

50 лет Институту ядерных исследований РАН: исследуя вселенную высоких энергий

К. Шпиринг

Делается попытка дать обзор развития в течение 50 лет физики космических лучей высоких энергий в Институте ядерных исследований (ИЯИ) Российской академии наук (РАН) с точки зрения стороннего наблюдателя, чей путь в науке в значительной степени был сформирован сотрудничеством с учёными ИЯИ в конце 1980-х годов и в 1990-е годы. Рассматриваются физика космических лучей, гамма-излучения и нейтрино высоких энергий. Основное внимание уделяется крупным экспериментальным установкам ИЯИ в Баксанской долине и на озере Байкал. Исследования на этих объектах идут наряду с проведением важнейших экспериментов в разных точках мира, в частности в последнее время на установке Telescope Array в США и детекторе LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) в Китае.

Ключевые слова: нейтринная астрономия, космические лучи, гамма-астрономия, сверхновые звёзды, подземные детекторы, атмосферные ливни, детекторы космических лучей

PACS numbers: 01.65.+g, 29.40.-n, 95.55.Vj

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.06.038998>

Содержание

1. Введение (1261).
 2. Исследования космических лучей (1262).
 - 2.1. Баксанская нейтринная обсерватория. 2.2. Проект Telescope Array. 2.3. Детектор "Тунка-133". 2.4. Проект LHAASO.
 3. Гамма-лучевая астрономия (1266).
 - 3.1. От Крымского телескопа — к современным атмосферным черенковским телескопам с построением изображения. 3.2. Установка TAIGA. 3.3. Установка LHAASO. 3.4. "Ковёр" как детектор гамма-лучей. 3.5. Сравнение LHAASO с установками "Ковёр" и TAIGA.
 4. Нейтринная астрономия (1269).
 - 4.1. Зарождение. 4.2. Байкальский нейтринный телескоп: от полевых исследований до детектора NT-200. 4.3. Окно открывается: IceCube. 4.4. Байкальский подводный нейтринный телескоп гигантского объёма. 4.5. Радиодетектирование и акустическое детектирование нейтрино.
 5. Заключение (1277).
 6. Приложение. О солнечных нейтрино и нейтрино от сверхновых (1277).
- Список литературы (1278).

1. Введение

Космическое излучение было открыто более 100 лет назад. Австрийский физик Виктор Хесс (Victor Hess) во

время высотного полёта обнаружил, что некоторые типы ионизирующего излучения попадают в атмосферу Земли извне. Лишь в 1920-е годы стало общепризнанным, что космическое излучение состоит из заряженных частиц, а не из гамма-квантов. Отдельные космические лучи впервые визуально наблюдал в 1927 г. в Ленинграде Д.В. Скобелев с помощью камеры Вильсона. 1930-е годы были отмечены открытием в космических лучах позитронов, мюонов и заряженных пионов. В 1939 году французский физик Пьер Оже (Pierre Auger) обнаружил, что космические лучи приходят на поверхность Земли в виде ливней частиц. По горизонтальной ширине ливней П. Оже оценил, что максимальная энергия ливней может достигать величины порядка 10^{15} эВ. В настоящее время известно, что максимальные энергии ливней могут быть значительно большими — они могут превосходить 10^{20} эВ. В связи с этим возникает вопрос о природе космических лучей: каким образом природе удаётся разогнать частицы до таких ошеломительных энергий?

В принципе ответ на этот вопрос можно пытаться получить тремя способами:

1) измеряя направление, энергии и массовый состав заряженных космических лучей;

2) измеряя направление и энергии высокоэнергичных гамма-лучей, порождённых в окрестности источника в процессах типа $p + \text{мишень} \rightarrow \pi^0 + \dots$ с последующим распадом $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$;

3) измеряя направление и энергии высокоэнергичных нейтрино, порождённых в окрестности источника в процессах типа $p + \text{мишень} \rightarrow \pi^+ + \dots$ с последующими распадами $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$.

У каждого метода есть свои преимущества и недостатки. Космические лучи как источники первичных частиц породили вопрос о их происхождении. Можно измерить энергию космических лучей и — до определённой

К. Шпиринг

Deutsches Elektronensynchrotron (DESY) Zeuthen, D-15738, Germany
E-mail: christian.spiering@desy.de

Статья поступила 7 декабря 2020 г.,
после доработки 19 июня 2021 г.



Моисей Александрович Марков
(1908–1994)



Георгий Тимофеевич Зацепин
(1917–2010)



Александр Евгеньевич Чудаков
(1921–2001)

Рис. 1. Основатели физики космических лучей и нейтринной физики в ИЯИ.

степени — их массовый состав. Однако их отклонение в галактических магнитных полях, за исключением отклонения лучей с самыми высокими энергиями, так велико, что информация о направлении теряется и определение их углового положения становится невозможным. С другой стороны, гамма-лучи распространяются по прямой. Однако, поскольку космические лучи на 99 % состоят из адронов, гамма-лучи не дают абсолютно надёжного доказательства своего адронного происхождения. Объяснение состоит в том, что гамма-лучи могут возникать в результате обратного комптоновского рассеяния $e^- + \gamma_{\text{low energy}} \rightarrow e^- + \gamma_{\text{high energy}}$, т.е. после ускорения электрона (а не адрона). Как заряженные космические лучи, так и гамма-лучи с наибольшими энергиями могут распространяться только на определённое расстояние, поскольку они поглощаются при взаимодействии с реликтовым космическим излучением. Нейтрино лишены таких недостатков: они распространяются по прямой и не поглощаются. Однако нейтрино ввиду их крайне малого сечения взаимодействия очень трудно детектировать.

Ниже я приведу описание истории исследования космических лучей, гамма-лучей и нейтринной астрофизики в Институте ядерных исследований (ИЯИ). Моя специализация в нейтринной астрономии и участие ранее в коллаборации на Байкале привели к некоторому дисбалансу между разделами 2 и 3, с одной стороны, и разделом 4 (нейтринная астрофизика), с другой. В связи с этим я приношу читателям извинения за несколько субъективный и выборочный характер настоящей статьи.

Прежде чем начать наше путешествие по 50 годам истории, я хотел бы привести портреты трёх физиков, которые могут считаться основателями физики космических лучей в ИЯИ и имена которых будут неоднократно упоминаться в статье: М.А. Марков, Г.Т. Зацепин и А.Е. Чудаков (рис. 1).

2. Исследования космических лучей

2.1. Баксанская нейтринная обсерватория

Баксанская нейтринная обсерватория (БНО) ИЯИ знаменита в основном своей подземной частью, где в качестве основных установок находятся Баксанский подземный сцинтилляционный детектор (Baksan Under-

ground Scintillation Detector, BUST) и детектор SAGE (аббревиатура от Soviet–American Gallium Experiment). Эти два детектора предназначены в основном для низко-энергетических и атмосферных нейтрино¹. Кроме того, установка BUST играет важную роль в физике космических частиц. BUST состоит из четырёх горизонтальных и четырёх вертикальных слоёв жидкостных сцинтилляционных счётчиков [1]. Установка, расположенная на глубине 300 м под землёй, была запущена в 1977 г.

Спустя 19 лет, в 1996 г., начала работу расположенная на поверхности земли над BUST ливневая установка "Андырчи" (Andyrchy), состоящая из 37 сцинтилляционных счётчиков [2]. Конфигурация обоих детекторов показана на рис. 2. Комбинация установки на поверхности земли и подземного детектора позволяет измерять ливневые частицы (в основном электроны и позитроны) на поверхности и мюоны от распадов вторичных частиц под землёй.

Однако первой крупной установкой в Баксанской обсерватории был "Ковёр" (Carpet), расположенный на расстоянии примерно 600 м от входа в подземную лабораторию. Эта установка для регистрации ливневой космиче-

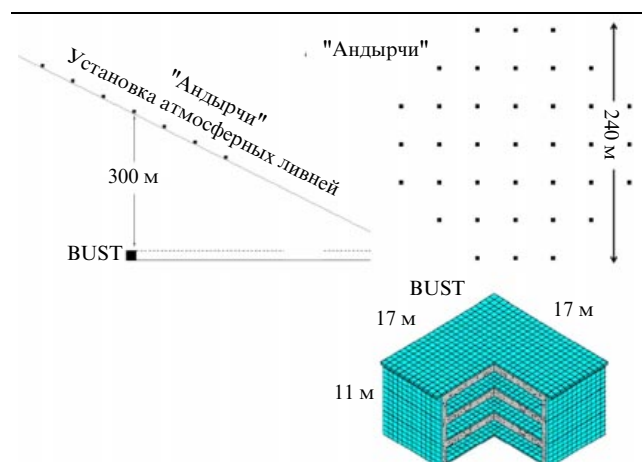


Рис. 2. Баксанская установка атмосферных ливней "Андырчи" и Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп BUST.

¹ См. раздел 4, посвящённый атмосферным нейтрино в BUST, и приложение о нейтрино от Солнца и сверхновых.

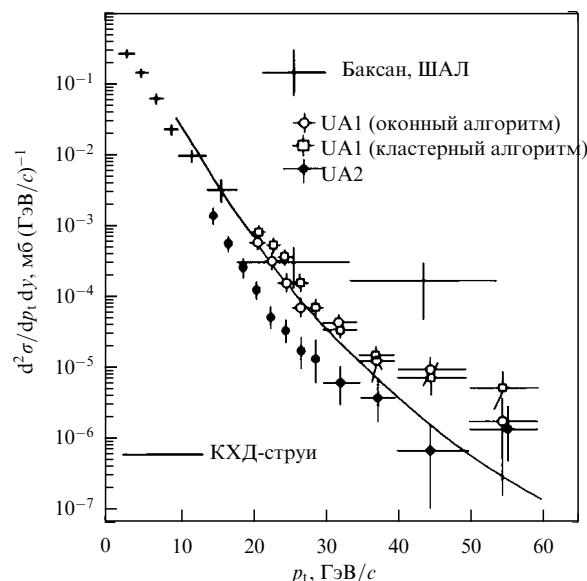


Рис. 3. Сравнение сечений событий с большими p_t , полученных на установке "Ковёр" (1981 г.), с предсказаниями КХД и первыми результатами экспериментов UA1 и UA2 (1982 г.).

ских лучей, созданная в 1973 г., состоит из блоков жидких сцинтилляторов. Её центральная часть ("ковёр"), содержащая 400 сцинтилляторов общей площадью 200 м², являлась прототипом одного слоя будущей установки BUST. Блоки, находящиеся на поверхности, регистрируют полный электромагнитный состав ливня космических лучей, а блоки, расположенные на небольшой глубине (которая позднее была увеличена), служат счётчиками мюонов [3].

Инициатором создания установок "Ковёр" и BUST был А.Е. Чудаков, а их модернизацией, эксплуатацией и анализом данных в 1980-е и 1990-е годы руководили в основном А.В. Воеводский и Е.Н. Алексеев.

