

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Б.М. ПОНТЕКОРВО

Нейтринная астрономия высоких энергий: проблеск земли обетованной

К. Шпиринг

В 2012 году физики и астрономы отмечали столетие со дня открытия космических лучей Виктором Гессом. Годом позднее, в 2013 г., было получено первое указание на существование внеземных нейтрино высоких энергий — сигнал, который может содержать ключевую информацию о происхождении космических лучей. Это указание было получено в результате анализа данных нейтринного телескопа IceCube, расположенного на Южном полюсе. Идея строительства такого детектора впервые обсуждалась на Международной конференции по космическим лучам в 1973 г. В то время никто не мог даже предположить, что путь к первым открытиям займёт сорок лет — столько же, сколько, согласно Библии, длился исход евреев из Египта в Палестину. И наконец, 2013 год позволил нам впервые мельком узреть землю обетованную мира нейтрино высоких энергий. Даётся общее описание развития детекторных технологий и создания детекторов с реальными возможностями совершения открытий. Представлены недавние результаты, полученные в этой области с помощью нейтринных телескопов IceCube и ANTARES, а также делается попытка заглянуть в будущее.

PACS numbers: 13.15.+g, 95.55.Vj, 98.70.Vc

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201405e.0510

Содержание

1. Введение (510).
2. Идея (511).
3. Детектор DUMAND — начало пути в неизведанное (511).
4. Долгая дорога от телескопа HT-200 до обсерватории IceCube (512).
 - 4.1. HT-200 на озере Байкал.
 - 4.2. Детектор AMANDA.
 - 4.3. Средиземноморские проекты NESTOR, ANTARES и NEMO.
 - 4.4. Детектор IceCube.
5. Результаты (514).
 - 5.1. Атмосферные нейтрино.
 - 5.2. Непрерывные локальные источники.
 - 5.3. Переменные источники.
 - 5.4. Диффузные потоки — шаг к земле обетованной?
6. Будущее (520).
7. Заключение (522).

Список литературы (522).

1. Введение

В 2012 г. отмечалось 100 лет со дня открытия космических лучей Виктором Гессом. Как сейчас известно, космические лучи состоят преимущественно из протонов и ядер тяжёлых элементов, а содержание электронов

в космических лучах находится на уровне одного процента. Космические лучи несут электрический заряд, поэтому на пути к Земле они отклоняются космическими магнитными полями. Точное определение направления — что лежит в основе астрономии — возможно лишь для электрически нейтральных, стабильных частиц, таких как электромагнитные волны (т.е. гамма-лучи при рассматриваемых энергиях) и нейтрино. Нейтрино высоких энергий, более 1 ГэВ, должны испускаться как побочный продукт при столкновениях космических лучей с веществом. На самом деле, только нейтрино дают неоспоримые доказательства ускорения адронов, поскольку гамма-лучи могут также возникать в результате обратного комптоновского рассеяния ускоренных электронов и иных электромагнитных процессов. Более того, нейтрино способны вырваться из более плотной окружающей среды по сравнению с той средой, из которой способен излучаться свет, и, таким образом, могут указывать на протекание процессов, недоступных для наблюдения средствами традиционной астрономии и гамма-астрономии. Однако регистрация нейтрино из-за их крайне малых сечений реакций является чрезвычайно сложной задачей, требующей огромных детекторов.

В настоящей статье прослеживается эволюция детекторов вплоть до создания установки IceCube — первого детектора, предоставляющего реальные возможности для совершения открытий; кратко излагаются последние результаты, полученные в этой области с помощью нейтринных телескопов, а также предпринимается по-

К. Шпиринг. Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY),
Platanenallee 6, 15738 Zeuthen, Germany
E-mail: christian.spiering@desy.de

Статья поступила 28 февраля 2014 г.

пытались заглянуть в будущее. Обзор данного направления можно найти в недавних работах [1–3], а история вопроса описана в работе [4].

2. Идея

Идея нейтринной астрономии за пределами Солнечной системы изначально опиралась на два положения. Во-первых, предполагалось, что взрыв сверхновой в нашей Галактике будет сопровождаться огромным выбросом нейтрин с энергией в области 5–50 МэВ. Во-вторых, ожидалось, что быстро врачающиеся пульсары должны ускорять заряженные частицы своими терагауссовыми магнитными полями. В результате столкновения этих частиц с веществом или радиационными полями непосредственно в источнике либо на пути к Земле должны рождаться пионы, распад которых приводит к появлению нейтрин.

Сегодня для взаимодействий с фотонным газом мы пишем

$$\begin{aligned} p + \gamma &\rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n, \\ \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \nu_\mu. \end{aligned} \quad (1)$$

Соотношение нейтрин с разными ароматами, возникающих в источнике, $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$. Когда нейтрин достигают Земли, это соотношение преобразуется в $1 : 1 : 1$ вследствие осцилляций нейтрин.

Поскольку эта статья написана на основе доклада по случаю 100-летия со дня рождения Бруно Понтекорво, следует напомнить, что реакции (1) отражают его концепцию рождения второго (мюонного) нейтрин в распаде пиона [5], а изменение соотношения нейтрин с разными ароматами с $1 : 2 : 0$ на $1 : 1 : 1$ отсылает нас к его идеи осцилляций нейтрин [6, 7]. Действительно, многое из того, что делается сейчас в нейтринной астрономии высоких энергий, уходит корнями в некоторые из фундаментальных пророческих идей Б. Понтекорво.

О подземной или подводной регистрации космических нейтрин высоких энергий впервые заговорили в конце 1950-х годов. В 1960 г. Кеннет Грейзен и Фредерик Райнес обсудили мотивировку создания и перспективы использования таких детекторов [8, 9]. В том же году на очередной Рочестерской конференции М.А. Марков выступил с революционной идеей: "устанавливать детекторы глубоко под водой в озере или в море и определять направление заряженных частиц с помощью черенковского излучения" [10]. Это оказалось единственной возможностью для создания детекторов с объёмом на уровне 10^4 т.

3. Детектор DUMAND — начало пути в неизведанное

Работы по созданию подводных нейтринных телескопов по-настоящему начались 40 лет назад на Международной конференции по космическим лучам 1973 года. Там небольшая группа учёных из США, Японии и СССР впервые обсудила строительство подобной установки — глубоководного детектора мюонов и нейтрин (Deep Underwater Muon and Neutrino Detector — DUMAND). В первоначальной конструкции детектора (1978 г.) предусматривалось установить систему из 20000 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) в объёме 1,26 км³ (рис. 1а). Фотоумножители должны были регистрировать время прихода и амплитуду черенковского излучения, испускаемого мюонами или каскадами частиц. Размер систем ФЭУ определялся исходя из "относительно скучной информации об ожидаемых интенсивностях нейтрин и с трудом поддавался подробному обоснованию; по общему убеждению, поскольку сечение нейтрин мало, а нейтрин высоких энергий достаточно редки, то предпочтительнее будет иметь большой детектор" [11].

В 1960-е годы не было опубликовано никаких предсказаний или серьёзных оценок относительно величины потоков нейтрин от космических ускорителей. Факти-

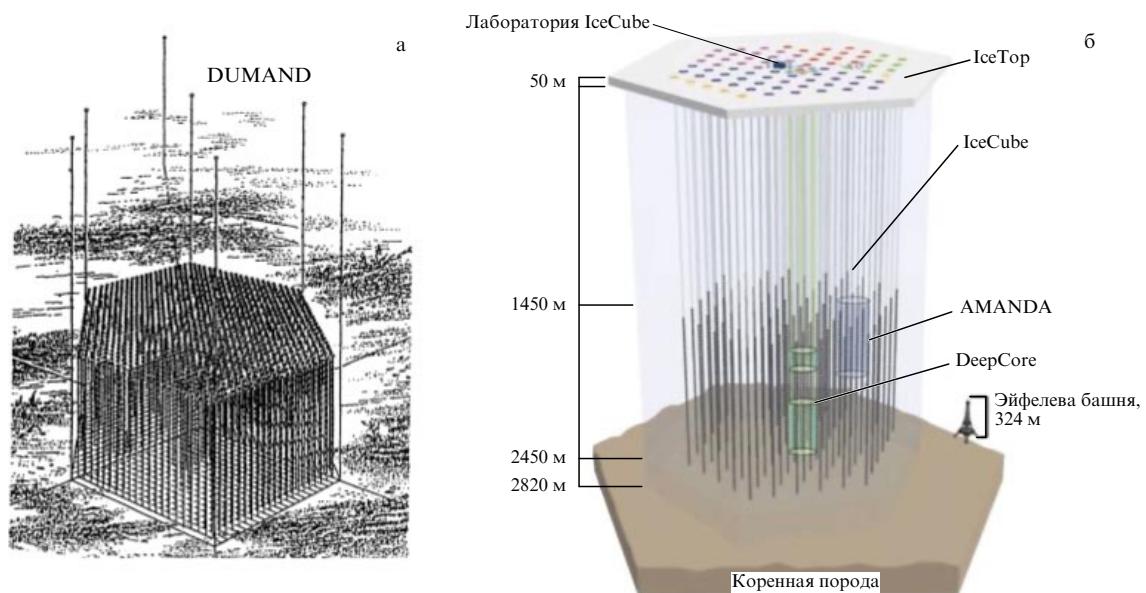


Рис. 1. Кубокилометровый детектор — от мечты к реальности. (а) Конструкция детектора DUMAND (объём 1,26 км³) по замыслу 1978 г. (б) Нейтринная обсерватория IceCube объёмом 1 км³, комплектование которой закончено в 2010 г.

чески многие объекты, которые сегодня считаются наиболее вероятными источниками нейтрино (квазары, пульсары, двойные рентгеновские звёзды, вспышки гамма-излучения), были открыты лишь в 1960-е–1970-е годы. Положение изменилось в 1970-е годы, когда было установлено, что эти объекты вполне могут испускать нейтрино, хотя предсказания о величине их потоков оставались крайне неопределёнными.

Главными темами первых обсуждений проекта DUMAND на Рабочем совещании по DUMAND [12], состоявшемся в 1978 г., были двойные системы нейтронных звёзд как точечные источники нейтрино высоких энергий (в частности, Лебедь X-3), нейтринные сигналы от явных источников гамма-излучения в ТэВ-диапазоне (ни один из них не был значимым в то время!) и диффузные потоки.

