

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П.А. ЧЕРЕНКОВА

Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий

Ж.-А.М. Джилкибаев, Г.В. Домогацкий, О.В. Суворова

Обсуждаются состояние и перспективы развития крупномасштабных детекторов черенковского излучения в естественных средах — глубоко под водой и во льду (Байкал, Средиземное море, Антарктида), — ставших в последние десятилетия основным инструментом исследования природных потоков нейтрино высоких энергий.

Ключевые слова: черенковское излучение, нейтринные телескопы, нейтринная астрофизика

PACS numbers: 29.40.Ka, 41.60.Bq, 95.55.Vj

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505j.0531

Содержание

1. Введение (531).
 2. Метод глубоководного детектирования частиц высоких энергий (532).
 - 2.1. Излучение Вавилова – Черенкова заряженных частиц в прозрачных средах. 2.2. Распространение черенковского излучения в среде.
 3. Нейтринные телескопы (535).
 - 3.1. Baikal-GVD. 3.2. KM3NeT. 3.3. IceCube. 3.4. Нейтрино астрофизической природы.
 4. Заключение (538).
- Список литературы (539).

1. Введение

Природный поток нейтрино несёт в себе богатейшую и во многих отношениях уникальную информацию об окружающем нас мире. Исследование этого потока в различных энергетических диапазонах способно дать ключ к пониманию ранних стадий эволюции Вселенной, процессов формирования наблюдаемого обилия химических элементов, механизма эволюции массивных звёзд и взрывов сверхновых, пролить свет на проблему тёмной (невидимой) материи, механизм генерации энергии, на состав и внутреннее строение Солнца в настоящее время и в достаточно удалённом прошлом и даже продвинуться в понимании проблемы внутреннего строения одного из наиболее трудных для изучения объектов — планеты Земля.

Ж.-А.М. Джилкибаев, Г.В. Домогацкий, О.В. Суворова.
Институт ядерных исследований РАН,
просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация
E-mail: domogats@pcba10.inr.ruhep.ru, suvorova@cpc.inr.ac.ru

Статья поступила 16 марта 2015 г.

Оставляя в стороне "задачу века" (А.Д. Сахаров) — регистрацию реликтового нейтринного излучения, которая сегодня кажется отдалённой мечтой, весь остальной исследуемый энергетический диапазон, представленный на рис. 1, можно достаточно условно разбить на три категории по используемым методам регистрации нейтрино. В диапазоне энергий от 10^5 до 10^9 эВ все результаты получены в экспериментах, выполнявшихся в условиях подземных лабораторий либо с помощью радиохимических (хлор-аргонового, галлий-германиевого) методов регистрации нейтрино, либо детекторов на основе жидкого или пластического сцинтилляторов, либо водных черенковских детекторов. На крупнейшем из черенковских водных детекторов — SuperKamiokande (Япония) с рабочим объёмом очищенной воды 22,5 тыс. м³ — было выполнено исследование потоков нейтрино с

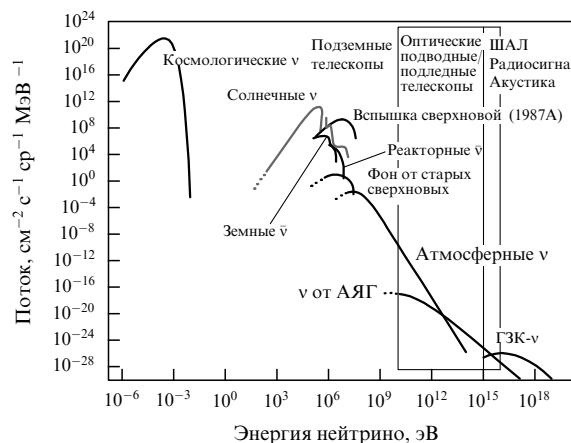


Рис. 1. Природные потоки нейтрино на уровне Земли и способы их измерения. АЯГ — активные ядра галактик, ГЭК — область предельных энергий космических лучей согласно эффекту Грейзена–Зацепина–Кузьмина, ν — нейтрино, $\bar{\nu}$ — антинейтрино.

энергией в области $10^8 - 10^9$ эВ, образующихся в атмосфере Земли под действием космических лучей, и был обнаружен эффект нейтринных осцилляций.

Верхняя граница следующего энергетического диапазона ($10^9 - 10^{16}$ эВ) достаточно размыта, так как основным инструментом исследования здесь стали крупномасштабные черенковские детекторы (нейтринные телескопы), создаваемые в естественных средах (воде природных водоёмов и антарктическом льду), и возможности увеличения чувствительности таких детекторов ещё далеко не исчерпаны. Это направление развития экспериментальной нейтринной астрофизики, предложенное в 1960 г. выдающимся советским физиком М.А. Марковым [1], оказалось чрезвычайно продуктивным. К настоящему времени разработана методика глубоководного детектирования элементарных частиц (и её модификация для антарктического льда), созданы первые детекторы последовательно на озере Байкал, на Южном полюсе в Антарктиде (AMANDA — Antarctic Muon And Neutrino Detector Array), в Средиземном море (ANTARES — Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) и, наконец, крупнейшая на сегодня установка IceCube с рабочим объёмом в 1 км^3 антарктического льда, на которой в 2010–2013 гг. впервые были зарегистрированы астрофизические нейтрино высоких энергий. Энергия самого мощного из этих событий оценивается величиной порядка 2×10^{15} эВ. Исследования диффузного потока нейтрино проводятся уже на уровне чувствительности, который на три порядка превышает уровень чувствительности крупнейших подземных детекторов.

Надежды на продвижение исследований потоков нейтрино в область энергий свыше $10^{17} - 10^{18}$ эВ связываются обычно либо с развитием методов акустического детектирования и созданием на их основе детекторов огромных объёмов в естественных водоёмах, либо с исследованиями на гигантских наземных установках для изучения широких атмосферных ливней (ШАЛ), либо с развитием методов регистрации радиосигнала от нейтрино.

Целью настоящей статьи является обсуждение некоторых особенностей метода глубоководного детектирования черенковского излучения, рассказ о состоянии и перспективах развития работ по созданию крупномасштабных черенковских детекторов в естественных средах и ведущихся на них исследованиях.

