванию и предварительному использованию.

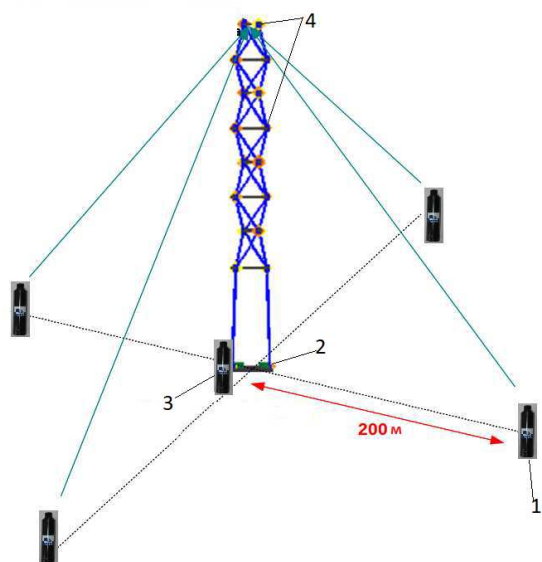


Рис. 2: Система APS: 1 — автономный маяк, 2 — станция мониторинга, 3 — маяк базы башни, 4 — акустические резонеры на обоих концах каждого этажа

3. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ТРИАНГУЛЯЦИЯ

В рамках калибровки нам не требуется постоянно искать с нуля местоположение каждого элемента детектора. Можно проводить калибровку относительно некоторых номинальных позиций, то есть по сути — находить отклонение от этих позиций. Калибровка положения от номинальных позиций осуществляется методом геометрической триангуляцией по времени пролета (TOF). Этот метод заключается в построении системы из трех объектов, образующих треугольник, для которого измеряется длины сторон и углы. Формирование первоначального треугольника ведется по номинальной позиции одного элемента детектора и двух позиций, определенных по TOF. Далее эта операция повторяется с учетом полученных новых позиций, в результате чего позиции обновляются относительно друг друга. Количество итераций выбирается в соответствии с требуемой точностью. Запись новых местоположений, определенных по расстояниям и углам между ними, будет занесена в базу данных с учетом времени калибровки. TOF для геометрической триангуляции будет определяться с помощью $TOF = TOA - TOE$, где TOA — это время прибытия (регистрации сигнала) приемником, а TOE — это время эмиссии сигнала. Испускание сигнала акустическими маяками будет периодически, что позволяет не хранить полные записи о TOE, а только время первого испускания и период для каждого маяка. За счет точного вычисления профиля скорости звуковой волны, значения TOF вычисляется с нужной точностью.

Естественно, для этой системы не менее важно знать какой из маяков(эмиттеров) испустил сигнал, а ка-

кой приемник его принял. Для однозначного определения используется метод спектрально временного распространения (TSSC) [3]. Данные кодов устройств на TSSC определяется псевдослучайными наборами акустических сигналов. Каждый акустический сигнал от эмиттера передает свою последовательность кода TSSC с периодом около 12 с, а именно — 6 импульсов (представляют собой синусоидальные пакеты с определенной частотой и длительностью около 5 мс) с интервалом 2 с. Сигналы генерируются псевдослучайно и отличаются друг от друга, что, в свою очередь, убирает двусмысленность в опознавании источника. Маяки однозначно идентифицируются, благодаря использованию таблицы поиска кодов TSSC. Впоследствии эти коды заносятся в базу данных с соответствующими номерами, внесенными как ID_Emitter, ID_Hydrophone и ID_Piezo. И дальнейшая обработка будет выполнена используя данные об эмиттерах и приемниках, соответствующих своему ID. Это уменьшает объем данных и ускоряет обработку.

Также на основе приема сигнала TSSC собираются данные по истинности, обозначаемые в базе данных как TrueTableEmitter, TrueTableHydrophone и TrueTablePiezo, и строится матрица «таблица истинности», показывающая какие сигналы от эмиттеров доходят до гидрофонов или пьезодатчиков, а также позволяющая определить их работоспособность. Эта матрица имеет важное значение при обработке, так как не только отсекает неработающие устройства, что экономит мощности обрабатывающих устройств, но и позволяет провести дополнительную проверку приходящих сигналов на совпадение источника и детектора.

4. КАЛИБРОВКА LVL И ДЕТЕКТОРОВ

Как было сказано ранее, калибровка местоположения детектора происходит в два этапа. Программы для этих целей были созданы в среде OCTAVE, выбранной благодаря быстрой обработке данных, возможности оперировать большими объемами информации, способностью быстро взаимодействовать с базой данных и бесплатному распространению. На входе программа принимает номинальные значения, таблицы истинности, TOA, время первого испускания автомаяками сигнала, значения скорости звука. Используя информацию из таблицы истинности, будут зануляться неработающие устройства, что уменьшит количество операций и позволит быстрее сформировать TOF. TOF получается за счет вычитания из соответствующих нужным сигналам эмиттеров и гидрофонов TOA, получаемую от первоначального времени эмиссии и времени повторения TOE.