В 1980-е годы было опубликовано большое число работ по ожидаемым потокам нейтрино. Было обнаружено, что величина потока сильно зависит от таких факторов, как: а) энергетический спектр источников гамма-излучения, о котором можно было только строить предположения, поскольку первое бесспорное наблюдение гамма-излучения в ТэВ-диапазоне из Крабовидной Туманности имело место в 1989 г. [13], и б) предполагаемое отношение v/γ , зависящее от толщины вещества вокруг источника, величина которой неизвестна.

Ввиду реальных океанографических и финансовых возможностей размеры установки DUMAND постепенно уменьшались. Окончательный вариант (DUMAND-II) включал в себя 216 ФЭУ, и его предполагалось установить вблизи Гавайев на глубине 4,8 км. Потребовалось три десятилетия для того, чтобы пройти путь от проекта DUMAND (1978 г.) до полного завершения строительства на Южном полюсе кубокилометрового детектора (рис. 1б) — нейтринной обсерватории IceCube!

Разница между пессимистическими и оптимистическими оценками числа регистрируемых событий в предложении по проекту DUMAND [14] в 1988 г. составила 2–4 порядка, что оставляло открытым вопрос о том, способен ли детектор DUMAND-II обнаружить источники нейтрино или это возможно лишь для будущей установки с объёмом в 1 км³. В 1990 г. В.С. Березинский оценил размеры установки, необходимые для обнаружения внегалактических источников, и получил величину площади 0,1–1,0 км² [15]. Детектор DUMAND-II, площадь которого составляла 25000 м², явно не дотягивал до этих значений.

В 1987 году коллаборация DUMAND провела на корабле испытания экспериментальной гирлянды детектора и в течение нескольких часов измеряла интенсивность мюонов в зависимости от глубины [16]. Годом позднее было внесено предложение по проекту DUMAND-II, а спустя ещё шесть лет была развернута первая полномасштабная гирлянда. Однако связь гирлянды с берегом установить не удалось из-за протечек. Гирлянду извлекли из воды, проанализировали её состояние и подготовили к повторной установке. Но, несмотря на замечательные для того времени успехи океанских технологий, несклонность к риску финансирующих организаций привела к закрытию проекта DUMAND в 1995 г.

С того времени исследования, заложившие основу нейтринной астрономии высоких энергий, стали вестись на Южном полюсе, в Средиземном море и на озере Байкал.

4. Долгая дорога от телескопа HT-200 до обсерватории IceCube

4.1. HT-200 на озере Байкал

В 1980 г. А.Е. Чудаков предложил использовать глубоководное озеро Байкал в качестве рабочей площадки для "русского DUMAND". В разгар зимы озеро покрыто толстым слоем льда, что делает возможным установку оборудования без использования судов. Первые мелководные эксперименты с небольшими ФЭУ начались в 1981 г., а вскоре было определено и оптимальное место для расположения детектора в южной части Байкала на расстоянии 3,6 км от берега и глубине около 1370 м. В 1984 и 1986 гг. были установлены первые стационарные гирлянды, регистрировавшие движущиеся вниз мюоны [17].

В 1989 г. был развернут предварительный вариант нейтринного телескопа (позднее получившего название "проект HT-200"), представляющего собой систему из 192 модулей на восьми гирляндах [18]. Объём телескопа HT-200 был всего в два раза больше объёма детектора Super-Kamiokande (или около 10⁻⁴ км³), но возможность обнаруживать яркие сигналы за пределами геометрического объёма делала HT-200 более чувствительным к некоторым высокогенергетическим процессам.

Телескоп HT-200 начинался с развертывания в 1993 г. системы из трёх гирлянд [19] с 36 оптическими модулями (ОМ). Из данных, набранных в 1994 г., были выделены первые два мюона, движущиеся вверх, т.е. кандидаты в нейтрино. В 1996 г. была запущена система из четырёх гирлянд с 96 оптическими модулями [20], которая зарегистрировала первые отчётливые события. Одно из таких событий показано на рис. 2.

Строительство HT-200 было закончено в апреле 1998 г., и с тех пор он работает, набирая данные.

4.2. Детектор AMANDA

В 1988 г. Френсис Хальзен и Джон Лернд опубликовали работу "Регистрация нейтрино высоких энергий в глубине полярных льдов" [21]. Эта впечатляющая идея стала отправной точкой для проекта AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detection Array — Антарктический комплекс детекторов мюонов и нейтрино). Скважины во льде для размещения ФЭУ предполагалось бурить с помощью горячей воды под давлением. В 1993–1994 гг. после испытаний на Южном полюсе и в Гренландии была установлена на Южном полюсе первая система из 80 ФЭУ на четырёх гирляндах, правда, на весьма небольшой глубине, где лёд содержит много воздушных пузырей [22]. В 1995–1996 гг. вторая система из четырёх гирлянд была установлена на глубине 1500–2000 м, где пузырей во льде уже нет. Потребовалось некоторое время, чтобы убедиться в достаточном качестве льда для проведения процедуры восстановления, но в 1996 г. детектор AMANDA тоже зарегистрировал первые отчётливые события с движущимся вверх мюоном из нейтринных взаимодействий [23]. До января 2000 г. система несколько раз модернизировалась и в итоге включила в себя 19 гирлянд с 677 ФЭУ.

Детектор AMANDA был остановлен в апреле 2009 г. после девяти лет набора данных в своей полной конфигурации. За это время было зарегистрировано 6595 атмосферных нейтрино и установлено несколько важных

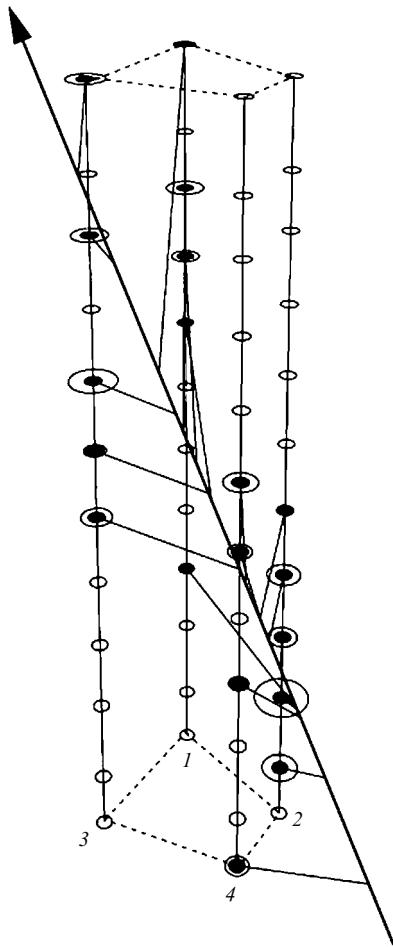


Рис. 2. Один из первых движущихся вверх мюонов, образовавшихся в нейтринном взаимодействии, который был зарегистрирован четырёхгирляндовым Байкальским детектором в 1996 году [20]. Черенковское излучение от мюона было зарегистрировано в 19 каналах.

верхних пределов, но так и не было получено ни одного чёткого указания на какой-либо сигнал от внеземного нейтрино. Правда, один краткий миг надежды всё-таки был. В 2005 г. при анализе данных, полученных в 2000–2003 гг., были обнаружены пять событий с нейтрино,

пришедшиими со стороны активной галактики 1ES1959 + 650. Любопытно, что три из них пришли в течение 66 сут в 2002 г. [24]. Обнаружение двух из этих трёх нейтрино совпадало по времени в пределах суток со вспышками гамма-излучения, зарегистрированными гамма-телескопами HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy) и Whipple (рис. 3). Более того, одна из этих двух вспышек не сопровождалась рентгеновской вспышкой, представляя собой "осиротелую" вспышку ("orphan" flare), что характерно для адронной вспышки, в которой поток рентгеновского излучения, сопровождающий электронные вспышки, отсутствует. Этот результат вызвал немедленное появление двух теоретических работ: в одной из них утверждалось, что соответствующий нейтринный поток не удовлетворяет ни одному разумному предположению относительно энергетических характеристик источника [25], а в другой — что сценарии, приводящие к таким потокам, вполне реальны [26]. Такое любопытное совпадение по времени регистрации гамма-излучения и нейтрино привело к мысли посыпать на гамма-телескопы предупредительные сигналы в случае появления сгруппированных во времени нейтринных событий с определённого направления. Такие программы оповещения уже работают между обсерваторией IceCube и гамма-телескопами MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope) (Ла-Пальма) и VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) (Аризона).

4.3. Средиземноморские проекты NESTOR, ANTARES и NEMO

Изучение Средиземного моря как возможного места установки подводного нейтринного телескопа началось в 1989 г., когда советские физики на научно-исследовательском судне измерили скорость счёта мюонов в зависимости от глубины [27]. В июле 1991 г. греко-российская коллаборация установила гексагональное устройство на глубине 4100 м неподалеку от города Пилоса на побережье Пелопоннеса. Так началось осуществление проекта NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research). Предполагалось, что установка NESTOR будет состоять из семи башен по 12 шестиугольных этажей каждая, которые расположены

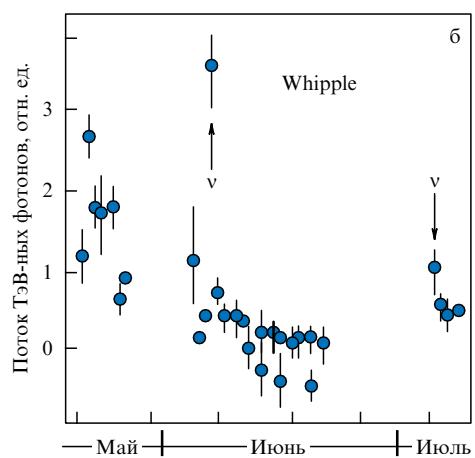
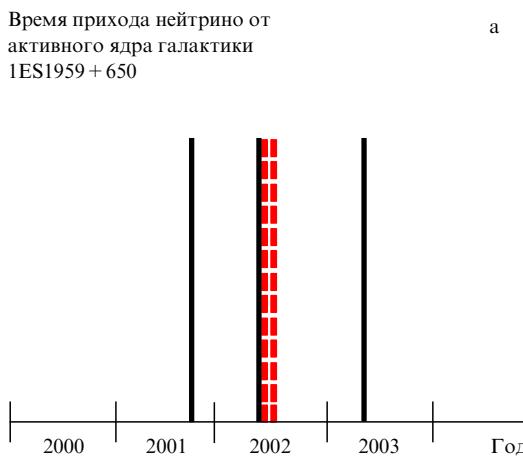


Рис. 3. "Любопытное" совпадение нейтринных событий от активного ядра галактики (а) со вспышками гамма-излучения от того же источника (б). Второе и третье из трёх событий, зарегистрированных в 2002 г. (указаны штриховыми линиями), совпадают в пределах суток с максимумами, обнаруженными с помощью телескопа Whipple.