2. Метод глубоководного детектирования частиц высоких энергий

Как отмечалось во введении, в основе исследований природных потоков нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в экспериментах на глубоководных (подлёдных) нейтринных телескопах лежит метод регистрации черенковского излучения вторичных мюонов либо электромагнитных или адронных ливней, образующихся в нейтринных взаимодействиях, с помощью набора фотодетекторов, размещённых на достаточно больших — от нескольких десятков до нескольких сотен метров — расстояниях друг от друга. Эффективность этого метода во многом определяется как характерными особенностями процесса черенковского излучения заряженных частиц, так и гидрооптическими свойствами среды постановки эксперимента.

2.1. Излучение Вавилова – Черенкова заряженных частиц в прозрачных средах

Заряженная частица, движущаяся в преломляющей свет среде со скоростью, превышающей скорость света в среде, является источником черенковского излучения [2]. Спектральное распределение черенковских фотонов, излучаемых с единицы длины траектории частицы с единичным зарядом, определяется следующим выражением:

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

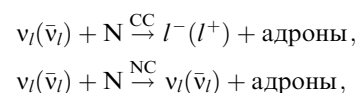
где λ — длина волны фотона в сантиметрах, $\alpha \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры, $n(\lambda)$ — фазовый показатель преломления света в среде, $\beta = v/c$ — скорость частицы относительно скорости света в вакууме. Замечательным свойством процесса черенковского излучения, которое во многом определяет эффективность глубоководного метода регистрации частиц, является испускание черенковских фотонов в каждый момент времени из точки на траектории, в которой находится частица, строго под фиксированным углом θ_C относительно направления движения частицы. Значение черенковского угла θ_C , определяемого из выражения $\cos \theta_C = 1/(\beta n)$, составляет примерно 42° для воды и льда. Абсолютное значение скорости черенковских фотонов $v_C(\lambda)$ определяется групповой скоростью распространения света соответствующей длины волны в среде:

$$v_C = \frac{c}{n_g(\lambda)}, \quad n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (2)$$

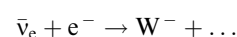
Рабочим диапазоном длин волн фотонов, детектируемых в глубоководных экспериментах, является интервал 350–600 нм. Нижняя граница этого интервала обусловлена поглощением света стеклом фотодетекторов, а верхняя — увеличением показателя поглощения света в воде и льду, а также уменьшением интенсивности черенковского излучения и понижением квантовой чувствительности электронных фотоумножителей с возрастом длины волны фотонов в красной области спектра. Групповая скорость распространения света в воде и льду возрастает с увеличением длины волны фотонов, что приводит к размытию светового сигнала черенковского излучения во времени.

Мюоны и ливни с энергией в несколько сотен ГэВ и выше представляют собой два разных типа источников черенковского излучения высокой интенсивности, регистрируемых нейтринными телескопами.

2.1.1. Ливни с высокими энергиями. Ливни с высокими энергиями образуются при взаимодействиях нейтрино (ν) с нуклонами (N) в реакциях



где $l = e, \mu$ или τ , CC (Charged Current) — заряженный ток, NC (Neutral Current) — нейтральный ток, а также при резонансном рассеянии электронного антинейтрино на электроны:



с энергией в резонансе $E_0 = M_W^2/2m_e = 6,3 \times 10^6$ ГэВ и сечением взаимодействия $5,02 \times 10^{31} \text{ см}^2$. Черенковское

излучение электромагнитных и адронных ливней формируется фотонами, испускаемыми заряженными частицами ливня (в основном электронами и позитронами), и определяется их пространственным, угловым и временным распределением. Поперечный размер электромагнитного ливня, который характеризуется мольеровским радиусом (порядка 9 см для воды), практически не влияет на отклик фотодетекторов нейтринных телескопов. Угловое распределение электронного компонента ливня слабо изменяется вдоль оси ливня в окрестности максимума каскадной кривой, из которой излучается большая часть черенковских фотонов, и для ливней с энергией выше 100 ГэВ это угловое распределение может быть с удовлетворительной точностью описано единой функцией $\Psi_c(\theta)$, не зависящей от пространственных координат. Таким образом, распределение электронного компонента ливня можно представить в следующем виде:

$$N_e(x, \rho, \theta, t) \approx N_e(x) \Psi_c(\theta) \delta\left(t - \frac{x}{c}\right), \quad (3)$$

где c — скорость света в вакууме.

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 суммарной длине траекторий заряженных частиц dl_e на интервале dx . Так как подавляющее большинство частиц ливня движется вдоль его оси, $dl_e \approx N_e(x) dx$. Относительное угловое распределение черенковских фотонов, просуммированное по траекториям всех заряженных частиц ливня, $\Psi_C(\theta)$ (рис. 2) [3], при $E_{sh} > 100$ ГэВ практически не зависит от энергии ливня. Угловые распределения черенковских фотонов, испущенных с разных участков оси ливня в окрестности максимума каскадной кривой, незначительно отличаются от суммарного распределения $\Psi_C(\theta)$ [4], что позволяет разделить угловые и пространственные переменные и представить N_C в виде

$$N_C(x, \theta, t) \approx N_e(x) n_C \Psi_C(\theta) \delta\left(t - \frac{x}{c}\right), \quad (4)$$

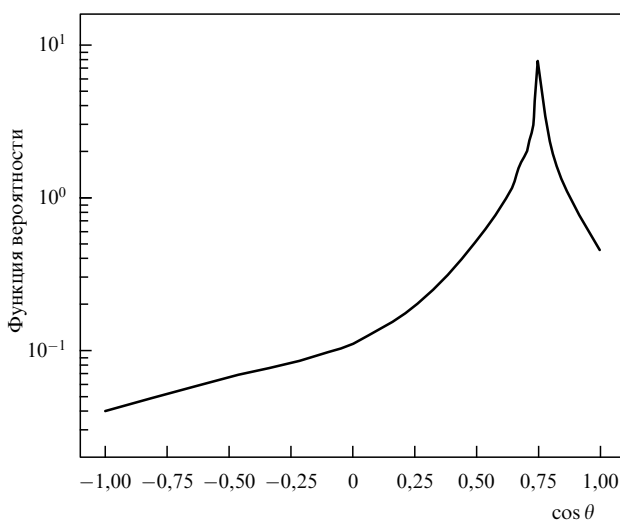


Рис. 2. Суммарное по всем траекториям e^\pm угловое распределение черенковского излучения от электромагнитных ливней высоких энергий.

где n_C — линейная плотность черенковского излучения релятивистских частиц (для воды и льда $n_C \approx 230-240$ фотонов на 1 см в интервале длин волн 350–600 нм).