Начиная с середины 1970-х годов установка "Ковёр" служила источником прецизионных данных по поперечному распределению широких атмосферных ливней (ШАЛ) (Extensive Air Showers — EAS), при этом измерялись также ливни с несколькими сердцевинами от струй с большими поперечными импульсами p_t . Данные "Ковра" позволили определить сечение рождения струй с большими p_t при энергии в центре масс $s^{1/2}$ около 500 ГэВ. В работе [4] было показано, что сечение рождения струй с большими p_t , полученное из анализа струй с несколькими сердцевинами в "Ковре", хорошо согласуется с предсказаниями квантовой хромодинамики (КХД). Спустя полтора года начал работу коллайдер SPS (Super Proton Synchrotron) в ЦЕРНе, на котором результаты "Ковра" были подтверждены (разумеется, с гораздо более высокой точностью) в экспериментах UA1 и UA2 (рис. 3) (см. также [5]).

Установка BUST (ставшая знаменитой в основном благодаря участию в открытии нейтрино от сверхновой SN1987 A) дала большое количество важных результатов: косвенное измерение энергетической зависимости сечения фотоядерного взаимодействия для физики космических лучей и элементарных частиц (γN), полученное из изучения неупругих взаимодействий мюонов [6], энергетический спектр высокоэнергичных мюонов, генерируемых в ливнях [7, 8], и измерения множественности

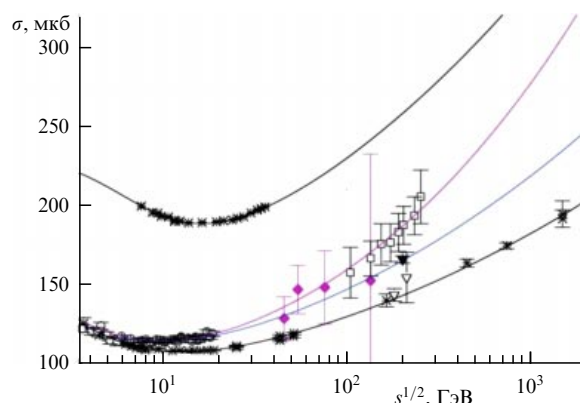


Рис. 4. Энергетическая зависимость γ -взаимодействия [10]: результаты BUST показаны ромбами.

мюонов и установление её связи с массовым составом первичных космических лучей [9]. На рисунке 4 (взятом из [10]) показаны протон-протонные сечения, следующие из данных установки BUST [6], вместе с приближениями для фотон-протонного сечения, полученными в модели векторной доминантности из пион-протонных (верхняя кривая) и нуклон-протонных (нижняя кривая) данных. Символами, находящимися между верхней и нижней кривыми, показаны сечения прямого фотон-протонного взаимодействия при более низких энергиях, полученные из результатов по электрон-протонным столкновениям (ZEUS, H1) при более высоких энергиях (соответствующие кривые представляют результаты подгонки по двум разным моделям). Особенно эффективной в изучении первичного спектра космических лучей и их состава вокруг так называемого колена оказалась совместная работа установок "Андырчи" и BUST (см., например, [11]).

2.2. Проект Telescope Array

Детекторы в Баксане предназначены для области энергий $10^{13} - 10^{16}$ эВ. Для изучения космических лучей более высоких энергий требуются ливневые установки гораздо большего размера. В настоящее время ведущими экспериментами в области самых высоких энергий космических лучей являются Обсерватория им. Пьера Оже (Pierre Auger Observatory, PAO) в Аргентине и проект Telescope Array (TA) в штате Юта (США). Обе установки, которые покрывают наземными детекторами площадь 3000 км² (PAO) и 700 км² (TA), собрали многие тысячи событий с энергиями, превышающими 10^{19} эВ, и с максимальными энергиями до нескольких единиц 10^{20} эВ. TA состоит из ≈ 500 наземных сцинтилляционных детекторов (scintillation detectors, SD) расположенных с шагом 1,2 км, и трёх станций флуоресцентных детекторов (fluorescence detectors, FD), сканирующих ночное небо над установкой SD [12, 13]. ИЯИ является членом коллаборации TA начиная с 2008 г.

Одним из основных вопросов, которые исследуются на указанных установках, являются возможное обрезание спектра космических лучей и, если оно существует, выяснение причины его существования. Возникает ли это обрезание потому, что ускоритель не может разогнать частицы до более высоких энергий, или потому, что протоны при движении через космос поглощаются в результате так называемого эффекта Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК)? Этот эффект был предложен в 1966 г.

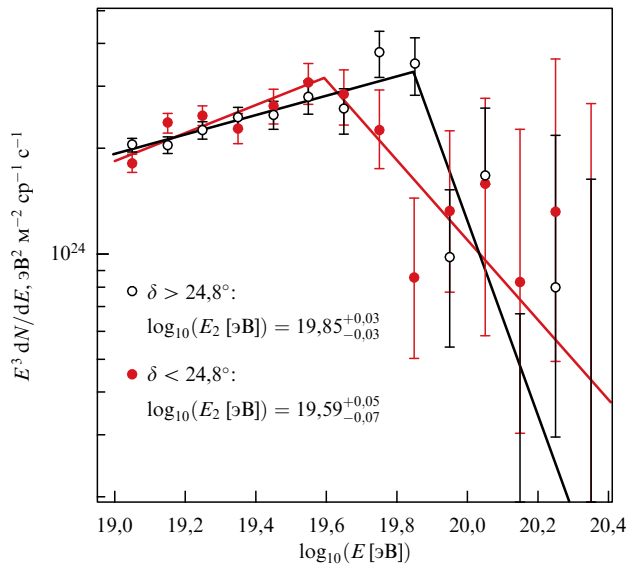


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Спектр наземного детектора ТА для двух диапазонов склонения в событиях с зенитными углами от 0 до 55°. Для наглядности ломаными линиями показаны результаты подгонки для каждого из диапазонов склонений [16].

Кеннетом Грейзенем (Kenneth Greisen) (США) и независимо Г.Т. Зацепиным и В.А. Кузьминым (оба — сотрудники ИЯИ) [14, 15]. Предел ГЗК является теоретическим верхним пределом энергии космических протонов из межгалактического пространства. Если энергия протонов превосходит $\sim 5 \times 10^{19}$ эВ, то они будут поглощаться в резонансном взаимодействии с реликтовыми (cosmic microwave background, СМВ фотонами): $p + \gamma_{\text{СМВ}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0/n + \pi^+$. В результате протоны более высоких энергий не будут доходить до Земли или будут терять энергию, если их источники расположены на расстоянии более ~ 200 млн световых лет.

Наличие эффекта было подтверждено и РАО, и ТА, однако с несколькими разными энергиями обрезания (которая оказалась несколько выше для ТА, чем для РАО). Это расхождение может быть связано или с различиями в калибровке энергий (этот эффект тщательно изучался обеими коллаборациями), или с зависимостью обрезания от специфичного для источника различия направлений север–юг. Коллаборация ТА обнаружила сильные указания в собственных данных на зависимость эффекта от величины склонения (рис. 5) [16]. Продemonстрированный эффект имел статистическую значимость 4.0σ , которая по мере набора данных увеличилась до 4.3σ [17].

Чёткого ответа на вопрос о природе обрезания пока не существует. Для того чтобы сделать выбор между эффектом ГЗК и максимальной мощностью источника, требуются установки больших размеров и улучшенные возможности для определения массового состава.

Коллаборация ТА измерила энергетический спектр космических лучей в фантастически широком (пять порядков) диапазоне — от нескольких единиц 10^{15} эВ до нескольких единиц 10^{20} эВ — с помощью наземных сцинтилляционных детекторов, флуоресцентных телескопов и с привлечением данных своего низкоэнергетического расширения TALE (Telescope Array Low Energy Extension) (рис. 6). В настоящее время установка модернизирована — доведена примерно до размера РАО (ТА $\times 4$), что позволяет улучшить условия для определения энер-

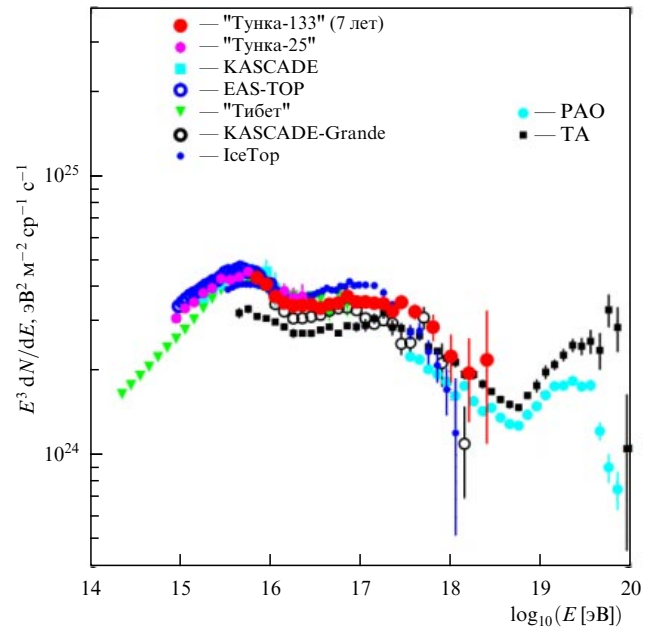


Рис. 6. Сравнение энергетических спектров, полученных в месте расположения установки "Тунка", с другими экспериментальными результатами [19]. KASCADE — KArlsruhe Shower Core and Array DEtector.

гии обрезания, зависимости спектра от восхождения и для возможного подтверждения "горячих точек" на небесной карте космических лучей.

Группа ИЯИ (созданная П.Г. Тиняковым, работающим в настоящее время в Брюсселе) активно участвует в анализе данных ТА и интерпретации результатов. Члены группы также принимают участие в эксплуатации и обслуживании детектора. Например, члены группы ИЯИ обнаружили горячую точку — указание на анизотропию в энергиях более 57 ЭэВ [18]. Сотрудники ИЯИ разработали метод восстановления событий SD, который используется для поиска фотонов и нейтрино сверхвысоких энергий. Они также изучают массовый состав лучей с помощью многопараметрического метода машинного обучения. В настоящее время группа ИЯИ сосредоточила усилия на разработке усовершенствованных методов анализа состава и поиска фотонов с использованием свёрточной нейронной сети (convolutional neural network).

2.3. Детектор "Тунка-133"

Детектор космических атмосферных ливней "Тунка" [19] работает в диапазоне от энергий баксанских детекторов до энергий установки ТА, т.е. от $\sim 10^{15}$ эВ до нескольких единиц 10^{18} эВ. "Тунка-133" находится в Тункинской долине в Сибири и состоит из комплекса из 133 широкоугольных атмосферных черенковских счётчиков, окружённого шестью небольшими вспомогательными кластерами, по семь счётчиков в каждом. Диаметр центрального комплекса 1 км, а малые кластеры расположены на расстоянии примерно 750 м. Каждый счётчик состоит из металлического цилиндра, в котором находится направленный вверх отдельный фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) диаметром 20 см. Предшественник установки "Тунка-133" меньшего размера состоял из 25 блоков, содержащих 37-сантиметровые ФЭУ ("Квазар"), которые были разработаны для Байкальского

нейтринного телескопа (см. раздел 4.2). Ведущим в коллаборации является Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ).