в пределах объёма 0,1 км³. В 2004 г. был установлен и запущен прототип установки, который проработал около месяца [28]. Причиной прекращения его работы стал выход из строя кабеля, связывавшего установку с берегом. Собранные прототипом данные показали хорошую работоспособность детектора и позволили измерить поток атмосферных нейтрино [29].

Вторым средиземноморским проектом явился ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental Research). Его начало относится к середине 1990-х годов, полный проект был представлен [30] в 1999 г. Телескоп ANTARES состоит из 12 гирлянд, каждая из которых несёт 25 триплетов ФЭУ. При геометрическом объёме 0,01 км³ он имеет примерно такие же размеры, как и AMANDA. Детектор ANTARES, который был построен в период с 2002 г. по 2008 г., убедительно доказал, что детектор с точным угловым разрешением способен надёжно работать на больших морских глубинах [31].

Последним из средиземноморских проектов является NEMO (NEutrino Mediterranean Observatory) [32], который был запущен в 1998 г. с целью изучения возможности строительства детектора объёмом в 1 км³, разработки соответствующих технологий и определения подходящего места. Этот детектор расположен на глубине 3,5 км примерно в 100 км от юго-восточного побережья Сицилии. Там развернуты несколько прототипов башен ("верёвочные лестницы" с поперечинами, несущими на каждом конце по фотоумножителю), которые регистрируют движущиеся вверх мюоны [33]. В настоящее время построено восемь башен, которые планируется установить к началу 2016 г. Позднее все башни будут объединены в будущий большой средиземноморский детектор KM3NeT (Cubic Kilometer Neutrino Telescope) (см. раздел 6).

4.4. Детектор IceCube

Детектор IceCube [34, 35] состоит из 5160 цифровых оптических модулей (ЦОМ), закреплённых на 86 гирляндах на глубине от 1450 до 2450 м. На одной гирлянде располагаются 60 ЦОМ, представляющих собой стеклянные сферы, в которые заключены 10-дюймовые ФЭУ. В ЦОМ сигналы оцифровываются и передаются по медному кабелю на поверхность. Ещё 320 ЦОМ установлены в системе детекторных станций IceTop на поверхности льда непосредственно над гирляндами (рис. 1б). Детектор AMANDA, использовавшийся вначале как низкоэнергетический субдетектор комплекса IceCube, в 2009 г. был выведен из эксплуатации и заменён высокоплотной подсистемой DeepCore, состоящей из восьми гирлянд, расположенных на больших глубинах (в самом чистом слое льда) в центральной части комплекса IceCube. Благодаря более компактному размещению, лучшему качеству льда и более высокой квантовой эффективности новых ФЭУ эффективность сбора фотонов системы DeepCore в шесть раз превышает эффективность всего комплекса IceCube. В сочетании с вето-системой IceCube это обеспечивает порог в 10 ГэВ и открывает новые возможности для физики осцилляций нейтрино и косвенного поиска тёмной материи.

Первая одиночная гирлянда IceCube была установлена в январе 2005 г., через шесть лет после подачи первого предложения в Национальный научный фонд (NSF) [36]. В последующие сезоны дополнительно были установлены

ны соответственно 8, 13, 18, 19, 20 и 7 гирлянд. Последняя из 86 гирлянд была установлена 18 декабря 2010 г.

Мечта о кубокилометровом детекторе наконец стала реальностью!

5. Результаты

Большие нейтринные телескопы для размещения под водой и в толще льда никогда бы не были созданы, если бы не было, прежде всего, стремления обнаружить и исследовать космические ускорители. На самом деле это многощелевые установки с впечатляюще длинным списком возможностей. Эти установки используются для поиска сигнатур частиц тёмной материи и других экзотических форм материи, таких как, например, магнитные монополи. Они позволяют изучать осцилляции нейтрино и другие вопросы физики частиц, например сечения взаимодействий нейтрино и рождения тяжёлых частиц при высоких энергиях. Кроме того, детектор IceCube обладает чувствительностью к одному явлению с энергией много ниже номинального энергетического порога таких детекторов — к МэВ-ным нейтрино от взрыва сверхновой. Такие нейтрино испускаются в импульсе длительностью ≈ 10 с и приводят к небольшому увеличению скорости счёта на всех ФЭУ. Последнее по списку, но не по значимости — это возможность изучать заряженные космические лучи либо с использованием движущихся вниз мюонов, проникающих из атмосферных ливней, либо, как в случае детектора IceCube, с помощью наземной решётки детекторов атмосферных ливней (IceTop).

Ниже речь пойдёт главным образом о поисках внеземных нейтрино высоких энергий и изучении нейтринных осцилляций с использованием атмосферных нейтрино. За прошедшие два года именно на этих передовых рубежах были достигнуты замечательные успехи. Самые последние результаты получены на детекторах IceCube [37] и ANTARES [38], а на НТ-200 ранее были установлены важные ограничения на диффузные потоки внеземных нейтрино и потоки магнитных монополей [39, 40].

5.1. Атмосферные нейтрино

Атмосферные нейтрино и мюоны возникают в результате взаимодействий в атмосфере с участием космических лучей. При энергиях до 100 ТэВ в этих потоках доминируют нейтрино из распадов пионов и каонов. Соответствующие нейтрино называются "обычными" атмосферными нейтрино. Форма их спектра определяется законом $E^{-3.7}$. При более высоких энергиях начинают преобладать "прямые" атмосферные нейтрино, возникающие при распаде частиц, содержащих с- или b-кварки. Эти частицы распадаются, не успев принять участие в дальнейших взаимодействиях, поэтому спектр возникающих при их распаде нейтрино близок по форме степенному спектру первичных космических лучей, изменяющемуся по закону $E^{-2.7}$.

На рисунке 4 приведены спектры, полученные в разных экспериментах. Экспериментальные точки доходят до области энергий 200 ТэВ (ANTARES [41]) и 400 ТэВ (IceCube-40¹ [42]) и (до сих пор!) вполне согласуются с

¹ IceCube-40 — конфигурация детектора IceCube с 40 установленными гирляндами.

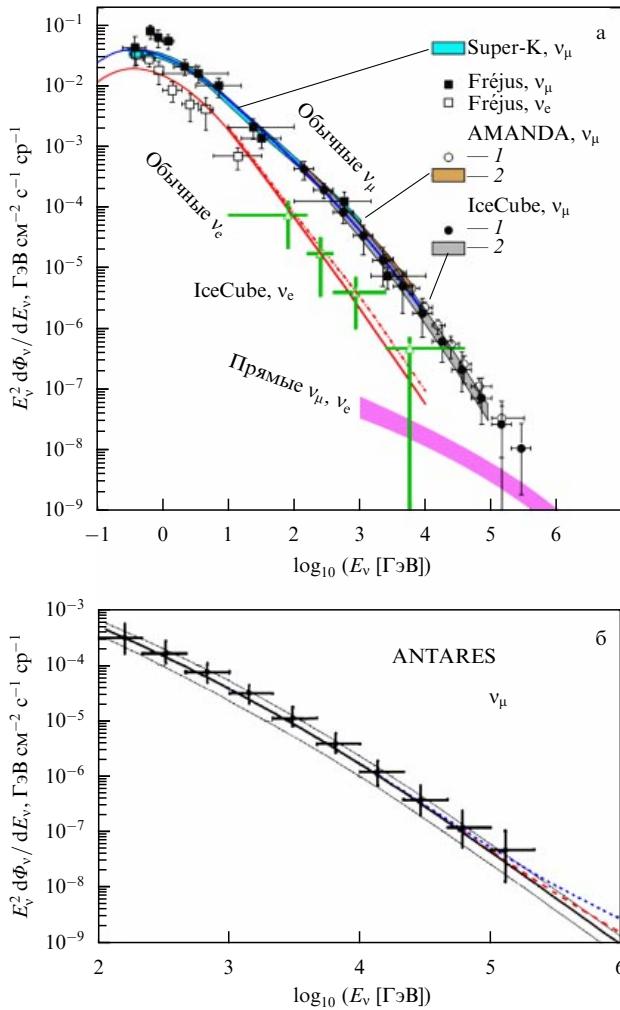


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Энергетический спектр атмосферных нейтрино, измеренный в разных экспериментах. (а) Данные IceCube-40, полученные для мюонных и электронных нейтрино, хорошо согласуются с расчётами для обычных атмосферных нейтрино [42]. 1 и 2 — данные, полученные с учётом разных вариантов поправок на детекторные эффекты и вычисление энергии нейтрино из энергии зарегистрированных мюонов. (б) Спектр мюонных нейтрино, измеренный детектором ANTARES.

предсказаниями для обычных атмосферных нейтрино. В частности, никакого значительного превышения при высоких энергиях до сих пор не наблюдалось. Увеличение статистики, набранной на детекторе IceCube (в конфигурациях с 79 и 86 гирляндами), вскоре позволит проверить модели потоков для прямых нейтрино или получить указания на наличие внеземных нейтрино. Они могут проявиться в виде плеча при энергии примерно 100 ТэВ.

Данные экспериментальные точки относятся к мюонным и электронным нейтрино. Спектр мюонных нейтрино извлекается из измеренной величины dE/dx для зарегистрированных мюонов с учётом того, что: а) эти мюоны потеряли энергию до того, как попали на детектор, и б) они несут только часть энергии нейтрино. Для электронных нейтрино первый из этих пунктов не играет никакой роли, поскольку электронные ливни имеют длину порядка 10 м и потому эти события регистрируются полностью. С другой стороны, вряд ли возмож-

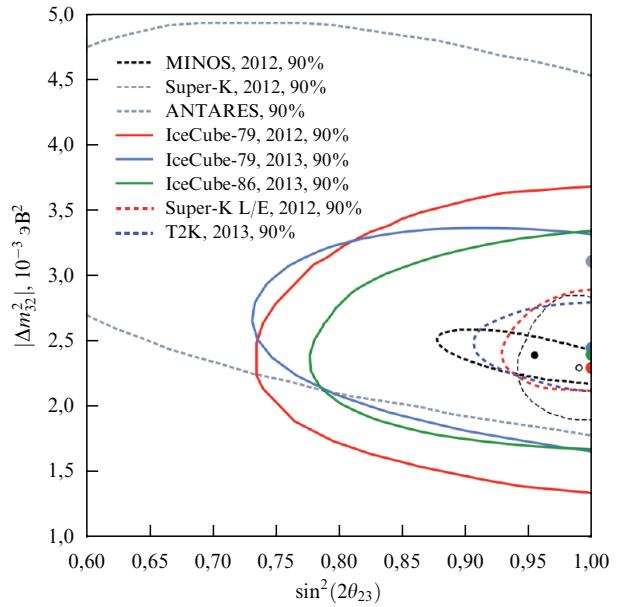


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Ограничения на область параметров осцилляций из разных экспериментов. Три независимых анализа данных IceCube основаны на трёх годовых наборах данных: два на IceCube-79 и один на IceCube-86 (сплошные линии). Ограничения по данным ANTARES (штриховая линия) слабее, а ограничения по данным MINOS, Super-K и T2K намного сильнее. (Результаты 2013 года — предварительные.) Увеличение объёма данных и улучшение методик анализа позволят значительно улучшить ограничения IceCube. (Из работы [43].)