Наиболее полно развитие ливня можно воспроизвести с помощью моделирования методом Монте-Карло. Однако эта процедура требует больших затрат машинного времени. Поэтому при моделировании отклика нейтринных телескопов на черенковское излучение ливней целесообразно использовать аналитические аппроксимации продольного распределения заряженных частиц в электромагнитных и адронных ливнях. В качестве примера приведём одну из аналитических аппроксимаций для электромагнитных ливней, предложенную Бельенским [5]:

$$N_e(X) = \left(\frac{E_{sh}}{E_C}\right)^S S^{-1,5X} \exp(-2,49S + 0,5(S-1)X + 0,025), \quad (5)$$

$$S = \frac{3X}{X + 2 \ln(E_{sh}/E_C) - 2,4}, \quad (6)$$

где $E_C = 72$ МэВ, $X = x/x_0$, $x_0 = 36,1$ см — радиационная длина для воды.

Развитие электромагнитного ливня определяется сечением тормозного излучения электронов и сечением образования e^+e^- -пар фотонами. Как впервые было отмечено Ландау и Померанчуком и затем обосновано в рамках квантово-механического подхода Мигдалом [6], при достаточно больших энергиях электронов и фотонов сечения тормозного излучения и образования e^+e^- -пар в плотной среде могут быть уменьшены в $E^{-1/2}$ раз вследствие коллективного влияния атомов среды (эффект Ландау–Померанчука–Мигдала (ЛПМ)). Энергия, при превышении которой ЛПМ-эффект становится существенным, для воды составляет $E_{LPM} \approx 2240$ ГэВ [7].

Характерные особенности влияния ЛПМ-эффекта на развитие электромагнитных ливней заключаются в следующем [8]. Для энергий выше E_{LPM} наблюдается увеличение продольного размера ливня. ЛПМ-эффект практически не влияет на суммарную длину траекторий частиц ливня, которая остаётся пропорциональной его энергии. Распределение частиц в области максимума ливня существенно шире, чем в отсутствие учёта ЛПМ-эффекта, но число частиц в максимуме уменьшается. Отличие продольного распределения $N_e(x)$ по форме от ожидаемого в случае отсутствия ЛПМ-эффекта становится существенным начиная с энергии порядка $10E_{LPM} \approx 20$ ПэВ. При превышении этой энергии размер ливня возрастает с увеличением энергии пропорционально $E_{sh}^{1/3}$. Влияние ЛПМ-эффекта на развитие адронных ливней, образованных в нейтринных взаимодействиях, становится существенным лишь при $E_{sh} > 1$ ЭэВ [9, 10].

Полное число черенковских фотонов от электромагнитного или адронного ливня пропорционально суммарной длине траекторий заряженных частиц и, соответственно, энергии ливня:

$$N_C^{tot} = n_C L_C = B E_{sh} \text{ [ГэВ]}. \quad (7)$$

В случае электромагнитного ливня коэффициент пропорциональности [4, 11]

$$B = (1,04 - 1,16) \times 10^5 \text{ фотонов на 1 ГэВ}, \quad (8)$$

а в случае адронного ливня [10]

$$B = 0,86 \times 625 f(\epsilon) n_C, \quad \epsilon = \log(E_{sh} [\text{ТэВ}]), \quad (9)$$

$$f(\epsilon) = -1,27 \times 10^{-2} - 4,76 \times 10^{-2}(\epsilon + 3) - 2,07 \times 10^{-3}(\epsilon + 3)^2 + 0,52\sqrt{\epsilon + 3},$$

где коэффициент 0,86, согласно [11], учитывает уменьшение величины n_C для нерелятивистских электронов в адронном ливне. Принимая во внимание (7), число черенковских фотонов, испускаемых с участка оси ливня Δx в окрестности x , можно представить в следующем виде:

$$N_C(x, \Delta x, \theta, t) = BE_{sh} \Psi_C(\theta) \delta\left(t - \frac{x}{c}\right) \int_{x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \bar{N}_e(x') dx', \quad (10)$$

где $\bar{N}_e(x)$ — нормированное на единицу распределение электронного компонента вдоль оси ливня. Один из возможных алгоритмов моделирования черенковского излучения ливней высоких энергий выглядит следующим образом. Продольная длина ливня разбивается на достаточно малые отрезки Δx , и ливень рассматривается как суперпозиция точечных источников черенковского излучения, расположенных в центре каждого отрезка, с интенсивностью $N_C(x, \Delta x, \theta, t)$, определяемой соотношением (10).

2.1.2. Мюоны. Область энергий мюонов, доступная для исследования с помощью нейтринных телескопов, простирается от нескольких десятков ГэВ до ультравысоких энергий. Световой поток, испускаемый при прохождении мюона в среде, 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 e^+e^- -пар

либо тормозного и фотоядерного взаимодействий мюона со средой.

Таким образом, световое поле, инициируемое мюоном в среде, можно разделить на две составляющие. Первая составляющая излучается непрерывно с постоянной линейной плотностью, определяемой выражением (1), при движении мюона вдоль своей траектории. Линейная плотность и угловое распределение фотонов в этом источнике обусловлены черенковскими фотонами собственно мюона. Вторая составляющая, которая формируется локальными (в грубом приближении точечными) источниками на траектории мюона, описывает черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения e^+e^- -пар, а также в результате тормозного и фотоядерного взаимодействий мюона (см. раздел 2.1.1).

2.2. Распространение черенковского излучения в среде

Основными оптическими параметрами среды, определяющими распространение черенковского излучения мюонов и ливней в естественных средах, являются показатель поглощения $\kappa(\lambda)$, показатель рассеяния $\sigma(\lambda)$ и индикатриса рассеяния $\chi(\mu, \lambda)$, где $\mu = \cos \vartheta$, ϑ — угол рассеяния фотона. На рисунке 3 приводятся характерные спектральные зависимости оптических параметров среды в местах проведения глубоководных экспериментов на Байкале, Южном полюсе в Антарктиде и в Средиземном море.