"Тунка-133" является первым крупномасштабным "черенковским детектором с временной привязкой", в котором фронт ливня восстанавливается по времени прибытия частиц в различные пространственные точки — эта методика впервые была реализована 30 лет назад в небольшой установке на Канарских островах.

На рисунке 6 показаны энергетические спектры космических лучей, измеренные наземными детекторами, включая данные от ТА, "Тунка-25" и "Тунка-133". Данные установки "Тунка" согласуются со спектрами, полученными KASCADE-Grande и IceTop (низкие энергии), и данными ТА и РАО (высокие энергии). Методика временной привязки, разработанная в рамках проекта "Тунка", в настоящее время используется для гамма-астрономии в проекте TAIGA (см. раздел 3). Диаграмма также наглядно показывает отмеченное в разделе 2.2 очевидное различие между значениями обрезания, измеренными ТА и РАО.

2.4. Проект LHAASO

Проект LHAASO (Large High-Altitude Air Shower Observatory — Большая высотная обсерватория атмосферных ливней) [20] является исследовательским инструментом нового поколения, построенным на высоте 4410 м в Китае, для изучения с беспрецедентно высокой чувствительностью энергетического спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий $10^{13} - 10^{17}$ эВ. Одновременно установка будет использоваться как широкоапертурный (≈ 2 ср), круглосуточно действующий телескоп гамма-лучей, работающий в диапазоне энергий $10^{11} - 10^{15}$ эВ (см. раздел 3). Обсерватория LHAASO состоит из следующих основных компонентов (рис. 7): а) комплекса площадью 1 км² (LHAASO-KM2A) из электромагнитных детекторов (ED) частиц, разделённого на две части: центральную часть, состоящую из 4931 сцинтилляционного детектора размером 1 м² каждый (установленных с шагом 15 м), которая охватывает площадку в виде круга радиусом 575 м, и внешнее защитное кольцо с 311 ED (установленных с шагом 30 м) с внешним радиусом 635 м; б) комплекса, покрывающего площадь 1 км², состоящего из 1146 подземных черенковских баков с водой, каждый размером 36 м², установленных с шагом 30 м, для детектирования мюонов (MD); в) плотной структуры наземных водных черенковских счётчиков (Water Cherenkov Detector Array, WCDA) общей площадью около 78000 м² — LHAASO-WCDA; г) 12 черенковских телескопов атмосферных ливней с большим полем зрения (Wide Field-of-view Cherenkov/fluorescence Telescope Array, WFCTA) — LHAASO-WFCTA.

LHAASO благодаря своему высокому расположению и плотному размещению аппаратуры обладает высокой чувствительностью, позволяющей детектировать космические лучи с энергиями, в несколько сотен раз меньшими, чем на других наземных установках (за исключением установки Тибет, для которой различие немного меньше). Это даст возможность получить данные, которые в значительной степени перекрываются с данными экспериментов на спутниках и воздушных шарах. Плотное размещение аппаратуры, состоящей из детекторов различных типов, также позволит лучше определять массовый состав, чем на других наземных детекторах кос-

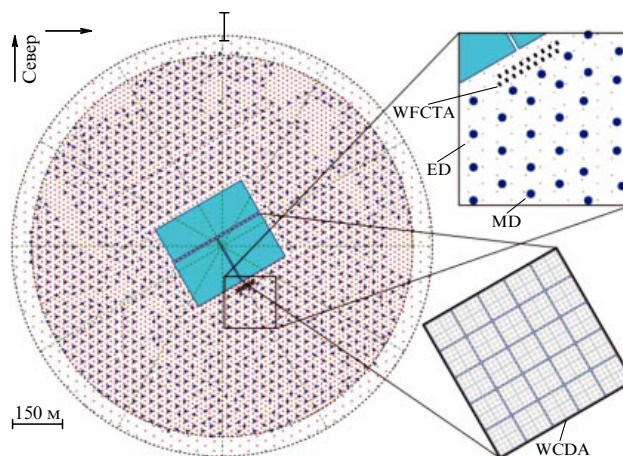


Рис. 7. Конфигурация эксперимента LHAASO.

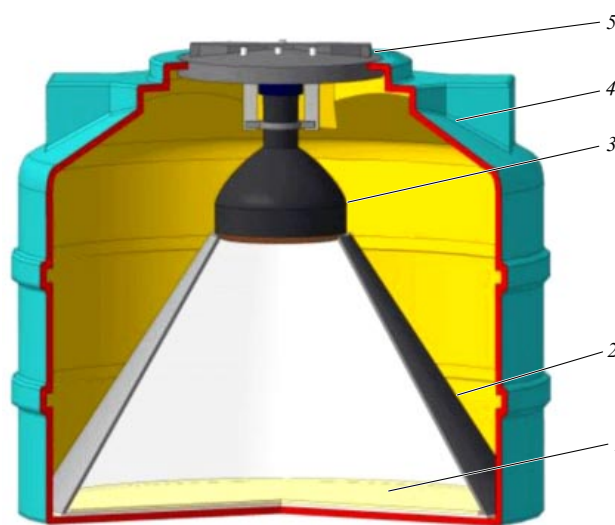


Рис. 8. Структура детектора PRISMA. Детекторы ENDA для LHAASO имеют аналогичную конструкцию. 1 — ZnS(Ag) + ⁶LiF-сцинтиллятор; 2 — светоотражающий конус; 3 — ФЭУ FEU-200 (в ENDA используются 4-дюймовые ФЭУ Hamamatsu CR165); 4 — стенка бака; 5 — крышка [22].

мических лучей. Один интересный компонент LHAASO (не показанный на рис. 7) называется ENDA (Electron-Neutron Detector Array) (Система электрон-нейтронных детекторов). В ENDA используется новая методика, которая особенно важна для отделения адронных ливней от ливней, вызванных гамма-квантами, и определения массового состава ливней. Эта методика была разработана в последнее десятилетие группой ИЯИ под руководством Ю.В. Стенькина.

Детекторы ENDA аналогичны по типу детекторам PRISMA (от итал. PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa), которые ранее использовались в установке ARGO-YBJ (Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing) [21], а сейчас работают в окружении детектора НЕВОД (НЕйтринный ВОдный Детектор) в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ [22, 23]. ENDA реагируют на тепловые нейтроны, генерируемые адронной компонентой атмосферных ливней. В основе детекторов лежит гранулированный сплав неорганического соединения ZnS, легированного Ag и LiF, который обогащён ⁶Li. Изотопы ⁶Li захватывают тепловые нейтроны в реакции ⁶Li + n →

→ ${}^3\text{H} + \alpha + 4,78 \text{ МэВ}$. Выход света ~ 160000 фотонов на захват одного нейтрона, при этом медленные нейтроны захватываются с эффективностью 20 %. Структура детектора PRISMA показана на рис. 8. Согласно проекту установка ENDA на заключительном этапе должна состоять из 400 станций.

Проект LHAASO знаменует собой огромный скачок в физике космических лучей и гамма-лучей. Первые удивительные результаты гамма-астрономии обсуждаются в разделе 3.

3. Гамма-лучевая астрономия

3.1. От Крымского телескопа — к современным атмосферным черенковским телескопам с построением изображения

Среди трёх способов исследования Вселенной при самых высоких энергиях (космические лучи, гамма-лучи и нейтрино) гамма-астрономия пока является наиболее успешным инструментом. При наличии в 2020 г. почти 200 известных источников она раскрыла детальную картину космоса высоких энергий. Основным методом гамма-астрономии является построение изображения атмосферных космических ливней с использованием черенковского излучения, сгенерированного в атмосфере, с помощью телескопов IACT (Imaging Air shower Cherenkov Telescopes — Черенковские телескопы атмосферных ливней с построением изображения).

Вспышки черенковского излучения от атмосферных ливней впервые наблюдали в 1952 г. Билл Гэлбрайт (Bill Galbraith) и Джон Джелли (John Jelley) [24]. Одним из первых, кто объяснил, что эти вспышки вызываются атмосферными ливнями, был А.Е. Чудаков [25]. Он также первым реализовал идею калориметрического измерения каскадов атмосферных ливней с использованием порождаемого ими черенковского излучения [26]. Его эксперимент на Памире стал пионерским в детальном исследовании черенковского излучения, испускаемого атмосферными ливнями.

В 1961 г. Г.Т. Зацепин предложил Чудакову (который в то время разворачивал в Крыму черенковский детектор атмосферных ливней) использовать его установку для поиска высокоэнергичных источников гамма-лучей. Это предложение было опубликовано в совместной статье Зацепина и Чудакова [27]. В последующие годы Чудаков первым в мире сделал шаг в область астрономии гамма-квантов высокой энергии, применив свою установку в качестве гамма-телескопа для наблюдения нескольких потенциальных источников. Телескоп состоял из 12 зеркал диаметром 1,5 м, в каждом из которых свет фокусировался в единственный ФЭУ. Среди наблюдаемых источников были Лебедь-А и Крабовидная туманность, однако из-за отсутствия сигнала Чудаков смог только установить верхний предел потока гамма-лучей от этих источников. В ретроспективе это не удивительно: потоки гамма-лучей слишком малы по сравнению с фоном космических лучей, для того чтобы их можно было идентифицировать без использования методов построения изображения или временной привязки [28].

До прорыва в этой области прошло почти три десятилетия. В 1989 г. телескоп Обсерватории им. Уиппла (Whipple) в Аризоне идентифицировал первый источник гамма-квантов в ТэВ-ном диапазоне — Крабовидную

туманность [29]. Телескоп состоял из 10-метрового фрагментированного зеркала, которое фокусировало свет на мозаику из фотоэлектронных умножителей. Узор, состоящий из сработавших ФЭУ, давал изображение ливня. Благодаря обрезаниям по параметрам ливня удалось отделить сигнал гамма-лучей от фона ливней, инициированных космическими лучами.

К 1996 г. телескоп Обсерватории им. Уиппла идентифицировал ещё два источника (активные Галактики Маркаряна 421 и 502). В 2005 г. число источников возросло до ≈ 80 , а в 2015 г. — до ≈ 150 . Прогресс за последние полтора десятилетия был в основном достигнут благодаря трём установкам, состоящим из нескольких телескопов, которые позволяют получить стереоизображение: H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) в Намибии (пять телескопов), MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope) на острове Ла Пальма (два телескопа) и VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) в Аризоне (четыре телескопа). В настоящее время группы, работающие на этих установках, объединились для создания огромной установки, состоящей из черенковских телескопов, — СТА (Cherenkov Telescope Array) — с двумя площадками, одна из которых находится на Ла Пальма, а другая — в Чили.

Российские институты не участвуют ни в H.E.S.S., ни в MAGIC, ни в VERITAS; они также не являются партнёрами по проекту СТА. В то же время ИЯИ участвует в работе двух обсерваторий гамма-лучей/космических лучей, которые используют наряду с прочими метод построения изображения: TAIGA в Сибири и LHAASO в Китае.