но различить электронные каскады и адронные каскады, образующиеся в конечных состояниях большинства взаимодействий ν_τ и всех взаимодействий по каналу нейтральных токов. Таким образом, поток ν_e можно получить только с помощью сложной процедуры вычитания, ведущей к относительно большим погрешностям. В пределах этих погрешностей данные IceCube вполне согласуются с предсказаниями для обычных электронных нейтрино из атмосферы.

Атмосферные нейтрино также предоставляют хорошие возможности для изучения нейтриновых осцилляций. Длина осцилляций изменяется пропорционально E_ν . При расстояниях порядка диаметра Земли первый осцилляционный минимум находится при $E_\nu \approx 24$ ГэВ. Степень подавления потока ν_μ зависит от энергии нейтрино и зенитного угла и позволяет извлечь параметры осцилляций θ_{23} и Δm_{23}^2 . На рисунке 5 показаны ограничения на область параметров осцилляций по данным разных экспериментов, включая ANTARES и IceCube/DeepCore [43]. Ограничения по данным DeepCore находятся посередине между ограничениями ANTARES с одной стороны и ограничениями MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search), Super-K и T2K (Tokai to Kamioka) с другой стороны. Предварительные оценки показывают, что в течение нескольких лет детектор DeepCore сможет достичь такой же чувствительности, как и в трёх последних экспериментах. Однако по-настоящему перспективным является дальнейшее увеличение плотности центральной части IceCube (проект PINGU (Precision IceCube Next Generation Upgrade)) и определение иерархии масс нейтрино (см. раздел 6).

Крупный научный прорыв произошёл в 2013 г. на рубежах высоких энергий, о чём будет сказано в разделе 5.4.

С другой стороны, не менее значительным является прогресс в изучении нейтринных осцилляций. Конкуренция в этой области исследований с лучшими ускорительными экспериментами и Super-K определённо превзошла ожидания большинства экспертов, а перспектива выйти на лидирующие позиции в установлении иерархии масс нейтрино особенно впечатляет.

5.2. Непрерывные локальные источники

Космические нейтрино высоких энергий можно идентифицировать по накоплению событий, указывающему на определённое небесное направление ("локальные источники"), или по размытости диффузного излучения от нескольких градусов (как в случае ближайших остатков сверхновых) до полностью диффузного, существенно изотропного нейтринного потока.

Космические нейтрино от данного источника будут группироваться вокруг направления источника. Год от года статистика событий увеличивается, а методы анализа постоянно улучшаются благодаря, например, включению оценочных функций в процесс анализа, переходу от методов с фиксированной шириной гистограммного интервала поиска к "безинтервальным" методам и т.п. Это привело к потрясающим достижениям.

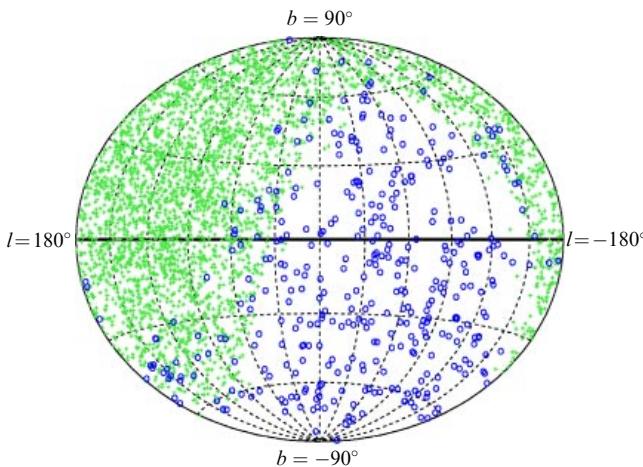


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Совместная небесная карта движущихся вверх мюонов, зарегистрированных детекторами AMANDA и HT-200 (компоновка 2005 г.).

Эволюцию во времени небесных карт в экспериментах AMANDA и IceCube хорошо иллюстрирует рис. 3 из работы [44]. Всё началось со скучных 17 событий с движущимися вверх мюонами в 1999 г. и заканчивается примерно 10^4 событиями в 2012 г. — фантастическое 1000-кратное увеличение статистики и чувствительности (см. ниже рис. 8)! На рисунке 6 показана ещё одна историческая небесная карта от 2005 г. с объединёнными данными детекторов AMANDA и HT-200 в галактических координатах.

Сегодня граница чувствительности определяется детектором ANTARES для южного неба и детектором IceCube для северного неба (у обоих лучшая чувствительность к локальным источникам, находящимся внизу, т.е. в противоположном полушарии Земли). На рисунке 7 показаны небесные карты ANTARES и IceCube в экваториальных координатах [38, 45].

Детектор ANTARES работал только с движущимися вверх мюонами и распространение его карты на северное полушарие обусловлено тем, что этот детектор не находится непосредственно на Северном полюсе и его поле обзора в течение дня охватывает разные части неба. Напротив, поле обзора детектора IceCube не меняется с вращением Земли, а доступ к южному небу осуществляется с помощью повышения энергетического порога регистрации мюонов, летящих сверху. При этом чувствительность при низких энергиях понижается, но при энергиях на уровне 1 ПэВ и выше сохраняется. На рисунке 8 показаны чувствительность и её верхние пределы, полученные в разных экспериментах. Следует отметить, что чувствительность в период между первым анализом данных детектора AMANDA (конфигурация из 10 гирлянд) и анализом четырёхлетнего набора данных на детекторе IceCube действительно повысилась в 1000 раз!

Естественно, чувствительность детектора IceCube к потоку E^{-2} из Южного полушария хуже, чем к потоку E^{-2} из Северного полушария, поскольку анализ проводится исключительно по небольшому высокознергетическому хвосту нейтринного потока. По спектрам без обрезаний однокубокилометровый детектор на Южном полюсе способен конкурировать с северным детектором первого поколения, таким как ANTARES, при углах вплоть до 45° . Это означает, что существуетши-

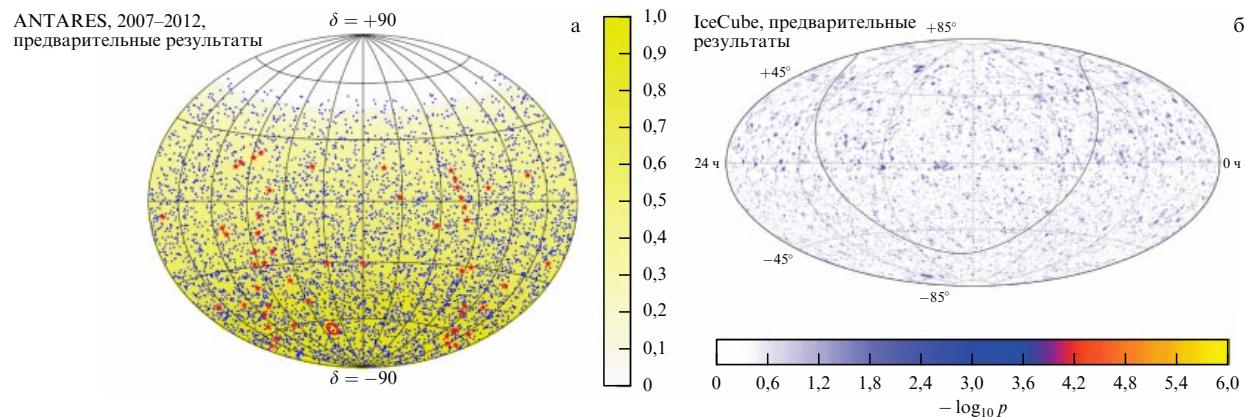


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Небесные карты детекторов (а) ANTARES (по результатам его пятилетней работы) и (б) IceCube (по результатам четырёхлетней работы в конфигурациях из 40, 59, 79 и 86 гирлянд соответственно [45]). Цветовая шкала на рис. а указывает видимость для ANTARES, а цветовая шкала на рис. б — статистическую значимость превышений.

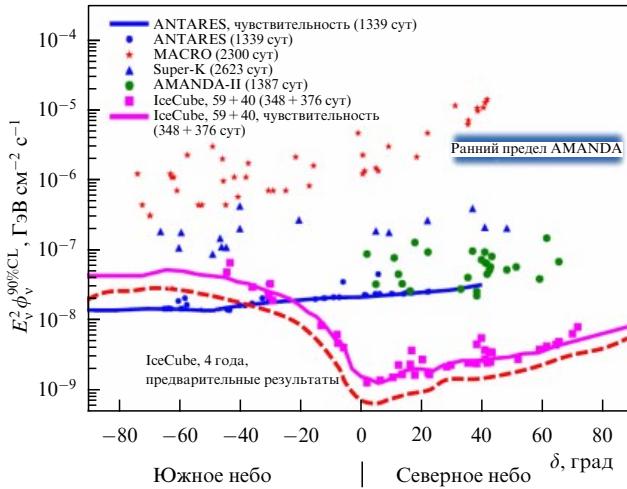


Рис. 8. (В цвете онлайн.) Чувствительность к потоку нейтрино от локального источника (ожидаемые медианные пределы на уровне достоверности 90 %) и верхние пределы для отдельных источников из разных экспериментов: Super-Kamiokande, AMANDA, различные этапы IceCube и ANTARES (см. ссылки в работе [2]).

рокая область углов, в которой детекторы IceCube и ANTARES совместно дадут более высокую чувствительность, чем каждый из них по отдельности. Такие комбинированные анализы данных уже проводятся.

Оптимистические предсказания по потокам от некоторых источников дают величины в 3–10 раз ниже нынешних пределов IceCube. Это не исключает возможности открытия при стандартном анализе локальных источников в ТэВ-ной области, но успех не гарантирован.