Антарктический лёд характеризуется сильной неоднородностью по глубине, связанной с различной прозрачностью атмосферы и различными условиями образования снежного покрова Антарктиды за период порядка 10 тыс. лет. В результате длина поглощения света во льду на глубинах от 1500 до 2500 м изменяется в широком диапазоне — от 30 до 150 м, длина рассеяния — от 0,4 м до 4 м, а длина ослабления не превышает 30 м. Интенсивное рассеяние света в совокупности с его слабым поглощением в антарктическом льду приводят

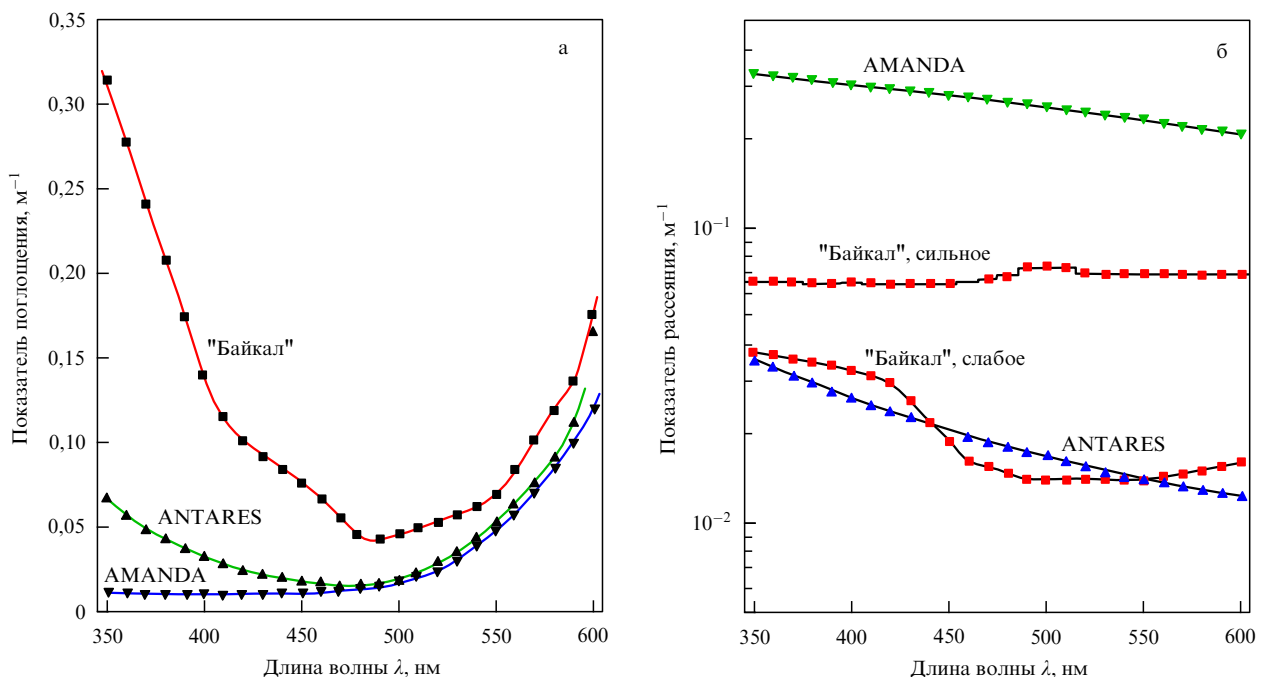


Рис. 3. Спектральная зависимость показателя поглощения (а) и показателя рассеяния (б) байкальской воды, антарктического льда и воды Средиземного моря.

к быстрой изотропизации светового поля и, соответственно, к потере информации о координатах и ориентации источника черенковского излучения.

Оптические свойства глубинных вод Средиземного моря характеризуются длиной поглощения 40–70 м и длиной рассеяния порядка 30–60 м.

Для глубинных вод Байкала характерными являются длина поглощения 22–25 м и длина рассеяния 30–50 м.

Длина рассеяния света в байкальской и средиземноморской воде более чем на порядок превышает таковую в антарктическом льду. Благодаря этому глубоководные телескопы Baikal-GVD (Baikal Gigaton Volume Detector) и KM3NeT (KM3 Neutrino Telescope) будут обладать существенным преимуществом при исследовании диффузного потока нейтрино в диапазоне энергий 10^2 – 10^6 ТэВ. Эти телескопы будут способны проводить не только исследование энергетического спектра на уровне чувствительности детектора IceCube, но и исследование глобальной и локальной угловой анизотропии диффузного потока нейтрино посредством регистрации ливней от нейтрино всех трёх типов с последующим восстановлением ориентации оси ливня с точностью порядка 1° – 3° . Отметим, что точность восстановления оси ливня в IceCube не превышает 15° .

3. Нейтринные телескопы

История зарождения и развития экспериментальной нейтринной астрономии достаточно подробно описана в обзорах [12, 13]. До последнего времени уровень знаний о природных потоках нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в основном определялся результатами, полученными в экспериментах на нейтринных черенковских детекторах NT200/NT200+ [14] и AMANDA, а также на нейтринном телескопе ANTARES, осуществляющем набор данных с 2008 г. Эти три установки, которые относятся к первому поколению нейтринных телескопов, характеризуются эффективным объёмом регистрации вторичных мюонов и ливней порядка 10^7 м³ по отношению к регистрации нейтрино с энергией выше 10 ТэВ.

Успешная эксплуатация на протяжении более чем десяти лет (начиная с конца 1990-х годов) нейтринных телескопов первого поколения и достигнутые в экспериментах на этих установках уровни чувствительности к природным потокам нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, которые примерно на два порядка превышают чувствительности наиболее крупных подземных детекторов (SuperKamiokande, MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory)), со всей очевидностью доказали возможность применения и эффективность метода детектирования нейтрино в естественных средах. Результаты, полученные в экспериментах на этих установках, стали побудительным мотивом к разработке и созданию нейтринных телескопов с характерным масштабом около 1 км³, обладающих на порядок более высокой чувствительностью к природным потокам нейтрино высоких энергий.

В настоящее время в мире активно развиваются три проекта крупномасштабных нейтринных телескопов следующего поколения в естественных средах: IceCube на Южном полюсе, KM3NeT в Средиземном море и Baikal-GVD на озере Байкал, которые находятся на разных стадиях разработки и реализации. Конфигурация, архитектура измерительных и коммуникационных систем

каждого из этих детекторов, а также их возможности при решении конкретных задач обусловлены их местоположением, свойствами среды, степенью сложности инженерно-технических решений при создании и эксплуатации установки, величиной затрат на создание и поддержку инфраструктуры, а также возможностью модификации конфигурации и увеличения светосилы телескопа.