3.2. Установка TAIGA

TAIGA — (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) — усовершенствованная установка "Тунка" для физики космических лучей и гамма-астрономии — является развитием установки "Тунка-133", описанной в разделе 2. После окончания строительства TAIGA будет состоять из 120 широкоугольных детекторов с привязкой по времени HiSCORE (High-Sensitivity Cosmic ORigin Explorer) [30]), не менее чем трёх телескопов с построением изображения (IACT) и большого количества мюонных детекторов [31, 32]. В HiSCORE используется тот же метод детектирования, что и в "Тунка-133", но с гораздо лучшим разрешением по времени, что обеспечит точное определение направления события. Это позволит с большой точностью разделять γ -кванты и адроны при высоких энергиях. IACT обеспечит разделение γ -кванты/адроны при низких энер-



Рис. 9. Вид детектора с временной привязкой HiSCORE и телескопа IACT в установке TAIGA.

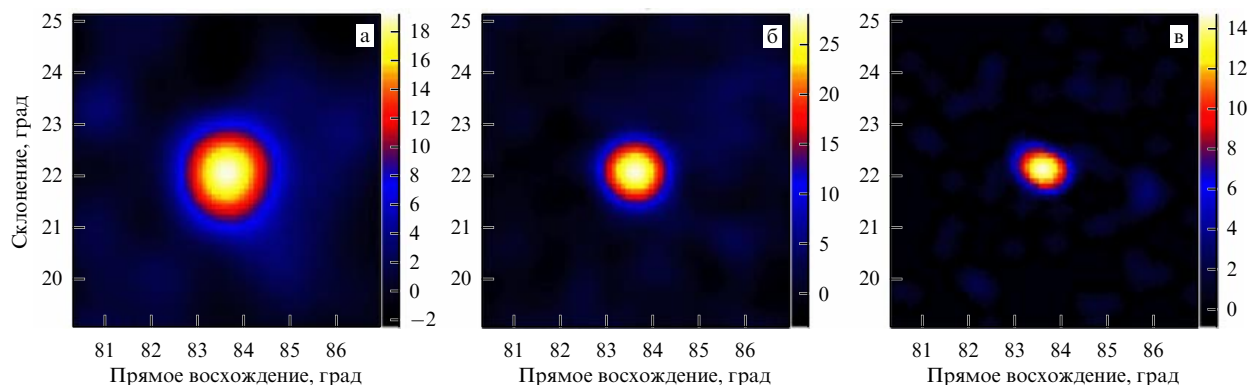


Рис. 10. (В цвете онлайн.) Карты распределения значимости с центром в Крабовидной туманности в трёх энергетических интервалах: (а) 10–25 ТэВ, (б) 25–100 ТэВ, (в) > 100 ТэВ. σ_S — стандартное отклонение двумерной гауссовой функции для точечной функции распределения в КМ2А. Величина значимости показана градацией цвета. S — максимальное значение на карте. (Из работы [34].)

гиях и превосходное разрешение по направлениям. Счётчики мюонов также будут обеспечивать разделение γ -кванты/адроны. На рисунке 9 показан вид детектора с привязкой по времени и телескопа IACT. В коллаборацию TAIGA входит ряд российских институтов, из которых ведущим является МГУ, и три немецких партнёра: DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron)/Университет Гумбольдта, Гамбургский университет и Институт Макса Планка в Мюнхене.

Благодаря работе первых двух IACT в стереоскопическом режиме была проведена идентификация Крабовидной туманности в диапазоне энергий до ~ 50 ТэВ [32] (а с использованием информации от HiSCORE — даже до энергий ~ 100 ТэВ). В то же время уже производилось наблюдение Крабовидной туманности в качестве тестирования корректности работы установки, уже ведётся наблюдение других источников, и, согласно предварительным результатам, от двух из них получены указания на гамма-сигналы [33].

3.3. Установка LHAASO

Центральная часть установки LHAASO охватывает площадь 78000 м², на которой в плотном порядке установлены баки с водой (LHAASO-WCDA). Гамма-лучевая астрономия с использованием больших баков с водой уже с большим успехом была реализована на установке HAWC (High Altitude Water Cherenkov observatory) в Мексике, которая находится на той же высоте, что и LHAASO, но имеет вдвое меньшую площадь. Однако большое преимущество LHAASO обеспечивается использованием множества иных детекторов, которые также могут разделять адронные ливни и γ -ливни, покрывая при этом площадь, примерно в 16 раз большую, чем занимает лишь одна установка WCDA.

Фактически первые результаты по гамма-квантам были получены без WCDA, с использованием всего лишь 50 % компонента КМ2А, уже развёрнутого в 2019 г. КМ2А состоит из наземных сцинтилляционных счётчиков (ED) и подземных черенковских баков с водой (MD), установленных с шагом соответственно 15 и 30 м. ED используется для детектирования электромагнитной компоненты ливня, а MD — для регистрации мюонов. Коллаборация представила в [34] результаты анализа, основанного на данных, собранных в течение пяти месяцев на половине установки КМ2А, для изучения Крабо-

видной туманности в качестве "стандартной свечи" при очень высоких энергиях. Статистическая значимость наблюдаемого гамма-сигнала составляет $19,2\sigma$ в диапазоне энергий 10–25 ТэВ, $28,0\sigma$ в диапазоне 25–100 ТэВ и $14,7\sigma$ при энергии > 100 ТэВ, а угловые распределения гамма-лучей вокруг источника довольно хорошо согласуются с точечной функцией распределения, полученной при численном моделировании в соответствующих энергетических интервалах ($0,46^\circ$, $0,29^\circ$ и $0,16^\circ$) (рис. 10).

Когда настоящая статья находилась в процессе написания, появились данные первых 25 секций WCDA [35], также относящиеся к Крабовидной туманности. На рисунке 11 показаны спектр гамма-лучей от Крабовидной туманности, полученный WCDA-1, вместе со спектром от 50 % КМ2А, которые сравниваются с результатами других детекторов. Результаты WCDA-1 хорошо согласуются при низких энергиях с другими данными, а при энергиях свыше 10 ТэВ наблюдается прекрасное согласие данных КМ2А с результатами HAWC.

Обе установки, WCDA и КМ2А, обладают большим углом зрения и, в отличие от IACT, могут работать круг-

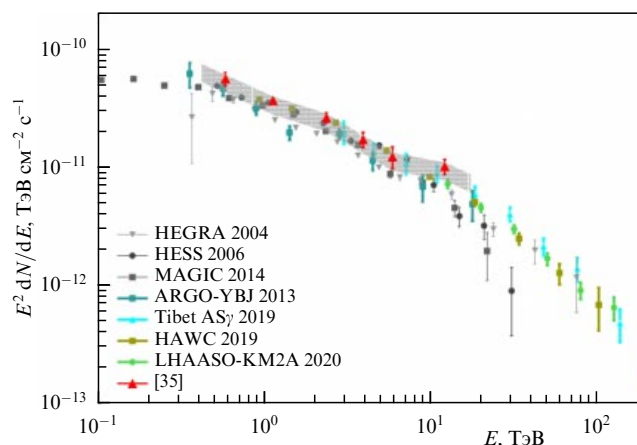


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Спектральное энергетическое распределение Крабовидной туманности, измеренное WCDA-1, в диапазоне энергий от 800 ГэВ до 13 ТэВ (красные треугольники) и 50 % КМ2А в области энергий выше 10 ТэВ (зелёные кружки). Отрезки ошибок соответствуют статистическим погрешностям, а серой полосой показаны систематические ошибки. Результаты других экспериментов приведены для сравнения. (Из работы [35].)

лосуточно. Нет необходимости говорить, что благодаря большому углу зрения удалось открыть помимо Крабовидной туманности множество источников, часть которых не наблюдалась IACT, а некоторые из них характеризуются энергиями, намного превышающими 100 ТэВ.

Первоначальные результаты LHAASO возвестили о наступлении новой эры в гамма-астрономии. Вне зависимости от характера участия ИЯИ в анализе данных по гамма-лучам, представляется очевидным, что в контексте многоканальной астрономии установка LHAASO будет важным партнёром нейтринного телескопа Байкал-GVD (см. раздел 4).

3.4. "Ковёр" как детектор гамма-лучей

Первоначально установка "Ковёр" (см. раздел 2) предназначалась в основном для изучения космических лучей. Однако у неё также имеется интересная история исследований гамма-лучей, восходящая к 1980-м годам. Приводимое ниже изложение этой истории следует публикации Александра Лидванского [36].

В 1980-е годы значительные усилия астрономов, занимавшихся гамма-лучами сверхвысоких энергий, были инспирированы статьёй, опубликованной группой из Килья (Германия). Группа, работавшая со сцинтилляционной установкой, заявила о наблюдении сигнала от рентгеновского источника Лебедь X-3 в диапазоне многих ТэВ. Ирония истории состоит в том, что очевидно ошибочное (как выяснилось позднее) наблюдение в значительной степени стимулировало развитие гамма-астрономии. Сюда же относятся поиски, проводившиеся с помощью установки "Ковёр". Хотя никакого чёткого подтверждения результатов по Лебедю не было получено ни самой группой из Килья, ни во многих других экспериментах, ряд указаний на позитивный эффект поддерживал кампанию на плаву в течение нескольких лет. На установке "Ковёр" был получен верхний предел *постоянного* потока гамма-квантов от Лебедя X-3 при 10^{13} эВ, но была также обнаружена явная *вспышка* продолжительностью трое суток в направлении Лебедя [37]. Эта вспышка (14–16 октября 1985 г.) произошла через несколько суток после исключительно сильной радиовспышки на Лебедь X-3. Спустя некоторое время группа, работавшая на гамма-телескопе в Индии, объявила о наблюдении 10–12 октября сигналов от Лебедя X-3. В.С. Березинский предложил в [38] модель, объяснявшую значительную задержку между радиосигналом и гамма-сигналами высокой и сверхвысокой энергии в этом событии, однако ситуация, если её рассматривать в совокупности и с позиций сегодняшнего дня, так и не получила разрешения.

В 1989 г. группа "Ковёр" объявила о возможной вспышке в Крабовидной туманности с энергией ~ 100 ТэВ [39]. Эта вспышка, которая произошла 23 февраля 1989 г., была подтверждена группой Kolar Gold Field (KGF) в Индии. Две другие группы (Тянь-Шань (Советский Союз) и EAS-TOP (Италия)) также сообщили об определённых указаниях на повышение уровня сигнала. А.С. Лидванский резюмировал эту ситуацию в [36] следующим образом:

«Понятно, что [эти] результаты были встречены с некоторым недоверием: в то время вспышка такой большой энергии (сотни ТэВ) казалась слишком экзотической, в особенности от источника, который, хотя она была только что зарегистрирована черенковскими телескопами с энергиями в диапазоне ТэВ, служил образцом

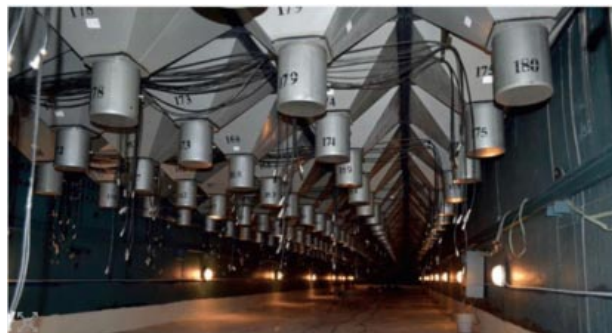


Рис. 12. Внутренний вид детектора "Ковёр".