5.3. Переменные источники

Известно, что многие астрофизические источники дают переменный поток с различными длинами волн. Примерами таких неровно излучающих источников являются активные ядра галактик и гамма-всплески. У систем двойных звёзд часто обнаруживается периодическое поведение, как в случае с пульсарами. Уменьшение поискового окна до размеров временного интервала вспышек или всплесков уменьшает фон атмосферных нейтрино.

В этой статье я привожу результаты по гамма-всплескам длительностью от нескольких долей секунды до нескольких сотен секунд. Сегодня мы знаем, что гамма-всплески имеют внегалактическое происхождение и предположительно являются доминирующими источниками космических лучей самых высоких энергий [46]. В модели "огненного шара" (fireball model) гамма-всплесков ускорение космических лучей должно сопровождаться рождением нейтрино в распадах заряженных пионов, возникающих в результате взаимодействия высокоэнергетических протонов космических лучей с гамма-излучением [46, 47]. Как IceCube, так и ANTARES вели поиск совпадений нейтрино и гамма-всплесков. В работе [48] не установлено совпадений событий, зарегистрированных детектором IceCube, с каким-либо из 215 гамма-всплесков при ожидаемых в соответствии с работой [47] 5,2 совпадениях (рис. 9). Верхний предел на уровне достоверности 90 % был в 3,7 раза ниже величин потоков, предсказываемых моделями "огненного шара". Однако вскоре было показано, что предсказания оказа-

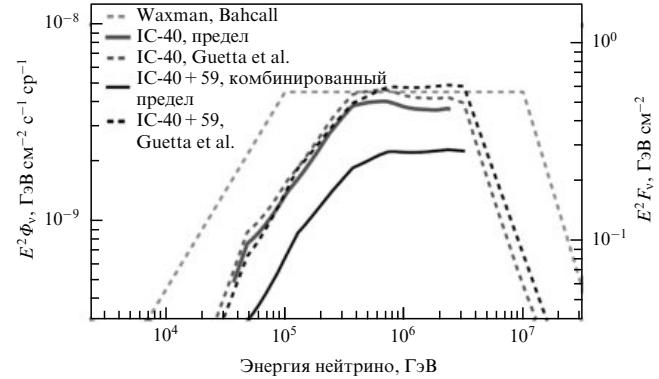


Рис. 9. Результаты IceCube в сравнении с предсказаниями, нормированными на обнаруженные гамма-спектры (Guetta et al. [47]) и на спектр космических лучей высоких энергий (Waxmann, Bahcall [46]). (Из работы [48].)

лись чересчур оптимистичными по ряду аспектов [49]. После пересчётов предсказанные величины потоков вновь опустились ниже опубликованных пределов IceCube. Однако с тех пор уже были проанализированы данные по ≈ 300 дополнительным гамма-всплескам и соответствующая чувствительность находится на том же уровне, что и пересмотренные предсказания. Это вызывает серьёзные сомнения относительно гипотезы о том, что гамма-всплески являются преобладающим источником космических лучей.

Коллаборация ANTARES представила результаты аналогичного поиска по 296 гамма-всплескам [50] в 2007–2011 гг. Не было обнаружено ни одного совпадения. Предел для потоков, усреднённый по всем 296 гамма-всплескам, здесь, естественно, много хуже, чем предел IceCube, площадь которого в 30 раз больше. С другой стороны, нельзя исключать открытия особенно близкого гамма-всплеска с оптимальной ориентацией струи в сторону Земли и низким лоренц-фактором струйного вещества, находящегося вне пределов поля обзора детектора IceCube, что делает важным продолжение поисков на ANTARES.

5.4. Диффузные потоки — шаг к земле обетованной?

В работе [51] было показано, что первые указания на астрофизические нейтрино высоких энергий ожидается получить из диффузного изотропного потока при условии, что вероятные источники являются преимущественно внегалактическими и над ними не доминирует несколько галактических источников. Это следствие того, что нейтрино распространяются по Вселенной с незначительным поглощением, в результате чего возникает сплошной поток от всех слабых и удалённых внегалактических источников.

В качестве первичного критерия для различия космических и атмосферных нейтрино при поиске диффузных потоков используется измеренная энергия. Определённо отличить одно от другого можно также по:

- 1) отношению между числом каскадных событий и числом мюонных событий (которое соотносится с отношением ароматов);
- 2) угловому распределению;
- 3) отсутствию сигналов от сопровождающих проникающих мюонов из образующего их атмосферного ливня, если нейтрино приходят сверху.

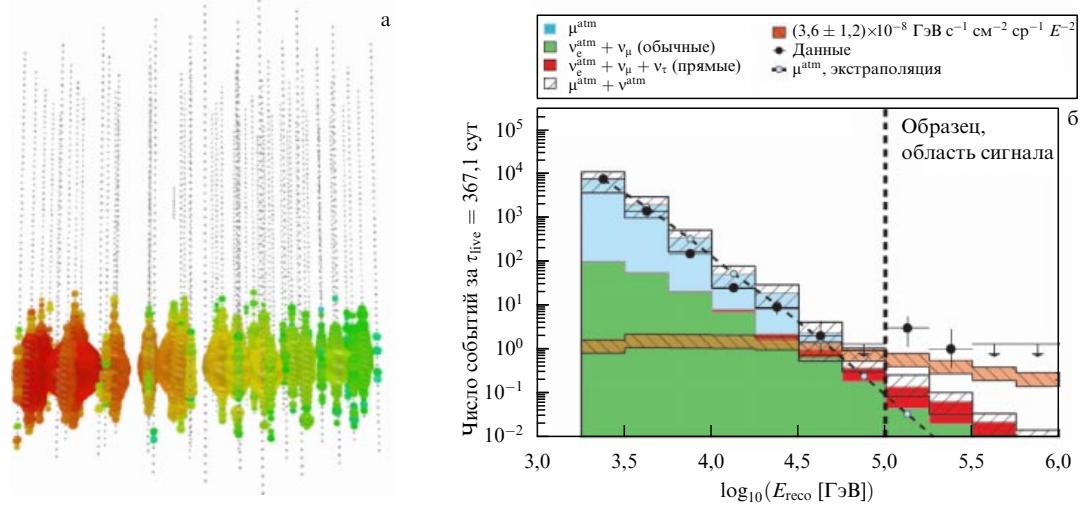


Рис. 10. (В цвете онлайн.) (а) Событие от нейтрино с наибольшей энергией из анализа данных IceCube-59 — мюон попадает в детектор с энергией около 400 ТэВ, соответствующей наиболее вероятной энергии нейтрино в диапазоне 500 ТэВ–1 ПэВ [55]. (б) Восстановленное энергетическое распределение каскадов, зарегистрированных детектором IC-40 [56]. Белая заштрихованная область показывает распределение атмосферных нейтрино и мюонов с систематическими и статистическими неопределённостями. Оранжевая полоса — оценка для внеземных нейтрино, полученная из анализа данных, описываемых ниже. Две высшие точки полученных данных соответствуют четырём нейтринным событиям (включая одно из ограниченной выборки, которая не была использована для расчёта статистической значимости).

Отношение ароматов и угловое распределение несколько различны. Наиболее важным критерием является энергия, поэтому диффузный анализ серьёзно зависит от хорошего понимания зависимости отклика детектора от энергии и от надёжности предсказания фона, особенно фона от прямых атмосферных нейтрино [52]. Последние доминируют в высокоэнергетическом хвосте атмосферных нейтрино, и их поток характеризуется существенно большими неопределённостями, чем поток обычных атмосферных нейтрино.

В работе [53] показано, что каскадная топология обладает самой высокой чувствительностью для регистрации и определения характеристик высокоэнергетических превышений. Сочетание всех признаков (каскады, движущиеся вниз мюоны, движущиеся вверх мюоны) даёт отличную возможность обнаружения космического диффузного нейтринного потока и его выделения на фоне прямых атмосферных нейтрино, что впечатляюще продемонстрировали результаты анализа данных IceCube.

Первый кандидат в космические нейтрино был найден в 2012 г. из анализа данных IceCube-59 по изучению энергетических потерь в детекторе примерно 22000 движущихся вверх мюонов, порождённых нейтрино [54]. На рисунке 10а показано событие от мюона, пришедшего из-под горизонта под углом 1,2°. Мюон попадает в детектор, имея энергию около 400 ТэВ, в то время как наиболее вероятная энергия родительского нейтрино 0,5–1 ПэВ. Превышение по отношению к атмосферным обычным и прямым нейтрино создаётся этим и ещё одним, менее энергичным, мюоном и имеет весьма невысокую статистическую значимость, $1,8\sigma$. Переводя это в верхний предел потока, получим $E^2 \Phi < 1,4 \times 10^{-8} \text{ ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ для спектра E^2 , или в 3,8 раза большие величины, предсказанной для прямых нейтрино в расчётах в работе [57]. Окончательный результат был опубликован лишь совсем недавно [55] из-за сложностей в определении фона.

В анализе 2011 г. внимание было сосредоточено на каскадах, зарегистрированных детектором IceCube-40.

Эти каскады выделяют всю свою энергию в объёме детектора, что даёт намного более чёткую корреляцию с энергией нейтрино, чем в случае мюонов. Полученный в этом анализе сигнал был совместим с высоким уровнем фона, оставшимся после отбора. Однако повторный анализ с оптимизированными условиями смог значительно уменьшить фон без потери четырёх наиболее высокоэнергетических (140–220 ТэВ) событий, обнаруженных при первом анализе [56]. Энергетическое распределение выборки показано на рис. 10б. Превышение имеет статистическую значимость $2,7\sigma$ при фоне $0,25$ события от атмосферных мюонов и нейтрино. И снова сложности в определении фона, потребовавшего большого объёма вычислений по методу Монте-Карло, значительно задержали публикацию окончательных результатов. Недавний аналогичный анализ данных IceCube-59 дал почти пренебрежимо малое превышение и очень небольшую добавку к статистической значимости [58].