3.1. Baikal-GVD

В 2006–2010 гг. коллаборацией "Байкал" были разработаны, изготовлены и испытаны в натуральных условиях на озере Байкал образцы всех базовых элементов и систем телескопа Baikal-GVD и разработан научно-технический проект телескопа Baikal-GVD [15]. Телескоп будет иметь модульную структуру, формируемую из функционально независимых установок — кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей (рис. 4). Модульная структура телескопа позволит проводить набор экспериментальных данных уже на ранних этапах развёртывания установки, даст возможность практически неограниченного увеличения его объёма, а также позволит при изменении научных приоритетов адаптировать его конфигурацию к изменившимся требованиям.

Основными регистрирующими элементами Baikal-GVD являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu-R7081HQE с полусферическими фотокатодами диаметром 250 мм и с высокой квантовой чувствительностью. ФЭУ вместе с управляющими электронными приборами размещаются в глубоководных стеклянных корпусах, образуя оптические модули (ОМ). Из оптических модулей, которые монтируются на вертикальных грузонесущих кабелях, формируются гирлянды. Основной структурной единицей гирлянды является секция оптических модулей. Секция представляет собой функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных. Каждая секция содержит 12 оптических модулей, расположенных на расстояниях 15 м вдоль гирлянды, а также центральный модуль (ЦМ) и служебный модуль (СМ).

Аналоговые сигналы со всех ОМ секции передаются в ЦМ по коаксиальным кабелям одинаковой длины. По этим же кабелям к оптическим модулям подводится низковольтное питание. В ЦМ осуществляется преобразование аналоговых сигналов оптических модулей в

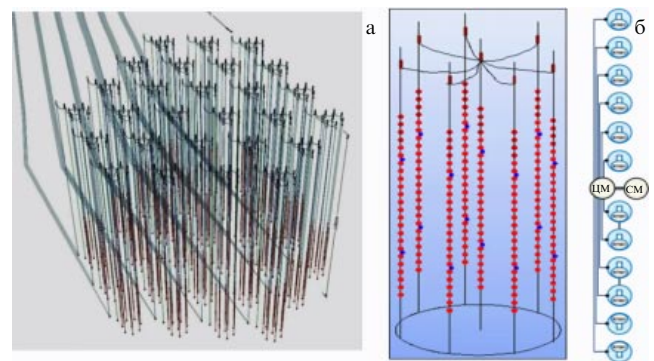


Рис. 4. Схематическое изображение нейтринного телескопа Baikal-GVD (а) и кластера телескопа (б). В правой части рис. б показана одна секция кластера.

цифровой код и передача информации по линии Ethernet. Служебный модуль предназначен для калибровки временных каналов установки, электропитания ОМ, а также для определения пространственного расположения гирлянды относительно донных маяков. Местоположение гирлянды определяется гидроакустической системой измерения координат.

Каналы синхронизации, электропитания и передачи данных секций объединяются в коммутационном модуле (КМ) гирлянды, который связан кабельными линиями длиной ≈ 1200 м с центральным блоком управления кластера. Базовая конфигурация кластера включает в себя восемь гирлянд (одна центральная и семь периферийных), содержащих по 24 ОМ каждая (две секции на гирлянде). Гирлянды расположены на расстоянии ≈ 60 м друг от друга. Кластеры гирлянд соединены с береговым центром комбинированными электро-оптическими линиями связи длиной ≈ 6 км.

В 2011 г. начался заключительный этап комплексных испытаний и отладки элементов и систем телескопа *Baikal-GVD*, который планируется завершить в 2015 г. созданием мультимегатонного глубоководного детектора нейтрино, содержащего 192 фотодетектора, размещённых на восьми вертикальных гирляндах, — первого демонстрационного кластера нейтринного телескопа *Baikal-GVD*. Эта установка будет сопоставима по своим масштабам и чувствительности с наиболее крупным на сегодняшний день в Северном полушарии нейтринным телескопом *ANTARES* в Средиземном море. В 2014 г. на Байкале развёрнута глубоководная установка, содержащая 112 оптических модулей, размещённых на пяти гирляндах первого кластера. Следующим этапом развития проекта *Baikal-GVD* является создание к 2020 г. первой очереди телескопа, состоящей из 12 кластеров, объёмом порядка $0,5 \text{ км}^3$, сопоставимым с объёмом *IceCube*, для регистрации нейтрино астрофизической природы. Вторая очередь телескопа будет содержать 27 кластеров с общим объёмом порядка $1,5 \text{ км}^3$.

3.2. KM3NeT

Основными участниками проекта *KM3NeT* по созданию нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в Средиземном море являются коллаборации *ANTARES* (Франция, Италия, Голландия и др.), *NEMO* (*Neutrino Mediterranean Observatory*) (Италия) и *NESTOR* (*Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research*) (Греция). За период 2006–2010 гг. была выработана общая концепция будущего телескопа и разработан ряд альтернативных вариантов его основных элементов и систем [16].

Телескоп будет обладать распределённой инфраструктурой, сформированной из 4–6 блоков, каждый из которых представляет собой полномасштабный нейтринный телескоп объёмом порядка $0,5\text{--}0,8 \text{ км}^3$. Блоки будут расположены в трёх географических районах — в Тулонском заливе (*KM3NeT_Fr*, Франция), у берегов Сицилии (*KM3NeT_It*, Италия) и возле города Пилос (*KM3NeT_Gr*, Греция). В каждом из этих районов будет развёрнуто по два блока, содержащих по 115 гирлянд оптических модулей, на расстоянии 90–120 м друг от друга. Каждая гирлянда (рис. 5а) содержит по 18 оптических модулей, размещённых последовательно вдоль гирлянды на расстоянии 36 м друг от друга. Нижний модуль гирлянды находится на расстоянии 100 м от

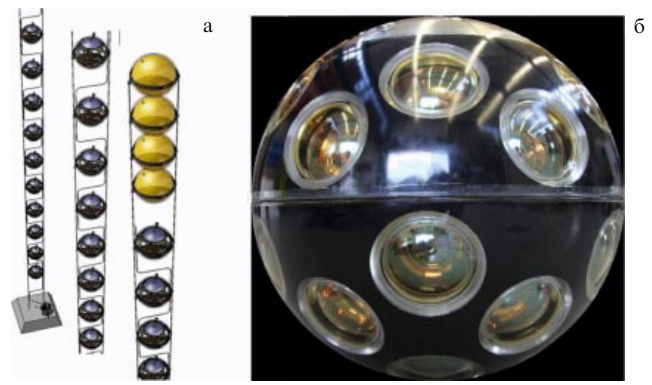


Рис. 5. (а) Гирлянда оптических модулей. Показаны нижняя, средняя и верхняя части гирлянды. (б) Оптический модуль эксперимента *KM3NeT*.