В определении местоположения используется метод геометрической триангуляции. Калибровка происходит за счет поиска расстояния между приемниками и эмиттерами. Она идет последовательно, при том первый эмиттер калибруется сам на себя, второй на перво-

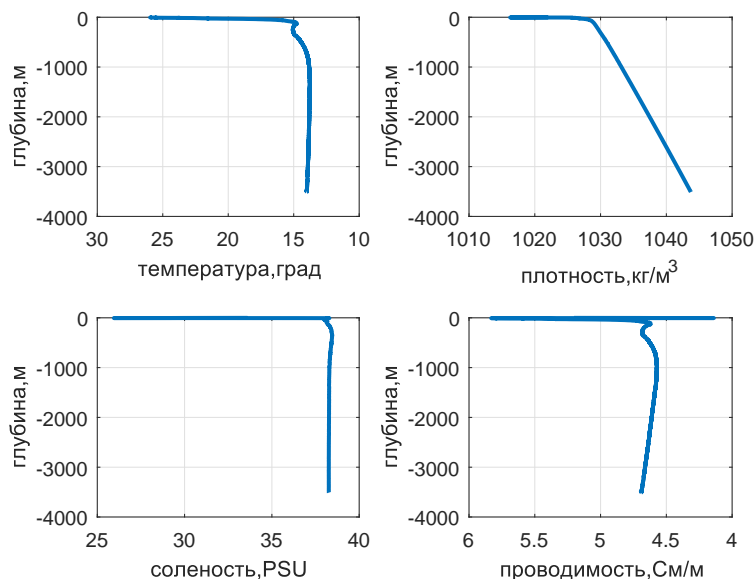


Рис. 3: Зависимости температуры, плотности, солености, проводимости от глубины

го и так далее. После прохождения полной цепочки, первый начинает уже калиброваться с учетом новых полученных положений остальных детекторов, что будет сделано и с оставшими. Новые позиции будут записаны с учетом неработающих участков детектора, что повлияет и на последующую калибровку. Эта процедура позволяет определить систему координат LBL, необходимую для расчета абсолютных положений гидрофонов. Период LBL калибровки выбирается меньше, чем период для калибровки детекторов.

Данные от калибровки LBL используются на следующем этапе вместе с номинальными позициями элементов детектора. Процесс калибровки аналогичен предыдущему. После калибровки в базу данных вносятся новые положения приемников с учетом времени прихода сигнала. Программа продолжает совершенствоваться и готова к обработке данных с большого массива гидрофонов и пьезодатчиков.

5. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

Для целей нашей калибровки требуется знать точную скорость звука, которая в воде будет зависеть от множества параметров. Данные будут собираться с помощью дополнительных детекторов, таких как CTD, C-STAR, DCS и помещены в таблицу по CTD. На рис. 3 показаны зависимости, полученные с датчиков на апрель 2017 г.

На данный момент скорость звука рассчитывается с помощью алгоритма Макензи и формулы Дель Гроссо. Этот метод использует данные по солености, давлению

и температуры [4]. Скорость обработки вычисления средней скорости волны для этого метода довольно велика, однако, появляется ошибка 1–1.5 м/с. Сейчас обсуждаются другие методы для получения скорости распространения волны. В текущую версию программы по калибровке не встроено код для получения скорости звука, а используется фиксированное значение. В ближайшие пару месяцев будет произведены работы по встраиванию этого кода.

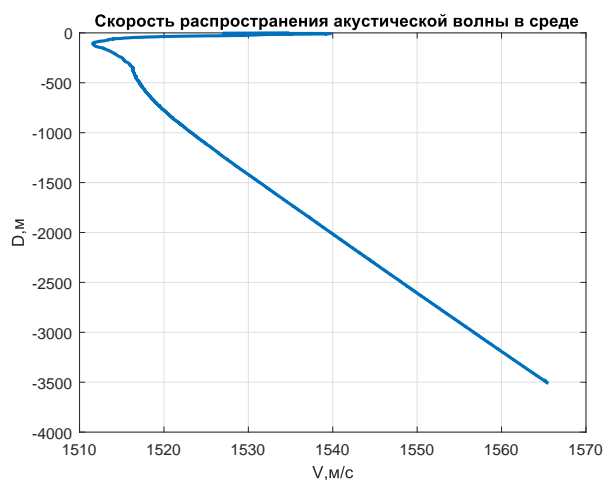


Рис. 4: Скорость распространение акустической волны в воде в зависимости от глубины у берегов Капо-Пассеро