Заметным шагом в направлении ПэВ-масштаба стало обнаружение двух событий при поиске нейтрино сверхвысоких энергий [59], как ожидалось, например, из взаимодействия Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) протонов высоких энергий с полем реликтовых фотонов [60]. Реальный энергетический порог отбора событий составлял ≈ 500 ТэВ. Данные для поиска собирались в 2010 и 2011 гг. на детекторе в конфигурациях с 79 и 86 гирляндами. Два события каскадов, порождённых нейтрино, прошли все отборы, их восстановленные энергии составили 1,04 и 1,14 ПэВ, и они были названы Ernie и Bert (рис. 11). Эти два события представляют собой пока ещё скромное превышение со статистической значимостью $2,8\sigma$ над ожидаемым для атмосферных нейтрино. Однако Ernie и Bert уже только благодаря своей энергии стали более перспективными кандидатами в космические нейтрино, чем что-либо обнаруженное прежде. Энергия этих событий была недостаточно велика, чтобы интерпретировать их как продукты ГЗК-процессов, что являлось главной причиной для проведения такого анализа. Также считается маловероятным, что они возникли

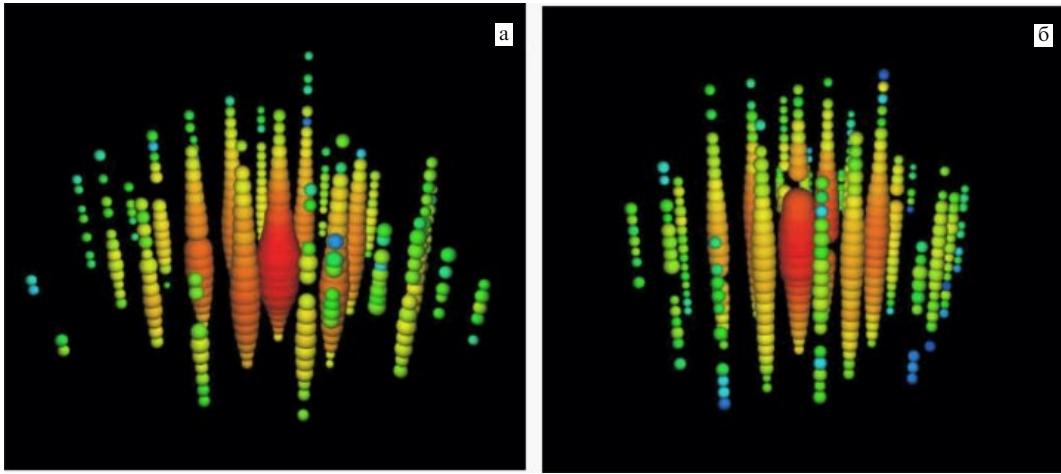


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Два события, обнаруженные (а) в августе 2011 г. (Ernie) и (б) в январе 2012 г. (Bert). Каждая сфера представляет ЦОМ. Цвета указывают время прихода фотонов (красный — раннее, синий — позднее). Размер символов соответствует числу зарегистрированных фотоэлектронов.

в результате резонанса Глэшоу, так как только порядка 10 % таких взаимодействий выделили бы в детекторе энергию 1,2 ПэВ или меньше в виде каскадов.

Этот результат стал толчком для проведения альтернативного анализа тех же данных. На событие накладывается ограничение по месту начала — внутренний объём детектора IceCube (внешняя часть используется как вето-слой) и в то же время порог значительно понижается по сравнению с таковым в первом анализе (до нескольких десятков ТэВ). Новым в этом подходе были метод определения фона атмосферных нейтрино непосредственно из данных и расчёт вероятности сопровождения движущегося вниз атмосферного нейтрино мюонами, которые приводят к отклику ЦОМ в вето-слое и тем самым исключают событие из числа кандидатов в нейтрино. Результаты этого анализа сначала были представлены на конференции 14 мая 2013 г., а затем опубликованы в [61]. Они включают в себя 28 событий с выделенной в детекторе энергией от ≈ 30 ТэВ до 1,14 ПэВ.

На рисунке 12 показано распределение выделенной энергии. События Ernie и Bert занимают верхнюю строчку по энергии. Примечательно, что события с меньшей энергией (≈ 30 ТэВ–250 ТэВ) тоже вряд ли можно объяснить одними лишь атмосферными нейтрино или нераспознанными мюонами, попадающими сверху в детектор. Вклад таких источников фона в общее число 28 событий составляет по расчётом $10,6^{+5,0}_{-3,6}$ событий, что приводит к статистической значимости $4,1\sigma$. Энергетический спектр при энергии до 1 ПэВ согласуется со спектром E^{-2} на уровне $E^2\Phi = (1,2 \pm 0,4) \times 10^{-8}$ ГэВ см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$. Отсутствие событий при энергиях выше 1 ПэВ требует либо обрезанного при энергии в несколько ПэВ спектра E^{-2} , либо более мягкого спектра, например $E^{-2,2}$.

Глобальное фитирование всех данных (стандартный анализ каскадов по данным от 40 и 59 гирлянд, анализ движущихся вверх мюонов по данным от 59 гирлянд, анализ стартовых событий по данным от 79/86 гирлянд) было проведено в работе [52]. В этом анализе учитывался вклад прямых нейтрино в качестве свободного параметра и обрезанный спектр космических нейтрино вида $E^{-2} \exp(E/E_{\text{cut}})$. Результат согласуется с результатом фитирования набора из 28 событий: $E^2\Phi = (1,0^{+0,8}_{-0,5}) \times 10^{-8}$ ГэВ см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$ для вклада космических нейтрино, E_{cut} в диапазоне 1–6 ПэВ и Φ_{prompt} в $(2,8 \pm 2,0)$ раз больше потока прямых нейтрино, рассчитанного в работе [57].

На рисунке 13 показаны направления прихода 28 событий. Не наблюдается никакого значительного группирования в какой-либо точке неба, включая интригующее скопление вблизи галактического центра.

Очень соблазнительно было попытаться объяснить эти результаты, и в 2012–2013 гг. появилось почти 50 работ на эту тему. Достаточно полный список соответствующих ссылок можно найти в работах [62, 63]. В качестве объяснений приводятся внегалактические и галактические процессы ускорения, а также распад сверхтяжёлой тёмной материи. Однако ограниченность статистики, получение величины статистической значимости только одним особым методом (посредством анализа высоконергетических стартовых событий) и недостаточное понимание того, какой собственно вносят

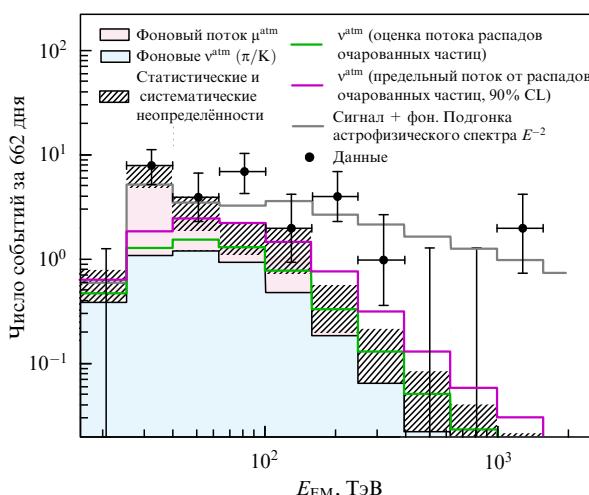


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Распределение выделенной энергии 28 событий в сравнении с модельными предсказаниями. По оси абсцисс отложена величина энерговыделения в детекторе (E_{EM}) при предположении наличия только электромагнитных вкладов [61].

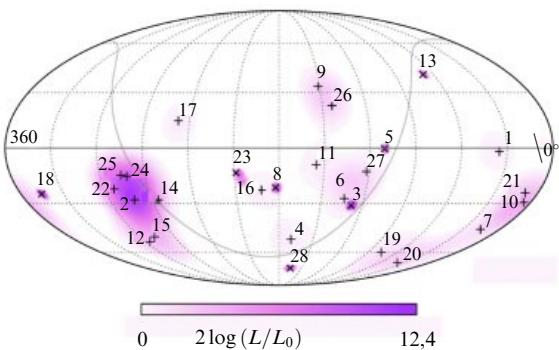


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Небесная карта 28 событий в экваториальных координатах. Серая линия — галактическая плоскость, серый квадрат (справа от события 14) — галактический центр. Местоположения ливней, полученные подгонкой, показаны прямыми крестами, а соответствующие местоположения мюонов — косыми крестами. Интенсивность цвета показывает вероятность наличия точечного источника в данном месте. Скопление рядом с галактическим центром имеет вероятность около 8 %, т.е. является в данном случае незначительным.

прямые нейтрино [64], не позволяют пока сделать ясных выводов.

Фитирование результатов всех анализов без учёта какого-либо космического вклада возможно, если опустить два события с энергией на ПэВ-ном уровне, хотя надо будет учесть чрезвычайно большой вклад прямых нейтрино [52]. С другой стороны, большинство движущихся вниз прямых атмосферных нейтрино должны были бы сопровождаться движущимися вниз мюонами, которые были бы зарегистрированы вето-слоем. Более того, сигнал от прямых нейтрино связан со спектром движущихся вниз мюонов, и такой вклад должен отражаться в высокозергетическом плече спектра мюонов. Сейчас проводится соответствующий анализ мюонов, зарегистрированных детектором IceCube, который должен прояснить этот вопрос.

Сейчас также слишком рано выдвигать гипотезы относительно источников на основе отношения каскадов и мюонов, во-первых потому, что примесь фоновых эффектов в каскадных и мюонных событиях различна, и, во-вторых, опять же по причине низкой статистики. Следует, однако, напомнить, что в анализе высокозергетических стартовых треков события с мюонными треками подавлены по сравнению с каскадными событиями, так что отношение каскадов к трекам 21:7 вполне согласуется с отношением ароматов 1:1:1.

Скоро мы будем знать больше. Третье событие ПэВ-ного масштаба (названное BigBird) было обнаружено при изучении 10%-ной выборки данных IceCube-86, набранных за второй год работы. Следующий шаг продолжает движение в направлении, заданном изучением движущихся вверх мюонов на детекторе IceCube-59, когда при анализе 2012 г. был обнаружен мюон с самой высокой энергией: около 400 ТэВ (см. рис. 10). Сейчас проводится соответствующий анализ данных IceCube-79 и IceCube-86, результаты которого будут опубликованы, вероятно, ближе к лету 2014 г. Кроме того, в стандартный анализ каскадов по данным IceCube-40 и IceCube-59 будут включены ещё и данные более поздних конфигураций детектора IceCube.

6. Будущее

С вводом в строй детектора IceCube чувствительность к локальным источникам и диффузным потокам возросла в 1000 раз по сравнению с таковой в середине 1990-х годов. Пока не получено никаких свидетельств по внеземным локальным источникам, но оптимистические модели источников всё ещё позволяют надеяться на их открытие с помощью IceCube при условии набора данных в течение ещё нескольких лет и улучшения методов их анализа. Однако первый прорыв уже произошёл при интегрировании данных по всему небу, в ходе которого были получены свидетельства внеземного вклада в диффузный поток.