морского дна. Оптический модуль содержит 31 ФЭУ малого размера диаметром $\approx 7,6$ см, которые помещены в стеклянную сферу диаметром $\approx 43,2$ см (рис. 5б). Вся информация с каждого оптического модуля передаётся непосредственно в береговой центр управления и сбора данных по оптоволоконной линии связи.

В апреле 2013 г. начаты долговременные натурные испытания рабочей версии оптического модуля в составе телескопа *ANTARES*. В апреле 2014 г. у берегов Сицилии развёрнут для долговременных испытаний рабочий прототип гирлянды с тремя оптическими модулями.

Дальнейшие планы реализации проекта *KM3NeT* предполагают развитие береговой и подводной инфраструктуры телескопа во Франции и Италии и развёртывание к концу 2016 г. 31 гирлянды телескопа (24 в Италии и 7 во Франции). Следующим этапом развития проекта станет установка в течение 2017–2018 гг. двух блоков (по одному во Франции и в Италии) общим объёмом порядка $1\text{--}1,6 \text{ км}^3$, что позволит приступить к исследованию нейтрино астрофизической природы, регистрируемых в экспериментах на *IceCube*. Конечной целью проекта является создание телескопа, содержащего шесть блоков общим объёмом $3\text{--}5 \text{ км}^3$, в зависимости от выбранного расстояния между гирляндами.

3.3. IceCube

Нейтринный телескоп *IceCube*, расположенный на Южном полюсе в Антарктиде на глубине 1450–2450 м, содержит 5160 оптических модулей, размещённых на 86 гирляндах (рис. 6) [17].

Восемьдесят гирлянд телескопа, которые расположены на расстоянии 125 м друг от друга, включают в себя по 60 оптических модулей, размещённых с шагом 17 м вдоль гирлянды. На поверхности ледового покрова непосредственно над нейтринным телескопом размещено 320 оптических модулей, образующих налёдную установку *IceTop* для регистрации частиц широких атмосферных ливней. С целью повышения чувствительности телескопа в экспериментах по исследованию эффекта нейтринных осцилляций и поиску частиц — кандидатов на роль частиц тёмной материи, а также для увеличения апертуры телескопа относительно регистрации нейтрино из верхней полусферы плотность фотодетекторов в центральной части телескопа, получившей название *DeepCore*, увеличена за счёт установки шести

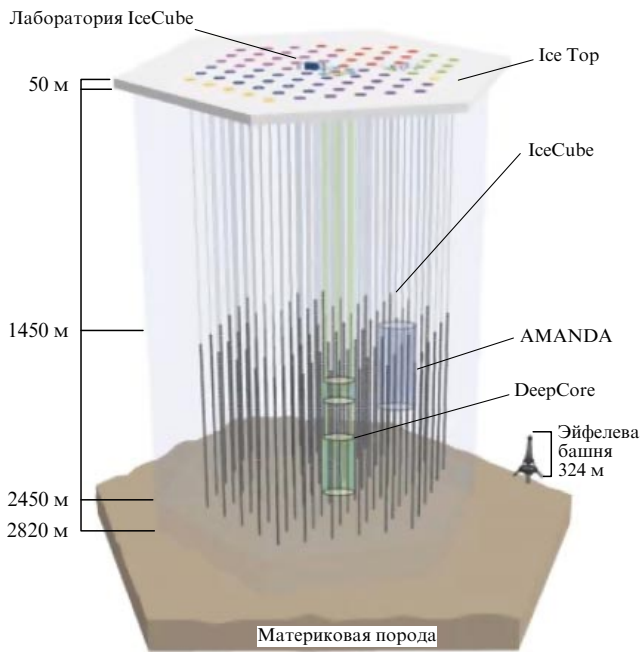


Рис. 6. Схематическое изображение нейтринного телескопа IceCube. Отмечено положение установки AMANDA, центральной части телескопа с большей плотностью размещения оптических модулей — Deep Core — и поверхностной установки IceTop для регистрации широких атмосферных ливней.

дополнительных гирлянд длиной по 72 м с более плотным размещением вдоль них оптических модулей. DeepCore обладает чувствительным объёмом около 10^7 м³ при энергетическом пороге регистрации мюонов порядка 10 ГэВ.

Первая из 86 гирлянд IceCube была развёрнута на Южном полюсе зимой 2005 г. В последующие годы

темпы монтажа установки нарастали, и в феврале 2011 г. детектор был запущен в эксплуатацию в проектной конфигурации. Анализ экспериментальных данных, накопленных как в период развёртывания телескопа, так и после его ввода в эксплуатацию, позволил получить к настоящему времени ряд важных результатов в задачах поиска нейтрино от астрофизических объектов, регистрации нейтринного потока, сопровождающего гамма-всплески, поиска проявлений тёмной материи, исследования диффузного потока нейтрино и в ряде других задач.

Ближайшие планы развития инфраструктуры телескопа IceCube включают в себя разработку проекта детектора нейтрино низких энергий с порогом регистрации мюонов порядка 1 ГэВ и эффективным объёмом около 1–10 Мт (детектор PINGU — Precision IceCube Next-Generation Upgrade) за счёт дальнейшего насыщения центральной части телескопа DeepCore дополнительными гирляндами фотодетекторов. Одной из основных задач, на решение которых нацелена установка PINGU, является определение иерархии массовых состояний нейтрино по результатам анализа энергетического и углового распределения мюонов от атмосферных мюонных нейтрино и антинейтрино, зарегистрированных в установке. Другим направлением развития нейтринной обсерватории на Южном полюсе является подготовка проекта установки объёмом 7–10 км³ для исследования нейтринных потоков в области энергий выше 1 ПэВ.