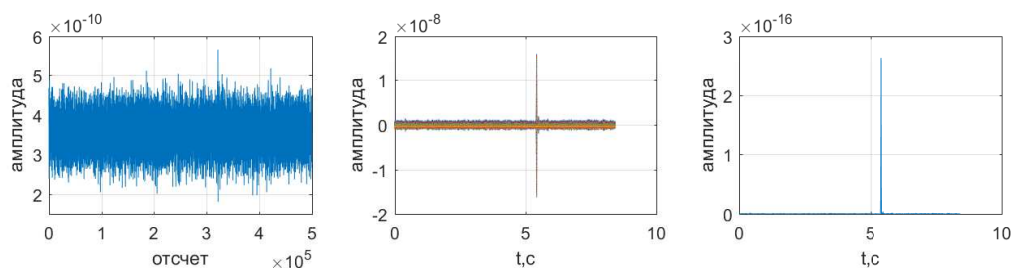


Рис. 5: Этапы нахождения ТОА в акустической волне: исходный акустический сигнал, сигнал после корреляции с эталонным сигналом, сигнал с выделенным пиком

6. ВЫДЕЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА(ТОА)

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

Так как сигнал, проходящий на берег, оцифрован с частотой 192 кГц и битрейтом 24, то первым делом надо привести сигнал к стандарту, который будем дальше использовать. Исходный сигнал показан на рис. 5 (левый график). Для выделения нужного сигнала, среди других и шума, будет использован метод корреляции. В этом методе проходящий сигнал будет последовательно сравнен с тестовым сигналом, у которого будут нужные характеристики. Для маяков этот сигнал имеет синусоидальный вид, с длительностью 5 мс. На рис. 5 (центральный график) показан сигнал

после проведения корреляции с номинальным сигналом для искомого маяка с частотой 38 кГц и длительностью 5 мс. После этого анализа происходит процесс выделения пиков и нахождения времени прилета сигнала (ТОА), на рис. 5(правый график).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На июнь 2017 г. были развёрнуты две струны и одна башня. Подготавливаются к развертке последующие части детектора. К настоящему моменту в ходе работы с гидроакустическими системами детектора выполнено следующее: освоена система акустического позиционирования проекта KM3Net, в рамках свойств гидрофонов и маяков была разработана программа для обработки проходящего сигнала. Один из важнейших результатов работы — завершение создания программы по калибровке местоположения базовой линии акустической системы детектора в целом и каждого элемента детектора с учетом как характеристик скорости акустической волны, так и «таблицы истинности». Также были созданы ряд программ для тестирования различных частей акустической системы телескопа и обработки сигнала. Завершение строительства первой фазы детектора ожидается в 2020–2021 гг. К этому моменту все элементы системы калибровки будут протестированы и готовы к использованию.

- [1] *Salvatore Viola* Design and operation of novel underwater acoustic detectors: applications to particle physics and multidisciplinary science for the NEMO-SMO and KM3NeT projects, Ph.D. thesis, XXV cycle (2009-2012)
 [2] *The KM3NeT Collaboration* Letter of Intent for ARCA and ORCA, arXiv:1601.07459v1 [astro-ph.IM], 2016

- [3] Acoustic DAQ and position Calibration, <http://wiki.km3net.de>.
 [4] *The KM3NeT Collaboration* Measurement of the Group Velocity of Light in Sea Water at the ANTARES Site, arXiv:1110.5184v2 [hep-ex] 13 Feb 2012

Neutrino telescope KM3Net: features of the acoustic system.

A. A. Brusnitsyn^{1a}, E. V. Shirokov^{1,2b}

¹Department of general nuclear physics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

E-mail: ^aaa.brusnitsyn@physics.msu.ru, ^bshirokov@depni.sinp.msu.ru

The high energy astronomy studies fundamental questions and also allows to explore galactic and extragalactic objects. KM3NeT is the largest neutrino telescope in the Northern hemisphere being construction. Its intended volume will be 5 km³, with final construction date deemed to be in 2020. The detector is placed in 3500 m depth, 100 km from Capo Passero's coast and consists of two types of structures: strings and towers. Acoustic positioning of detector structure will be provided by detection of the acoustic signals developed on LongBaseLine, by five fixed acoustic beacons being placed on a seabed. System of the acoustic sensors is used as receivers moving together with a mechanical design of the block of detection. Exact knowledge of speed of distribution of an acoustic wave is required to find the exact position of each detector. Modules finding conductivity, temperature and depth, as well as module for definition salinity of water are installed for this purpose. The analysis of data will be carried out in real time. The program for calibration of location of all elements of the detector has been created and tested by this time.

PACS: 29.85.Ca 29.85.Fj

Keywords: neutrino, neutrino telescope, KM3Net, acoustic method, geometrical triangulation

Received 02 April 2018.

Сведения об авторах

1. Брусницын Андрей Алексеевич — аспирант МГУ; тел.: +7(917)505-32-15, e-mail: aa.brusnicyn@physics.msu.ru.
2. Широков Евгений Вадимович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: +7(495)939-25-58, e-mail: shirokov@depni.sinp.msu.ru.