Через пятьдесят с лишним лет после появления первых общих идей и через четыре десятилетия после представления первых практических предложений по строительству телескопов нейтрино высоких энергий мы, возможно, приблизились к поворотному пункту. Вполне вероятно, перед нами впервые неясно забрезжила земля обетованная вселенной нейтрино высоких энергий!

Всё это ведёт к следствиям, важным для будущей стратегии исследований в этой области. Впервые видится обоснованной возможность дать зелёный свет строительству в Северном полушарии второго детектора масштабом в 1 км³. Опасение построить такую вторую кубокилометровую установку и затем "ничего не обнаружить" уже выглядит безосновательным. Гарантировать обнаружение локальных источников пока нельзя, но вероятность их открытия выше, чем когда-либо до сих пор. Конечно, оптимальную конфигурацию большого северного нейтринного телескопа следует разрабатывать исходя из будущих данных IceCube, определяющих, насколько важны треки, насколько важны каскады, каково должно быть качество восстановления энергии и углов и т.д., но дорога к началу строительства таких детекторов как на севере, так и на юге (ввиду расширения IceCube) открыта.

Для Северного полушария есть два проекта — KM3NeT в Средиземном море и GVD (Gigaton Volume Detector, детектор гигатонного объёма) на Байкале.

Детектор KM3NeT, вероятно, будет состоять из нескольких отдельных блоков примерно такого типа, как показано на рис. 14а. После фазы проектирования, финансируемого Европейским сообществом, и последующей подготовительной фазы (в ходе которой были разработаны концепция и технический проект [65]), сообщество KM3NeT недавно было преобразовано в формальную коллегию. Предполагается устанавливать детектор объёмом $\approx 5 \text{ км}^3$ начиная с 2014 г. Общая сумма инвестиций оценивается примерно в 225 млн евро. Существующий план предусматривает развёртывание детектора путём установки стандартных блоков. Всего может быть установлено до шести стандартных блоков в трёх местах: неподалеку от Тулона, Сицилии и Пилоса.

В настоящее время выделено уже 40 млн евро на подготовку инфраструктуры и демонстрационных конфигураций на местах установки во Франции и Италии (KM3NeT, стадия 1). Следующим шагом будет KM3NeT, стадия 1,5, включающая в себя один или два блока объёмом в полный 1 км³, с возможностью осуществлять физическую программу на современном уровне IceCube. На это потребуется ещё 50–70 млн евро сверх уже выделенных 40 млн.

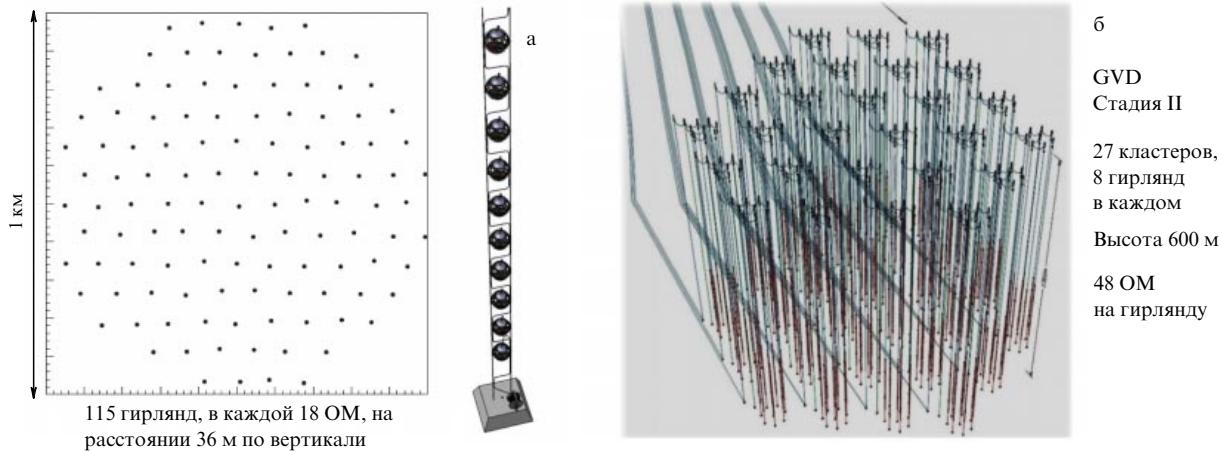


Рис. 14. (а) Вид сверху одного из шести предполагаемых блоков KM3NeT. (б) Эскизное изображение второй ступени GVD с общим объёмом около $1,5 \text{ км}^3$.

В России Байкальская коллаборация планирует поэтапное развёртывание на Байкале гигатонного детектора GVD километрового масштаба [66], состоящего из кластеров гирлянд. Поскольку становится очевидным, что первоначально планируемый объём в $0,5 \text{ км}^3$ уже недостаточен, рассматривается вариант детектора с вчетверо большим объёмом (рис. 14б). В 2008–2013 гг. прошли испытания базовых элементов и технологической решётки с первой полномасштабной гирляндой и двумя полугирляндами. Концептуальный проект этого детектора представлен в работе [67].

А что на Южном полюсе? В свете недавно полученных данных о внеземных нейтрино вполне очевидными шагами становятся увеличение объёма IceCube и оптимизация его рабочих параметров с учётом высоких энергий (предварительное название нового детектора — DecaCube). Результаты первых исследований таких систем недавно были представлены в работе [68].

Одна из возможных конфигураций, состоящая из 100 широко разнесённых гирлянд, установленных вокруг IceCube, показана на рис. 15. При объёме 7 км^3 и энергетическом пороге порядка 10 ТэВ эта детекторная система будет обладать чувствительностью к мюонным трекам (каскадам) в 3 (7) раз выше чувствительности IceCube. Анализ стартовых треков, аналогичный тому, о котором говорилось в разделе 5.4, позволит получить в 4–8 раз больше сигнальных событий, чем на IceCube (в зависимости от достижимого уровня подавления фона у границ детекторной системы). Поскольку установка следующего поколения претендует на возможность обнаружения локальных источников, важно будет оптимизировать детектор в отношении к регистрации мюонных треков, как лучших указателей направления.

Выделение событий от идущих вниз космических нейтрино можно улучшить посредством 50-кратного расширения существующей детекторной системы IceTop, используя, конечно, более дешёвую технологию и увеличив расстояние между гирляндами по сравнению с та-ковым в IceCube. Такая детекторная система сможет высокоэффективно исключать атмосферные нейтрино с энергией выше 100 ТэВ.

Однако сейчас в центре внимания коллаборации IceCube находится проект PINGU (прецisionная модернизация IceCube следующего поколения) (см. письмо о

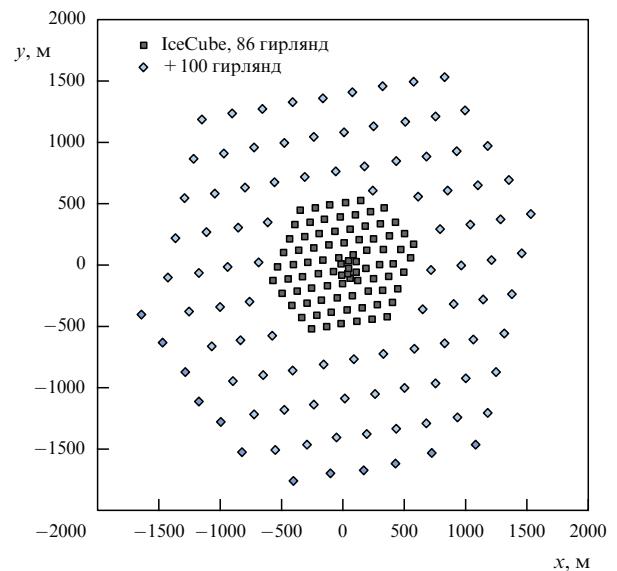


Рис. 15. Вид сверху возможного конструктивного варианта детектора DecaCube (расширение детектора IceCube на область высоких энергий) со 100 дополнительными гирляндами, полный объём около 7 км^3 [68].

намерениях коллаборации PINGU – IceCube [69]). Главной целью проекта PINGU является определение иерархии масс нейтрино с использованием эффекта резонанса и параметрических осцилляций атмосферных нейтрино, движущихся сквозь Землю. При энергиях ниже 10–15 ГэВ эти осцилляции будут приводить к появлению определённой структуры в плоскости параметров энергия – зенитный угол, которую можно измерить с помощью PINGU. В базовой версии детектор PINGU состоит из 40 дополнительных гирлянд (по 60 ЦОМ в каждой), размещенных во внутренней части детектора DeepCore. Энергетический порог составляет несколько ГэВ. На рисунке 16 показаны оценки статистической значимости определения иерархии масс некоторыми существующими или проектируемыми установками.

Аналогичное исследование проводится для средиземноморского проекта ORCA (Oscillation Research with Cosmics in Abyss) [71], в котором также рассматривается возможность работы с пучком чистых ν или $\bar{\nu}$ из ускорителя Протвино на ANTARES [72].

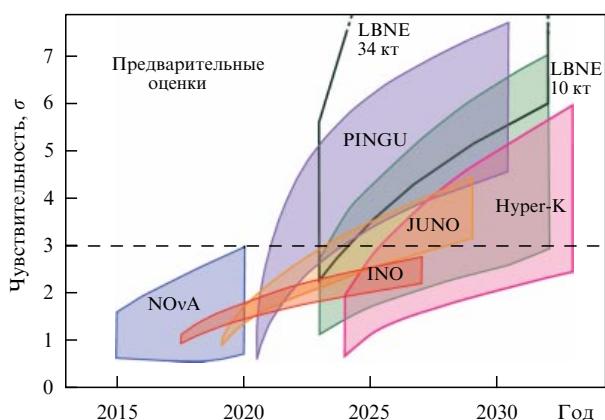


Рис. 16. (В цвете онлайн.) Оценка статистической значимости определения иерархии масс некоторыми существующими или проектируемыми установками по данным [70]. Ширина каждой полосы охватывает диапазон ожидаемой чувствительности, которая зависит от истинной иерархии (для экспериментов NOvA (NuMI (Neutrino at the Main Injector) Off-axis electron-neutrino Appearance) и LBNE (Long Baseline Neutrino Experiment)), разных истинных значений CP -фазы δ , различных предположений относительно достижимого разрешения по энергии (для JUNO (Jiangmen Underground Neutrino)) и в случае атмосферных нейтрино от угла смешивания θ_{23} , лежащего в диапазоне от первого до второго октанта. Оценки чувствительности для PINGU взяты из работы [69]; все другие кривые объединяют диапазоны для двух иерархий, которые даны в работе [70].