3.4. Нейтрино астрофизической природы

Сегодня наиболее ярким и значимым для дальнейшей судьбы развития нейтринной астрофизики представляется результат анализа данных эксперимента IceCube по поиску нейтрино астрофизической природы [18]. В качестве событий от нейтрино отбирались события, соответствующие взаимодействию нейтрино с энергией

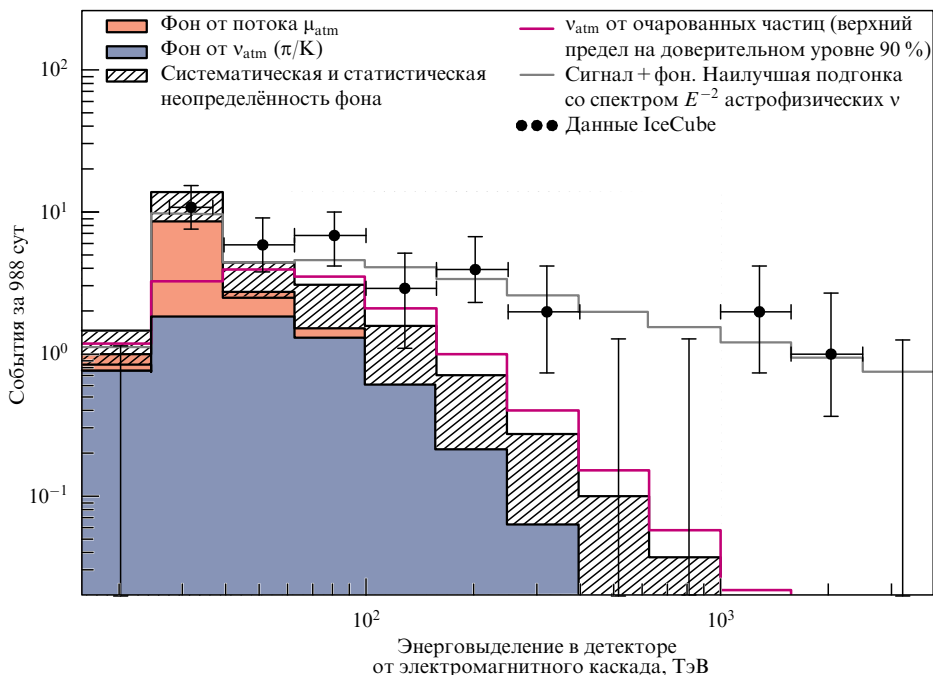


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Распределение по выделенной энергии экспериментальных событий и ожидаемые распределения от атмосферных мюонов (μ_{atm}) и нейтрино (ν_{atm}).

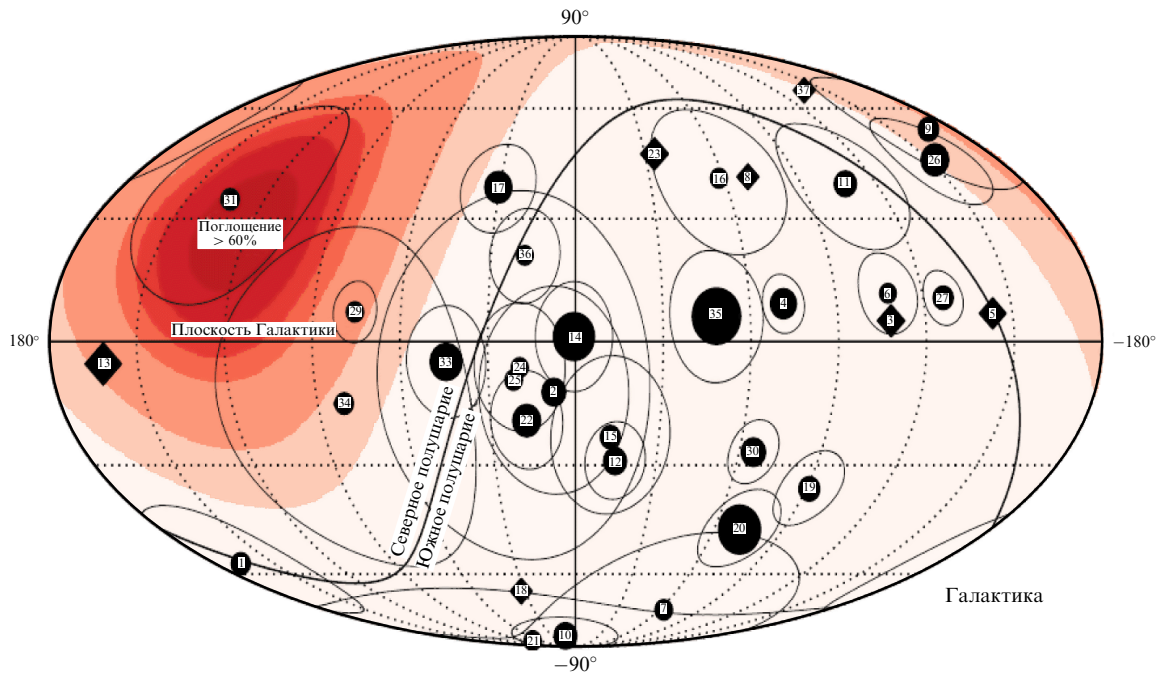


Рис. 8. Направления прихода нейтринных событий с энергией выше 30 ТэВ на небесной сфере в галактических координатах. Показаны все 28 "каскадных событий" (тёмные кружки) и 7 "трековых" (тёмные ромбы). Размер символов пропорционален значению энергии события от 30 ТэВ до 2 ПэВ. Неопределённость восстановленного направления "каскадных событий" соответствует размеру эллиптических контуров вокруг символов событий [18].

выше 30 ТэВ, в выделенной внутренней области телескопа объёмом порядка $0,4 \text{ км}^3$. В результате анализа данных, накопленных за три года, с мая 2010 г. по май 2013 г. (за 988 сут "живого времени" установки), было выделено 37 событий, что соответствует превышению в $5,7\sigma$ над ожидаемым числом фоновых событий от атмосферных мюонов и нейтрино. При этом число ожидаемых фоновых событий от атмосферных мюонов и нейтрино составляет соответственно $8,4 \pm 4,2$ и $6,6(-1,6 + 5,9)$ событий. Три события из этого набора данных имеют энергию выше 1 ПэВ. Относительная доля ливневых событий (28 событий) и событий с мюонным треком (9 событий) в общем наборе событий согласуется с ожидаемой для нейтринного потока с равной долей нейтрино разного типа. Точность восстановления направления мюонов и ливней в данном анализе соответственно $\leq 1^\circ$ и $\geq 15^\circ$. Восстановленные направления мюонных и ливневых событий согласуются с изотропным распределением первичных нейтрино. На рисунке 7 представлено распределение зарегистрированных событий по выделенной в телескопе энергии, а также ожидаемые распределения фоновых событий.