стабильности (настолько, что в течение продолжительного времени он считался "стандартной свечой" для астрономии сверхвысоких энергий и рентгеновской астрономии). Однако много лет спустя вспышки от Крабовидной туманности были зарегистрированы спутниковыми гамма-телескопами AGILE и Fermi-LAT с энергиями в несколько сотен МэВ. Одна из вспышек, наблюдавшихся AGILE, имела временную структуру, полностью аналогичную структуре вспышки 23 февраля 1989 г. (с учётом единого масштабного фактора). Этот факт заставляет взглянуть на это со всей серьёзностью: в конечном счёте наблюдался сигнал от небесного источника с наибольшей когда-либо зарегистрированной энергией».*

Спустя более чем два десятилетия, в 2013 г., группа IceCube объявила об открытии диффузного потока космических нейтрино с энергией > 30 ТэВ и тем самым открыла новые перспективы для "Ковра" — поиск диффузных потоков гамма-лучей высокой энергии. Гамма-лучи должны рождаться вместе с нейтрино: нейтрино получались в распаде заряженных пионов, а гамма-лучи — в распаде нейтральных пионов.

Для улучшения разделения гамма-квантов и адронов площадь мюонного детектора (MD) "Ковра" будет увеличена с 175 м^2 ("Ковёр-2") до 410 м^2 , а на втором этапе — до 615 м^2 . Наземная установка будет расширена за счёт дополнительных детекторов, каждый из которых содержит девять сцинтилляционных счётчиков площадью 1 м^2 . К настоящему времени первый этап модернизации ("Ковёр-3" с площадью MD $\approx 410 \text{ м}^2$) завершён и MD готовятся к запуску. На рисунке 12 показан вид туннеля с мюонными детекторами.

Коллаборация "Ковёр" недавно опубликовала несколько статей, посвящённых поиску гамма-лучей с использованием установки "Ковёр-2", в частности поиску гамма-лучей в диапазоне энергий в несколько ПэВ, ассоциируемых с высокоэнергичными нейтринными событиями, наблюдавшимися в IceCube [40], поиску потоков диффузных гамма-квантов с энергией свыше 700 ТэВ [41] и гамма-лучей с энергией свыше 100 ТэВ в совпадении с сигналами HAWC и IceCube [42]. Все эти поиски привели только к установлению соответствующих верхних пределов. На рисунке 13 проводится сравнение эффективных площадей установок IceCube и "Ковёр-2" для гамма-лучей, усреднённых по Северному полушарию. Как вид-

* AGILE (от итал. Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero) — итальянская орбитальная обсерватория для наблюдения космического пространства в рентгеновском и гамма-диапазонах. Fermi-LAT — Fermi Large Area Telescope. (Примеч. ред.)

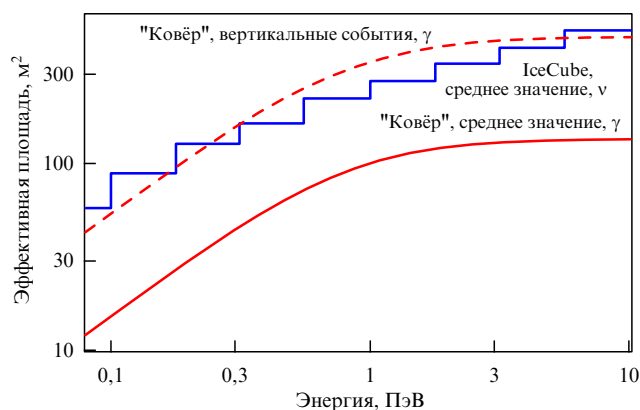


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Сравнение эффективных площадей установок "Ковёр-2" (красные кривые, детектирование фотонов) и IceCube (синяя ломаная, детектирование нейтрино, мюонные треки, среднее значение по Северному полушарию). Для "Ковра-2" сплошная кривая даёт среднее значение по полю зрения, а штриховая кривая соответствует вертикальным событиям. (Из работы [42].)

но, площадь установки "Ковёр-2" для вертикально направленных треков сравнима с эффективной площадью IceCube для нейтрино.

3.5. Сравнение LHAASO с установками "Ковёр" и TAIGA

Фантастически высокая чувствительность LHAASO затмевает возможности установок TAIGA и "Ковёр". Трудно оценить, в какой степени эти два детектора смогут конкурировать с LHAASO и как они смогут воспользоваться своими потенциальными возможностями. Одна из возможностей связана с переходными событиями, когда источник находится вне поля зрения LHAASO из-за его долготы. Другая возможность связана с охватом тех частей Северного полушария, которые находятся вне поля зрения LHAASO. Например, детектор TAIGA расположен на $\approx 23^\circ$ севернее LHAASO. Источник гамма-лучей в сверхновой Тихо Браге, почти недоступный для LHAASO, будет присутствовать в поле зрения установки TAIGA в течение 500 ч в год.

Как бы то ни было, ИЯИ вовлечён в захватывающее путешествие по многообещающей *terra incognita*.

4. Нейтринная астрономия

4.1. Зарождение

Вскоре после открытия в 1956 г. нейтрино Фредериком Райнесом и Клайдом Коуэном появились пионерские идеи относительно детектирования атмосферных и космических нейтрино. Первыми, кто детально изучил эти возможности, были М.А. Марков и его студент И.М. Железных, ставшие позднее сотрудниками ИЯИ. Железных в дипломной работе 1958 г. исследовал возможности детектирования атмосферных нейтрино под землёй. В 1960 г. Грейзен и Райнес обсуждали в статье, опубликованной в *Annual Review of Nuclear Science*, возможности создания и перспективы таких детекторов [43, 44]. В том же году на *Рочестерской конференции* 1960 года Марков представил свою революционную идею [45]: "устанавливать детекторы глубоко под водой в озере и в море и определять направление заряженных частиц с помощью

черенковского излучения"². Выход в водные глубины представлялся единственным способом создать детекторы объёмом более 10^4 т.

В 1960-х годах и начале 1970-х годов изучение атмосферных нейтрино представлялось столь же интересным, как и поиск космических нейтрино. Ожидалось, например, что атмосферные нейтрино помогут сделать выбор между четырёхфермионной моделью и взаимодействием юкавского типа на основе изучения энергетической зависимости нейтринных сечений. Первые надёжные вычисления потока атмосферных нейтрино были опубликованы в 1961 г. Марковым и Железных [46] и Зацепиным и Кузьминым [47] — все они впоследствии стали сотрудниками ИЯИ. В 1965 г. атмосферные нейтрино были открыты в глубоких шахтах в Южной Африке и Индии. В последующие десятилетия детекторы, расположенные на большой глубине под землёй, сыграют триумфальную роль в изучении атмосферных нейтрино и в открытии нейтрино от Солнца и сверхновой SN1987 A.

В этом победном шествии детектор BUST в Баксанской лаборатории был одним из пионеров. В 1970-е годы стало ясно, что разумная масса W-бозона слишком велика для того, чтобы приводить к заметному выполаживанию нейтринных сечений в ГэВ-ном диапазоне (на который был нацелен BUST ввиду того, что поток резко убывает с возрастанием энергии, а площадь BUST не очень велика). С другой стороны, гипотеза *нейтринных осцилляций* набирала популярность. При достаточно больших углах смешивания и соответствующих разностях масс осцилляции должны были приводить к дефициту атмосферных нейтрино, приходящих на Землю. По сути, установка BUST первой наложила ограничения на параметры осцилляций в течение первых лет сбора данных [48]. Ещё в 1981 г. коллаборация BUST опубликовала лучшее в мире ограничение на время жизни протона (однако этот рекорд продержался всего лишь полгода [49]). С начала 1980-х и до конца 1990-х годов установка BUST давала лучшие в мире ограничения на поток сверхтяжёлых монополей в диапазоне скоростей от $10^{-3}c$ до $10^{-1}c$ [50], до того как её обошла установка MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory) в лаборатории Гран-Сассо в Италии. На установке BUST были также получены важные ограничения на сечения взаимодействия слабозаимодействующих массивных частиц WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), которые могли бы накапливаться в центре Земли, аннигилировать друг с другом и порождать избыток нейтрино, движущихся вертикально вверх [51].

Однако для детектирования высокоэнергичных нейтрино от космических ускорителей подземные детекторы оказались слишком малы, что заставило вспомнить о предложении Маркова, и в 1973 г. начались первые обсуждения вопросов строительства больших подводных детекторов.

Эти дискуссии завершились легендарным проектом DUMAND (Deep Underwater Muon And Neutrino Detection). Г.Т. Зацепин был одним из его основателей от СССР. Согласно проекту 1978 года первая конфигурация должна была состоять из 22698 оптических модулей и

² В действительности Марков и Железных представили эту идею ещё несколькими месяцами ранее на конференции в Дубне и опубликовали её в трудах конференции (сообщение И.М. Железных).

охватывать объём $1,26 \text{ км}^3$ в соответствии с идеей о том, что "размер установки определялся исходя из сравнительно скудной информации об ожидаемых интенсивностях нейтрино и с трудом поддавался обоснованию". При этом, "по общему убеждению, поскольку сечение нейтрино мало, а нейтрино высоких энергий достаточно редки, то предпочтительнее иметь большой детектор" (цитируется по [52]). Предполагалось, что установка DUMAND будет развёрнута в океане вблизи Большого острова (Гавайи).

Советский Союз, который с самого начала принимал активное участие в проекте DUMAND, был представлен такими именами, как А.Е. Чудаков, В.С. Березинский, Л.Б. Безруков, Б.А. Долгошеин, А.А. Петрухин и И.М. Железных (первые три и последний из перечисленных являются сотрудниками ИЯИ). В 1979 г. одно из совещаний по проекту DUMAND состоялось в Хабаровске и на озере Байкал. Однако в связи с советским вторжением в Афганистан администрация Рейгана прекратила сотрудничество. Хотя Чудаков (вместе с американскими, японскими и европейскими коллегами) подписал открытое письмо от 26 июля 1980 г., в котором говорилось о создании управляющего комитета проекта DUMAND, было ясно, что России придётся искать собственный путь.

Несмотря на то что с этого момента усилия ИЯИ в области подводных детекторов сосредоточились на озере Байкал (см. раздел 4.2), небольшая группа под руководством И.М. Железных начала морские изыскания для проекта "Советский DUMAND". В 1989 г. они совершили круиз по Средиземному морю на советском судне "Менделеев" для определения подходящего места для нейтринного телескопа. Был протестирован прототип оптического модуля с четырьмя ФЭУ, укрепленными на титановом каркасе, и промерена зависимость потока мюонов от глубины до 3500 м [53]. Два года спустя в сотрудничестве с греческими коллегами на судне "Витязь" был протестирован прототип "этажа" NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research project) с десятью ФЭУ. Однако в связи с успешным началом работ на Байкале и техническими и финансовыми проблемами проекта NESTOR эта деятельность была прекращена.