7. Заключение

Проекты PINGU и ORCA замыкают круг и приводят нас обратно к началу этой статьи и к событию, по случаю которого она была написана, — 100-летию со дня рождения Бруно Понтекорво. Он, как и всё наше сообщество, посчитал бы 2013 год весьма многообещающим для физики нейтрино. После того как в 2011 и 2012 гг. был измерен последний угол смешивания θ_{13} , в 2013 г. открывается широкая перспектива определения иерархии масс в таких экспериментах, как LBNO (Long-Baseline Neutrino Oscillations)/LBNE, JUNO и PINGU/ORCA.

На рубежах высоких энергий мы, очевидно, осуществили долгожданный прорыв и обнаружили первые нейтрино от отдалённых космических ускорителей. Открывается новое окно в высокоэнергетическую вселенную, и мы надеемся, что в ближайшее десятилетие наш сорокалетний труд в этой области исследований принесёт обильные плоды!

Список литературы

1. Becker J K *Phys. Rep.* **458** 173 (2008); arXiv:0710.1557
2. Anchordoqui L, Montaruli T *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **60** 129 (2010); arXiv:0912.1035
3. Katz U F, Spiering Ch *Prog. Part. Nucl. Phys.* **67** 651 (2012); arXiv:1111.0507
4. Spiering C *Eur. Phys. J. H* **37** 515 (2012); arXiv:1207.4952
5. Понтекорво Б М ЖЭТФ **37** 1751 (1959); Pontecorvo B *Sov. Phys. JETP* **10** 1236 (1960)
6. Понтекорво Б ЖЭТФ **34** 247 (1957); Pontecorvo B *Sov. Phys. JETP* **7** 172 (1958)
7. Понтекорво Б ЖЭТФ **53** 1717 (1967); Pontecorvo B *Sov. Phys. JETP* **26** 984 (1968)
8. Greisen K *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **10** 63 (1960)
9. Reines F *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **10** 1 (1960)
10. Markov M A, in *Proc. of the Tenth Annual Intern. Rochester Conf. on High-Energy Physics, 1960* (Eds E C G Sudarshan, J H Tinlot, A C Melissinos) (New York: Interscience, 1960) p. 578
11. Roberts A *Rev. Mod. Phys.* **64** 259 (1992)
12. Roberts A, Wilkins G A (Eds) *Proc. Summer DUMAND Study 1978*
13. Weekes T C et al. *Astrophys. J.* **342** 379 (1989)
14. Bosetti P et al. (DUMAND Coll.) "DUMAND II Proposal", Tech. Rep. HDC-2-88 (Hawaii: DUMAND Center, 1988)
15. Berezhinsky V, in *Second Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, February 13–15 1990* (Ed. M Baldo Ceolin) (Venice, 1990) p. 125
16. Babson J et al. (DUMAND Collab.) *Phys. Rev. D* **42** 3613 (1990)
17. Bezrukov L B et al. (Baikal Collab.), in *Proc. of the XIth Intern. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics, Nordkirchen, Germany, June 11–16, 1984* (Eds K Kleinknecht, E A Paschos) (Singapore: World Scientific, 1984) p. 550
18. Sokalski I, Spiering C (Eds) "The Baikal Neutrino Telescope NT-200", Tech. Rep. Baikal-92-03, DESY/INR (1992)
19. Belolaptikov I A et al. (Baikal Collab.) *Astropart. Phys.* **7** 263 (1997)
20. Balkanov V A et al. (Baikal Collab.) *Astropart. Phys.* **12** 75 (1999); astro-ph/9903341
21. Halzen F, Learned J, in *Proc. of the 5th Intern. Symp. on Very High-Energy Cosmic-Ray Interactions, Lodz 1988, Poland*
22. Askebjer P et al. (AMANDA Collab.) *Science* **267** 1147 (1995)
23. Andres E et al. (AMANDA Collab.) *Astropart. Phys.* **13** 1 (2000); astro-ph/9906203
24. Ackermann M, Ph.D. Thesis (Berlin: Humboldt Univ., 2006); <http://edoc.hu-berlin.de/docviews/abstract.php?id=27726>
25. Reimer A, Böttcher M, Postnikov S *Astrophys. J.* **630** 186 (2005); astro-ph/0505233
26. Halzen F, Hooper D *Astropart. Phys.* **23** 537 (2005); astro-ph/0502449
27. Deneyou A et al., in *Third Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, February 26–28, 1991* (Ed. M Baldo Ceolin) (Venice, 1991) p. 407
28. Aggouras G et al. (NESTOR Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **552** 420 (2005)
29. Aggouras G et al. (NESTOR Collab.) *Astropart. Phys.* **23** 377 (2005)
30. Aslanides E et al. (ANTARES Collab.), astro-ph/9907432; ANTARES, <http://antares.in2p3.fr>
31. Ageron M et al. (ANTARES Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **656** 11 (2011); arXiv:1104.1607
32. Taiuti M et al. (NEMO Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **626–627** S25 (2011)
33. Aiello S et al. (NEMO Collab.) *Astropart. Phys.* **33** 263 (2010); arXiv:0910.1269
34. Ahrens J et al. (IceCube Collab.) *Astropart. Phys.* **20** 507 (2004); astro-ph/0305196
35. Halzen F, Klein S R *Rev. Sci. Instrum.* **81** 081101 (2010); arXiv: 1007.1247
36. IceCube. Proposal to the National Science Foundation., Nov. 1, 1999, <http://www.icecube.wisc.edu/>
37. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.), arXiv:1309.6979; arXiv: 1309.7003; arXiv:1309.7006; arXiv:1309.7007; arXiv:1309.7008; arXiv:1309.7010, The IceCube contributions to the 33rd ICRC, Brazil 2013
38. Adrián-Martínez S et al. (ANTARES Collab.), arXiv:1312.4308, the ANTARES contributions to the 33rd ICRC, Brazil 2013
39. Аврорин А В и др. *Письма в Астрон. журн.* **35** 723 (2009); Avrorin A V et al. (Baikal Collab.) *Astron. Lett.* **35** 650 (2009)
40. Aynutdinov V et al. *Astropart. Phys.* **29** 366 (2008)
41. Adrián-Martínez S et al. (ANTARES Collab.) *Eur. Phys. J. C* **73** 2606 (2013); arXiv:1308.1599
42. Abbasi R et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. D* **83** 012001 (2011); arXiv:1010.3980
43. DeYoung T, in *Very Large Volume Neutrino Telescope Workshop, VLVT, 5–7 August 2013, Stockholm, Sweden*
44. Karle A (for the IceCube Collab.), in *Proc. of the XV Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, 11–15 March 2013, Venice, Italy*; arXiv:1401.4496
45. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.), arXiv:1309.6979
46. Waxman E, Bahcall J *Phys. Rev. Lett.* **78** 2292 (1997)
47. Guetta D et al. *Astropart. Phys.* **20** 429 (2004); astro-ph/0302524

48. Abbasi R et al. (IceCube Collab.) *Nature* **484** 351 (2012)
49. Hümmer S, Baerwald Ph, Winter W *Phys. Rev. Lett.* **108** 231101 (2012); arXiv:1112.1076
50. Adrián-Martínez S et al. (ANTARES Collab.) *Astron. Astrophys.* **559** A9 (2013); arXiv:1307.0304
51. Lipari P *Phys. Rev. D* **78** 083011 (2008); arXiv:0808.0344
52. Mohrmann L, in *13th Intern. Conf. on Topics in Astroparticle and Underground Physics, TAUP 2013, Asilomar, Calif., USA, September 8–13, 2013*
53. Kowalski M *JCAP* (05) 010 (2005); astro-ph/0505506
54. Sullivan G (IceCube Collab.), arXiv:1210.4195
55. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. D* **89** 062007 (2014); arXiv:1311.7048
56. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. D*, submitted; arXiv:1312.0104
57. Enberg R, Reno M H, Sarcevic I *Phys. Rev. D* **78** 043005 (2008); arXiv:0806.0418
58. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.), arXiv:1309.7003, contribution to the 33rd ICRC
59. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **111** 021103 (2013); arXiv:1304.5356
60. Березинский В С, Зацепин Г Т *ЯФ* **11** 200 (1970)
61. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Science* **342** 1242856 (2013); arXiv:1311.5238
62. Halzen F, arXiv:1311.6350
63. Anchordoqui L A et al. *J. High Energy Astrophys.* **1–2** 1 (2014); arXiv:1312.6587
64. Lipari P, arXiv:1308.2086
65. Bagley P et al. (KM3NeT Collab.), Technical Design Report, ISBN 978-90-6488-033-9, <http://www.km3net.org/public.php>
66. Aynutdinov V et al. (Baikal Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **602** 227 (2009); arXiv:0811.1110
67. GVD, Gigaton Volume Detector, Design Report, <http://baikal.web.jinr.ru>
68. Wiebusch Ph, in *MANTS Meeting, Munich October 2013*, presentation
69. Aartsen M G et al. (IceCube-PINGU Collab.) "Letter of intent: The Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU)", arXiv: 1401.2046
70. Blennow M et al., arXiv:1311.1822
71. Kooijman P (for the KM3NeT Collab.), in *33rd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2013, 2–9 July 2013, Rio de Janeiro, Brazil*, id 164
72. Brunner J, arXiv:1304.6230

High-energy neutrino astronomy: a glimpse of the Promised Land

Ch. Spiering

Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

Platanenallee 6, 15738 Zeuthen, Germany

E-mail: christian.spiering@desy.de

In 2012, physicists and astronomers celebrated the hundredth anniversary of the detection of cosmic rays by Viktor Hess. A year later, in 2013, the first evidence for extraterrestrial high-energy neutrinos emerged, promising fundamental insight into the origin of cosmic rays. The evidence was obtained from the data from the IceCube neutrino telescope at the South Pole. When the idea of this telescope was first discussed at the 1973 International Cosmic Ray Conference, it was beyond anyone's imagination that it would take biblical forty years before the first discoveries would be made and the Promised Land of the high energy neutrino would first be glimpsed. This paper sketches the development towards really sensitive detectors, describes the latest results from the IceCube and ANTARES neutrino telescopes, and takes a look at the future.

PACS numbers: **13.15.+g, 95.55.Vj, 98.70.Vc**

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201405e.0510

Bibliography — 72 references

Received 28 February 2014

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (5) 510–523 (2014)

Physics – Uspekhi **57** (5) (2014)