Энергетическое распределение экспериментальных событий согласуется со степенным поведением спектра астрофизических нейтрино с показателем степени $-2,3 \pm 0,3$. Положение восстановленных направлений прихода нейтрино на небесной сфере в галактических координатах представлено на рис. 8.

Анализ данных не выявил статистически значимых сгущений событий на небесной сфере. В настоящее время малая статистика и недостаточная точность восстановления направлений ливневых событий в IceCube не позволяют сделать однозначный выбор между галактической и внегалактической природой источников наблюдаемых нейтрино. С этой точки зрения, ввод в эксплуата-

цию водных нейтринных телескопов Baikal-GVD и KM3NeT, имеющих точность восстановления ливневых событий порядка нескольких градусов, даст возможность существенно продвинуться в решении данной проблемы.

Результат, полученный в эксперименте IceCube, является важнейшей вехой в развитии исследований природных потоков нейтрино высоких энергий, так как он позволяет ответить на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определяет необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий.

4. Заключение

Исследование возможности регистрации черенковского свечения продуктов взаимодействия нейтрино в водной среде в сочетании с идеей её реализации в среде естественных водоёмов (озеро, море, океан) и антарктическом льду привели к развитию метода глубоководной регистрации нейтрино высоких энергий и положили начало бурному развитию экспериментальной нейтринной астрофизики высоких энергий. Реализация этого подхода при кажущихся его внешней простоте и очевидности потребовала решения ряда совсем нетривиальных задач в области глубоководной инженерии, связанных с созданием систем управления установкой, содержащей распределённые в пространстве объекты, глубоководных систем высокоскоростной передачи данных, а также решения специфических задач анализа и обработки данных.

Успешная работа детекторов первого поколения: NT-200, AMANDA, ANTARES — и, наконец, "венца творения" на сегодняшний день — кубокилометрового IceCube — привела научное сообщество к осознанию

необходимости разработки, координации и согласования своих последующих планов и к созданию с этой целью Глобальной нейтринной сети (Global Neutrino Network — GNN) как первого этапа консорциума Глобальная нейтринная обсерватория (Global Neutrino Observatory — GNO) с участием всех действующих в этой области международных коллабораций — ANTA-RES, "Байкал", IceCube, KM3NeT. Развитие такого взаимодействия должно повысить уровень надёжности и достоверности получаемых результатов, ускорить поиск необходимых технических решений и предоставить возможность вести поиск и изучение источников нейтрино высоких энергий на всей небесной сфере.

В части, относящейся к Байкальскому нейтринному проекту, работы поддерживаются Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 13-02-12221офи-м, 14-02-00972а, 15-02-10125к).

Список литературы

1. Markov M A, in *Proc. of the 1960 Annual Intern. Conf. on High Energy Physics at Rochester* (Eds E C G Sudarshan, J H Tinlot, A C Melissinos) (Rochester, N.Y.: Univ. of Rochester, 1960) p. 578
2. Тамм И Е, Франк И М *ДАН СССР* **14** 107 (1937); Тамм И Е, Франк И М *УФН* **93** 388 (1967); Тамм И М *Phys. USSR* **1** 439 (1939); Тамм И Е *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1975) с. 77
3. Belyaev A, Ivanenko I, Makarov V, in *Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop, La Jolla, Calif., July 24–September 2, 1978* Vol. 1 (Eds A Roberts, G A Wilkins) (La Jolla, Calif.: DUMAND, Scripps Institution of Oceanography, 1979) p. 337
4. Bezrukov L B, Butkevich A V, in *Simulation and Analysis Methods for Large Neutrino Telescope. Proc. of the Workshop, Zeuthen, Germany, July 6–9, 1998* (DESY-PROC-1999-01, Ed. Ch Spiering) (Zeuthen: DESY, 1999) p. 265
5. Бельский С З *Лавинные процессы в космических лучах* (М.–Л.: Гостехиздат, 1948)
6. Migdal A B *Phys. Rev.* **103** 1811 (1956)
7. Довженко О И, Поманский А А *ЖЭТФ* **45** 268 (1963); Dovzhenko O I, Pomanskii A A *Sov. Phys. JETP* **18** 187 (1964)
8. Alvarez-Muñiz J, Zas E *Phys. Lett. B* **411** 218 (1997)
9. Alvarez-Muñiz J, Zas E, astro-ph/9906347
10. Alvarez-Muñiz J, Zas E *Phys. Lett. B* **434** 396 (1998)
11. Wiebusch Ch H V, PhD Thesis (Aachen: Physikalische Inst. RWTH, 1995)
12. Spiering Ch *Eur. Phys. J. H* **37** 515 (2012)
13. Katz U F, Spiering Ch *Prog. Part. Nucl. Phys.* **67** 651 (2012); arXiv:1111.0507
14. Домогацкий Г В *УФН* **181** 984 (2011); Domogatsky G V *Phys. Usp.* **54** 949 (2011)
15. Коллаб. "Байкал", Научно-технический проект глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на оз. Байкал (М.: ИЯИ РАН, 2010); <http://baikalweb.jinr.ru/>
16. Bagley P et al. (KM3NeT Collab.), KM3NeT Technical Design Report for a Deep-Sea Research Infrastructure in the Mediterranean Sea Incorporating a Very Large Volume Neutrino Telescope (2010); <http://www.km3net.org/KM3NeT-TDR>
17. IceCube South Pole Neutrino Observatory, <http://www.icecube.wisc.edu>
18. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **113** 101101 (2014)

Cherenkov detectors for high energy neutrino astrophysics

Zh.-A.M. Dzhilkibaev, G.V. Domogatsky, O.V. Suvorova

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences,
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation
E-mail: domogats@pcbai10.inr.ruhep.ru, suvorova@cpc.inr.ac.ru*

This review discusses the current status of and prospects for large-scale Cherenkov detectors that operate in deep-underwater- and under-ice environments (Lake Baikal, Mediterranean sea, Antarctica) and which have, in the last decades, become the primary tool for measuring high energy neutrino fluxes.

Keywords: Cherenkov radiation, neutrino telescopes, neutrino astrophysics

PACS numbers: 29.40.Ka, 41.60.Bq, 95.55.Vj

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505j.0531

Bibliography — 18 references

Received 16 March 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (5) 531–539 (2015)

Physics–Uspekhi **58** (5) (2015)