4.2. Байкальский нейтринный телескоп: от полевых исследований до детектора НТ-200

Ещё в 1980 г. А.Е. Чудаков предложил использовать глубоководное озеро Байкал в качестве тестовой площадки для советского детектора DUMAND. Преимущества озера Байкал очевидны: оно является самым глубоким пресноводным озером на Земле; его максимальная глубина около 1700 м; оно знаменито чистотой и прозрачностью своих вод, а в конце зимы озеро покрыто толстым слоем льда, который позволяет устанавливать лебёдки и прочую тяжёлую технику и разворачивать оборудование для подводных работ без необходимости использования плавучих средств.

По предложению М.А. Маркова 1 октября 1980 г. в ИЯИ была создана *Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий*, которую возглавил теоретик Г.В. Домогацкий, а ведущим экспериментатором стал Л.Б. Безруков.

В 1981 г. начались первые эксперименты на мелководье с малыми ФЭУ. В качестве оптимального места для размещения детектора был выбран участок в южной части Байкала на расстоянии 3,6 км от берега и на глубине примерно 1370 м; позднее детектор должен был быть установлен на глубине примерно 1,0–1,1 км. Элементы детектора могли устанавливаться с ледяного покрытия в период с конца февраля по начало апреля и работать в течение всего года с управлением по кабелю, выходящему на берег.

После испытаний в 1982 г. с первыми подводными модулями с 15-сантиметровыми ФЭУ на следующий год в течение нескольких дней испытывалась небольшая гирлянда. В 1984 г. была установлена первая *стационарная* гирлянда ("Гирлянда-84"), которая зарегистрировала мюоны, движущиеся вниз [54]. Она состояла из трёх этажей ("связок"), каждый с четырьмя ФЭУ, установленными в двух выдерживающих повышенное давление цилиндрах, изготовленных из стекловолокна, армированного эпоксидной смолой. В то время в СССР не было стеклянных сфер, непроницаемых для воды под давлением. Торцы цилиндров закрывались плексигласовыми крышками (рис. 14а). Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-49

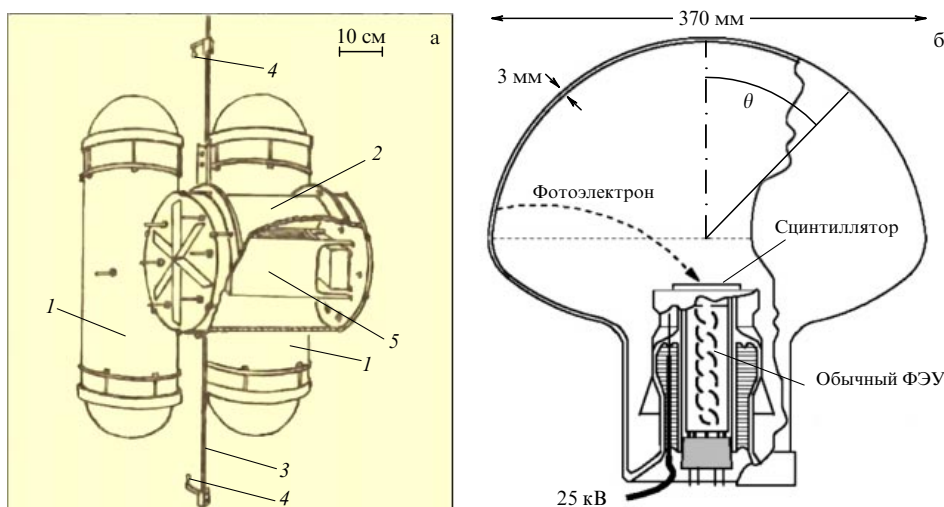


Рис. 14. (а) "Связка", использовавшаяся в "Гирлянде-86" с четырьмя ФЭУ в двух цилиндрах 1, покрытых плексигласовыми крышками. Модуль "рюкзак" 2 содержит электронику 5. Калибровочные светодиоды 4 закреплены на геофизическом кабеле 3. (б) Фотоэлектронный усилитель "Квazar-370".

относится к тому же типу, что и ФЭУ, используемые в установках BUST и "Ковёр"; он имеет плоский 15-сантиметровый фотокатод и невысокое временное и амплитудное разрешение.

За гирляндой, установленной в 1984 году, в 1986 г. последовала другая стационарная гирлянда ("Гирлянда-86"). Данные с этой гирлянды использовались для поиска медленных излучающих частиц, таких как магнитные монополи [55]. В типичных вариантах теории Великого объединения (Grand Unified Theory — GUT) предсказываются монополи с массами 10^{16} ГэВ и более. Типичные скорости этих монополей $v/c = 10^{-4} - 10^{-3}$. Монополи могут катализировать на своём пути распад барионов (эффект Рубакова – Челлена [56]), что может быть обнаружено по черенковскому свету от продуктов распада. "Гирлянда-86" состояла из шести этажей с очень большим шагом по вертикали, равным 50 м. Они были оптимизированы для детектирования треков нерелятивистских частиц, значительно более ярких, чем мюоны. Данные "Гирлянды-86" позволили наложить строгие ограничения не только на поток магнитных монополей с большим сечением катализа, но и на поток сверхтяжёлых солитонных (Q-balls) решений теорий поля, которые генерируют излучение такого же характера, что и монополи [57].

"Гирлянда-84" набирала данные в сумме в течение 50 сут, после чего затонула из-за протекания буйков, которые удерживали её в вертикальном положении. Кабельные вводы в эпоксидные цилиндры и герметические соединения крышек с цилиндрами также имели тенденцию к протеканию и являлись источником постоянной головной боли. Кроме того, было ясно, что используемые ФЭУ имеют слишком малые размеры и низкое быстродействие для нейтринного телескопа. Поэтому была разработана технология с использованием стеклянных сфер и фотодатчика нового типа. Л.Б. Безруков в сотрудничестве с новосибирской компанией "Экран" начал разработку эквивалентного российского устройства "Квазар" (рис. 146), представляющего собой гибридное устройство, аналогичное ФЭУ Philips-2600, разработанному для проекта DUMAND. Фотоэлектрон с катода диаметром 370 мм разгоняется напряжением 25 кВ и направляются на быстродействующий сцинтиллятор с большим коэффициентом усиления, находящийся вблизи центра стеклянной колбы. Свет от сцинтиллятора регистрируется небольшим обычным ФЭУ. "Квазар" обладает превосходным разрешением отдельного фотоэлектрона (1-PE-разрешение), обеспечивает чёткое различие импульсов 1-PE и 2-PE и имеет разброс по времени всего лишь в 2 нс при пренебрежимо малой чувствительности к магнитному полю Земли [58].

В 1987 г. Байкальский эксперимент был одобрен в качестве долгосрочного направления исследований Академией наук СССР и правительством СССР с выделением значительного финансирования. Полномасштабный детектор (всё ещё без чёткого определения его размеров) предполагалось создавать поэтапно на основе промежуточных детекторов возрастающего размера. Год спустя к Байкальскому эксперименту присоединилась моя группа из Института физики высоких энергий в г. Цейтене (Zeuthen) (ГДР). После объединения Германии в 1990 г. институт влился в DESY. Мы сразу же получили доступ к западным технологиям и обрели возможность предоставить стеклянные сферы немецкого производства и некоторую глубоководную арматуру для гирлянд, которые

были развёрнуты с 1991 по 1993 г. Одновременно с этим в сотрудничестве с промышленными предприятиями были разработаны российские сферы, а также вводы и арматура, которые выдерживают давление на глубине до 2 км, что недостаточно для экспериментов в океане, но вполне подходит для озера Байкал.

В 1989 г. была разработана предварительная версия того, что позднее было названо проектом НТ-200 — нейтринного телескопа, содержащего примерно 200 оптических модулей. Окончательная версия описания проекта была завершена в 1992 году [59]. На тот момент в нём участвовали группы из ИЯИ (Москва), Иркутского университета, МГУ, Морского технического университета (Санкт-Петербург), Политехнических институтов (Нижний Новгород и Томск), Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) (Дубна), Курчатовского института (Москва), Лимнологического института (Иркутск), DESY-Zeuthen (Германия) и Научно-исследовательского института атомной энергии Венгерской академии наук (KFKI) (Будапешт, Венгрия).

Установка НТ-200 (рис. 15а) представляет собой систему из 192 оптических модулей, закреплённых на восьми тросах, которые в свою очередь прикреплены к зонтичной раме, состоящей из семи кронштейнов, каждый длиной 21,5 м. Высота установки 72 м, её диаметр 43 м. Замечательной особенностью НТ-200 является прецизионно сбалансированная механическая часть, включающая в себя буи, якорные грузила и поворотные кронштейны. Механическая часть была разработана А.И. Панфиловым, который, к сожалению, ушёл из жизни во время зимней экспедиции в 2019 г. Оптические модули с ФЭУ "Квазар-370" попарно сгруппированы по длине троса. Для подавления случайных срабатываний от темнового шума и биолюминесценции каждая пара включена на совпадение. Калибровка по времени производилась с использованием нескольких азотных лазеров, установленных в герметичных стеклянных цилиндрах.

Создание детектора НТ-200 совпало по времени с распадом СССР и периодом экономических трудностей. Членов коллаборации и некоторых поставщиков из промышленных предприятий необходимо было поддерживать грантами из Германии; тем не менее многие высококвалифицированные экспериментаторы покинули коллаборацию и попытались найти средства существования в частном секторе. В течение трёх лет значительную часть продуктов питания для зимних кампаний на озере Байкал необходимо было приобретать в Германии и доставлять в Сибирь. Несмотря на эти трудности, группа российских физиков-энтузиастов героически продолжала работу по проекту.

В этой ситуации создание НТ-200 растянулось более чем на пять лет. Оно началось с развёртывания системы из трёх гирлянд с 36 оптическими модулями в марте-апреле 1993 г. Первые два мюона, движущиеся вверх, т.е. потенциальные нейтринные события, были выделены из данных 1994 года (рис. 16), в связи с чем Г.В. Домогацкий прислал мне факс следующего содержания:

"Дорогой Кристиан, сначала самое интересное: при анализе данных 1994 года одно событие категорически сопротивляется всем тестам, и, кажется, это нейтрино. Естественно, я не хотел бы решать, декларируем ли мы это событие как первое ясное нейтрино в подводном детекторе. Но это можно называть очень на нейтрино похожим событием, и мне кажется, что очень желательно

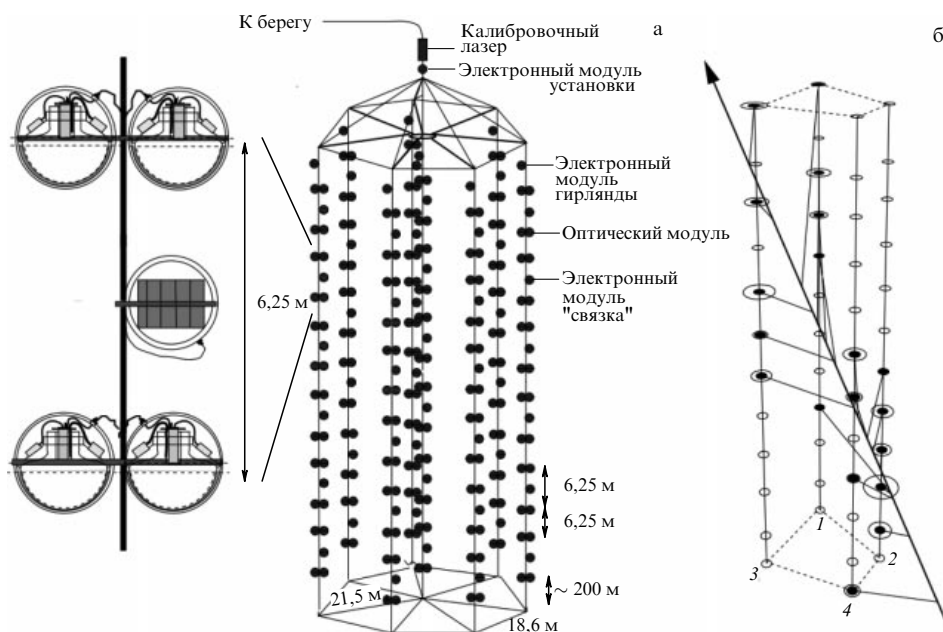


Рис. 15. (а) Байкальский нейтринный телескоп НТ-200. (б) Один из первых мюонов, движущихся вверх, из взаимодействия нейтрино, который был зарегистрирован вариантом детектора с четырьмя гирляндами в 1996 г. [60]. Черенковский свет от мюона был зарегистрирован в 19 каналах.

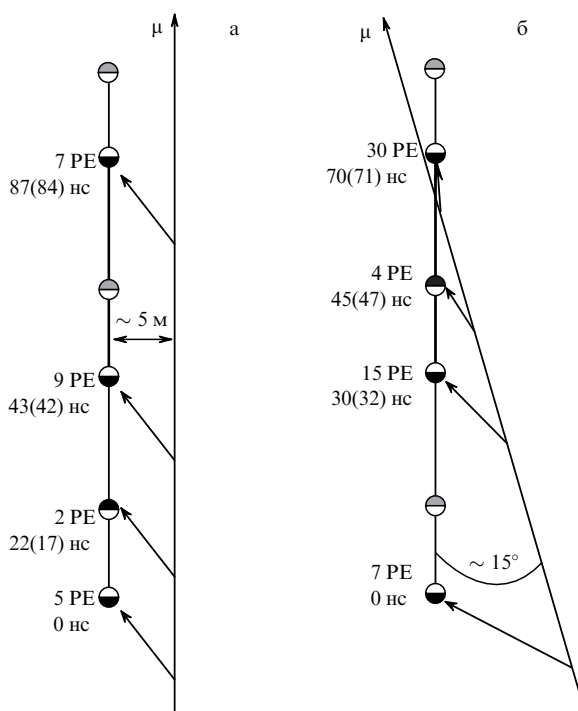


Рис. 16. Два нейтринных кандидата из НТ-36. Сработавшая пара ФЭУ (каналы) отмечена чёрным цветом. Числа показывают измеренные амплитуды (в единицах количества фотоэлектронов) и время по отношению к первому сработавшему каналу. Значения времени в скобках являются величинами, ожидаемыми для мюона, движущегося вверх вертикально (а), и движущегося вверх мюона, который проходит мимо гирлянды под углом 15° (б) [61].

сообщить об этом через 2 или 3 недели достаточно широкой общественности".

Установка НТ-36, несмотря на малость её размеров, была первым подводным детектором, который позволял производить трёхмерное восстановление мюонных тре-

ков, и первым детектором, способным выделять возможных кандидатов на роль мюонов, движущихся вверх, из нейтринных взаимодействий. В 1996 г. использовалась установка из 96 оптических модулей с четырьмя гирляндами НТ-200 [60], которая позволила выделить очень чёткие "хрестоматийные" нейтрино, подобные показанным на рис. 15б.

Детектор НТ-200 был завершён в апреле 1998 г. [62] и набирал данные до 2008 г. Основные компоненты были разработаны и произведены в России — в первую очередь механика детектора, оптический модуль (ОМ), подводная электроника и кабельное хозяйство. Все компоненты нероссийского происхождения были получены от DESY: лазерная система калибровки времени, батарея транспьютеров в береговой станции для быстрой обработки данных и специальный подводный триггер, разработанный для регистрации медленных и очень ярких частиц (таких как монополи GUT).

Малое расстояние между модулями в НТ-200 обуславливает довольно низкий энергетический порог, 15 ГэВ, для детектирования мюонов. За более чем пять лет было накоплено примерно 400 событий с мюонами, движущимися вверх. Это сравнительно небольшое число является следствием большого числа сбоев отдельных каналов в течение года. Тем не менее НТ-200 смог в течение некоторого времени³ конкурировать с гораздо более крупным детектором AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array), проводя поиски высокоэнергетичных каскадов под НТ-200 и сканируя объём, в десять раз превосходящий объём самого НТ-200 [63, 64] (рис. 17). Для улучшения распознаваемости событий в этих исследованиях в 2005–2006 гг. детектор НТ200 был окружён тремя внешними гирляндами с редко расставленными приборами (по шесть пар оптических модулей на гирлян-

³ Геометрический объём НТ-200 всего лишь $\sim 10^{-4}$ км³, для сравнения объём установки AMANDA 0,015 км³.

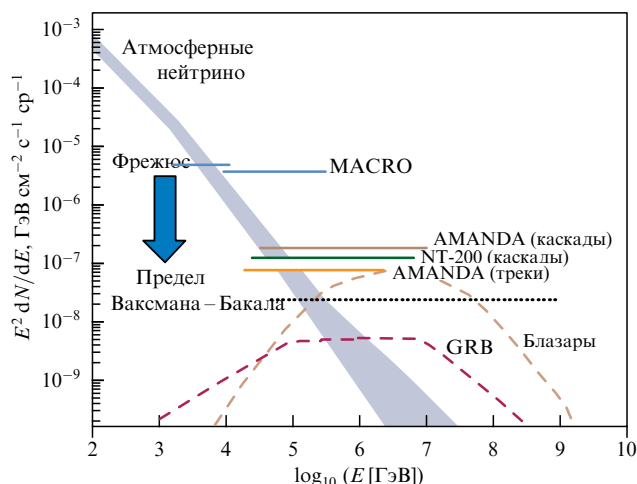


Рис. 17. Экспериментальные ограничения на диффузный поток нейтрино по состоянию на 2003 г. в сравнении с теоретическими верхними ограничениями и модельными предсказаниями. (См. подробности в тексте.)

ду). Такая конфигурация, названная NT-200+, страдала от ряда проблем (связанных как с новыми гирляндами, так и с уже устаревшим к тому времени самим детектором NT-200), так что ни удовлетворительной статистики, ни каких-либо впечатляющих результатов от неё не было получено. С другой стороны, она послужила полигоном для ряда концепций передачи данных, которые позднее были реализованы в проекте Байкал-GVD.

Детектор NT-200 установил верхние пределы потока нейтрино от аннигиляции тёмной материи в центре Земли и на Солнце, потока релятивистских монополей [65] и потока нейтрино от гамма-вспышек в Южном полушарии. Наиболее строгие ограничения были получены на диффузный поток космических нейтрино.

На рисунке 17 представлена ситуация с верхними пределами диффузных потоков нейтрино по состоянию на 2003 г. К тому времени детекторы AMANDA и NT-200 уже совершили огромный скачок в установлении ограничений — на $\sim 1^{1/2}$ порядка величины по сравнению с ограничениями, установленными подземными детекторами (детектором Подземной лаборатории Модан в тоннеле Фрежюс (Frejus) и MACRO). Ограничения приблизились к весьма оптимистическим модельным предсказаниям, как это видно для блазаров (т.е. активных галактических ядер, струи от которых направлены на Землю). Найденные ограничения несколько превышали теоретическое верхнее ограничение, установленное В.С. Березинским на основании данных по гамма-лучам низких энергий (не показано на рисунке), но были всё ещё в два-три раза выше предела Ваксмана–Бакала, полученного на основе данных по космическим лучам. Как отмечалось выше, результаты установки NT-200 могли конкурировать с ранними результатами AMANDA благодаря способности NT-200 "заглядывать" за пределы своего геометрического объёма (такая возможность существует только в воде благодаря слабому рассеянию света по сравнению с таковым во льду). Несколько лет спустя в соревнование вступил детектор ANTARES в Средиземном море, а кроме того, появились первые данные IceCube, так что к концу десятилетия ограничения, установленные NT-200, потеряли своё значение.

4.3. Окно открывается: IceCube

Детектор IceCube можно считать реализацией первоначального плана DUMAND — объём IceCube составляет 1 км^3 . IceCube состоит из 86 гирлянд, каждая из которых содержит по 60 оптических модулей, установленных в ледяном щите толщиной 3 км на географическом Южном полюсе. Предшественник IceCube — детектор AMANDA — имел высоту 0,5 км и диаметр 200 м. Группа DESY присоединилась к проекту AMANDA в 1994 г., продолжая по-прежнему активно участвовать в Байкальском эксперименте. Одной из причин для принятия такого решения была непредсказуемость ситуации, как политической, так и экономической, в России, поэтому нам требовалась вторая база. Установка AMANDA была развёрнута в 1995–2000 гг. и набирала данные до 2008 г. Однако в связи с появлением предела Ваксмана–Бакала (установленного в 1998 г.) стало ясно, что потенциал открытий для детектора с объёмом всего лишь $0,015 \text{ км}^3$ близок к нулю и установку AMANDA следует рассматривать лишь как прототип более крупного детектора. Такой детектор — IceCube — был построен в период с 2004 г. по 2010 г.

Лишь в 2012 г. были обнаружены два первых события, которые с большой вероятностью имели астрофизическое происхождение, — оба с энергией порядка 1 ПэВ. Оба события имели характер каскадов. Одно из них с восстановленной энергией 1,14 ПэВ показано на рис. 18. При усовершенствованном анализе (также сосредоточенном на событиях типа каскада) могут быть выделены около 20 других кандидатов на роль космического нейтрино [66]. Состоялось столь долгожданное открытие космических нейтрино высоких энергий! Тем временем число событий-кандидатов возросло почти до ста. Кроме того, было обнаружено аналогичное число событий типа треков, вероятно, космического происхождения. На рисунке 18 (взятом с изменениями из [67]) показаны энергетические спектры, построенные на основе событий типа каскадов и типа треков.

Величина потока при энергии 100 ТэВ почти насыщает предел Ваксмана–Бакала. Наклон зависимости на рис. 18 намного круче обычной E^{-2} -зависимости, ожидаемой из данных ускорителя Ферми. Различие в наклонах для событий типа каскадов и типа треков ещё не нашло объяснения и требует привлечения данных от других детекторов.

К настоящему времени на IceCube получены веские указания на существование нескольких точечных источников, однако ни один из них ещё не может считаться "неоспоримым" открытием. Детектор расположен на Южном полюсе и, если считать Землю фильтром, в основном "видит" Северное полушарие. В такой ситуации существует необходимость в детекторах, расположенных в Северном полушарии, которые могли бы просматривать южную часть небосклона и центральные части Галактики. Кроме того, для поиска точечных источников требуются детекторы с более высоким угловым разрешением (т.е. в воде, а не во льду). И последнее по очереди, но не по значению замечание: для разрешения загадки с различием наклонов для событий с различной топологией требуются эксперименты со взаимодополняющей систематикой. Два таких детектора сейчас строятся: Байкальский нейтринный телескоп гигатонного объёма (GVD) на озере Байкал и KM3NeT (Cubic Kilometre Neutrino Telescope) в Средиземном море.

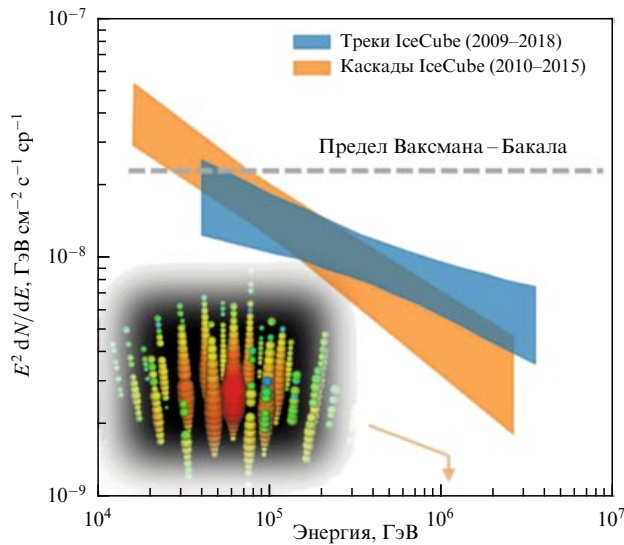


Рис. 18. (В цвете онлайн.) Энергетическая зависимость потока космических нейтрино dN/dE , умноженного на квадрат энергии E . Зависимости с коридорами ошибок показаны отдельно для событий типа треков и типа каскадов. На вставке в нижнем левом углу показано одно из двух первых событий в ПэВ-ном диапазоне. Каждая сфера показывает сработавший ФЭУ, её диаметр соответствует величине амплитуды сигнала, а цвет указывает на его время (красный — раннее событие, жёлтый — позднее).

4.4. Байкальский подводный нейтринный телескоп гигатонного объёма

К 2008 г., когда детектор НТ-200 исчерпал свой разумный срок службы, коллаборация "Байкал" приступила к разработке концепции детектора километрового масштаба, который первоначально был назван НТ-1000, а позднее переименован в GVD (Gigaton Volume Detector). Предполагалось, что GVD будет состоять из независимых модулей, так называемых кластеров, каждый из которых будет содержать по восемь гирлянд. Создатели детектора отказались от "Квазара" в пользу значительно более удобного в применении обычного 10-дюймового ФЭУ фирмы "Хамамацу". Долгосрочные полевые испытания с короткими гирляндами были проведены в 2008 г. и в

последующие годы [68]. В 2011 г. был развёрнут малый прототип кластера. Год за годом выявлялись и устранялись слабые места, и в итоге в 2016 г. был развёрнут первый почти полномасштабный кластер. В знак признания необычайно важной роли дубненского ОИЯИ кластеру присвоили наименование "Дубна".

На каждой гирлянде GVD находятся 36 оптических модулей, в каждом из которых размещён "смотрящий" вниз 10-дюймовый ФЭУ вместе с модулями электроники и различными датчиками. Оптические модули установлены с шагом по вертикали 15 м, что даёт длину инструментальной гирлянды 525 м. Гирлянды образуют семиугольник диаметром ≈ 120 м с одной центральной и семью периферическими гирляндами. Кластеры также образуют шестиугольную структуру с расстоянием между центрами кластеров ≈ 300 м. В промежутках между кластерами находятся дополнительные гирлянды, оснащённые только мощными импульсными лазерами. Они используются для калибровки детекторов и изучения распространения света. Схема детектора оптимизирована для измерения астрофизических нейтрино в диапазоне энергий от нескольких ТэВ до нескольких ПэВ.

Первый кластер Байкал-GVD был развёрнут в 2016 г. В 2017 и 2018 гг. добавлялся один новый кластер, затем два кластера были добавлены в 2019 г., ещё два — в 2020 г. и один добавлен в 2021 г. По состоянию на апрель 2021 г. детектор состоял из восьми кластеров, которые охватывают объём воды $\approx 0,4$ км³. Текущий план строительства на период 2022–2024 гг. предусматривает развёртывание шести дополнительных кластеров. На рисунке 19 схематически представлены конфигурация детектора 2021 г. и устройство одного кластера.

Детектор GVD отличается от НТ-200 не только размером. Более важно то, что уровни надёжности старого и нового детекторов разделяет пропасть — благодаря усовершенствованной конструкции электронных и механических компонентов, строгому контролю качества и широкомасштабному тестированию в лабораторных условиях. В настоящее время уровень сбоев всё ещё выше, чем у детекторов IceCube и даже ANTARES, однако возможность зимой поднять на поверхность и отремонтировать неисправный компонент перевешивает этот недостаток.

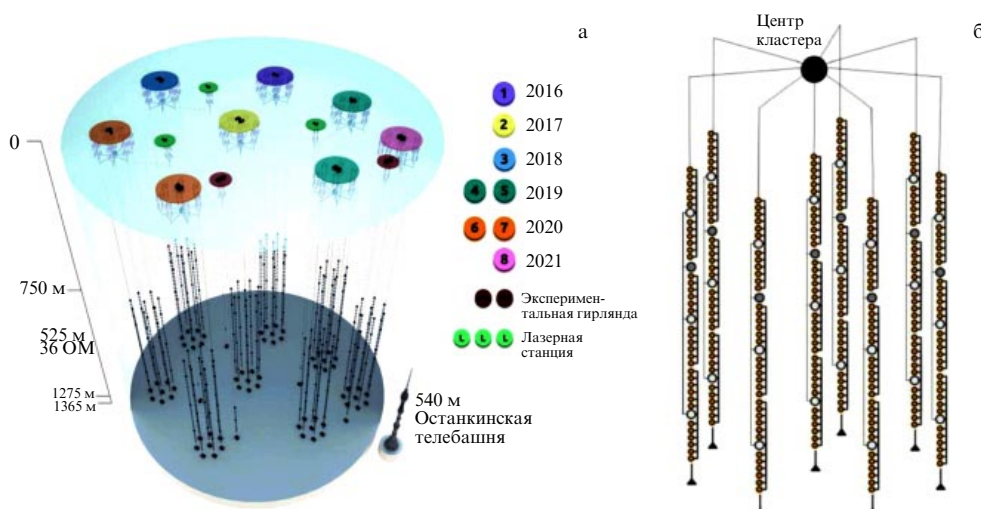


Рис. 19. (В цвете онлайн.) (а) Схематическое представление детектора Байкал-GVD [69]. Ежегодный прогресс в развёртывании детектора показан условными обозначениями. (б) Устройство кластера Байкал-GVD (изображение сжато по вертикали для большей наглядности деталей).

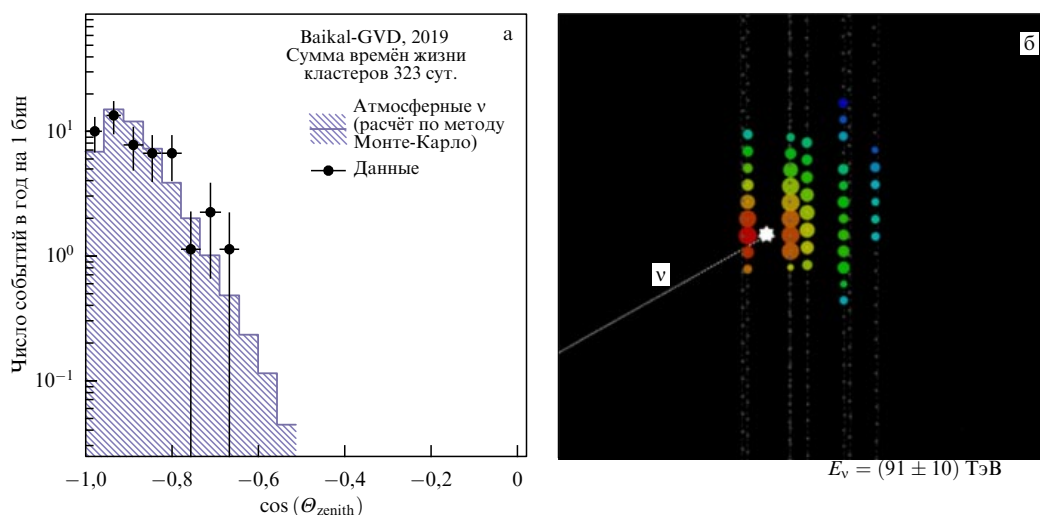


Рис. 20. (В цвете онлайн.) Предварительные результаты GVD. (а) Распределение по зенитному углу 44 направленных вверх нейтринных событий типа трека, полученное при суммарной по всем кластерам длительности измерений (сумме "времен жизни" всех кластеров), равной 323 сут в 2019 г. (б) Направленный вверх каскад с 35 сработавшими ФЭУ и восстановленной энергией (91 ± 10) ТэВ.

Если в проекте НТ-200 в значительной степени доминировал ИЯИ, то создание детектора GVD не стало бы реальностью, если бы ОИЯИ не взял на себя сравнимую роль в построении детектора и финансировании. ОИЯИ отвечает за сборку оптических модулей, набор данных и активизирует своё участие в анализе данных. Кроме того, уверенное расширение береговой станции было бы невозможным без поддержки со стороны ОИЯИ.

Вследствие концентрации усилий на построении детектора проект всё ещё несколько отстаёт от показателей, которых могла бы добиться коллаборация с более значительными людскими ресурсами. Однако первые результаты вскоре должны увидеть свет. На рисунке 20а показано распределение по зенитному углу 44 треков от нейтринных взаимодействий, направленных практически вертикально вверх [69, 70]. Их число и угловое распределение прекрасно согласуются с результатами моделирования взаимодействий атмосферных нейтрино по методу Монте-Карло. Атмосферные нейтрино являются "эталоном" для понимания работы детектора, так что эти первые результаты не следует недооценивать. Другой важный результат основывается на проверенной стратегии поиска высокоэнергичных каскадов с энергией в несколько ТэВ и выше. На рисунке 20б показан дисплей каскадного события, в котором выделилась энергия (91 ± 10) ТэВ. Каскад направлен снизу вверх, что исключает его интерпретацию как события тормозного излучения (незарегистрированного мюона, движущегося вниз). При таких энергиях вероятность того, что событие имеет атмосферную природу, составляет всего лишь 1/3, т.е. событие, скорее всего, отражает взаимодействие космического нейтрино [71].

Заметным событием прошлых лет стало слияние двух нейтронных звёзд, обнаруженное в 2017 г. по испускаемым ими гравитационным волнам, — событие GW170817, которое произошло в галактике NGC4993. В 2017 г. в рабочем состоянии находились два GVD-кластера. На рисунке 21 [72] показаны ограничения на потоки нейтрино, полученные из данных GVD, в сравнении с аналогичными пределами ANTARES и IceCube. В анализе использовались только данные по каскадам. В на-

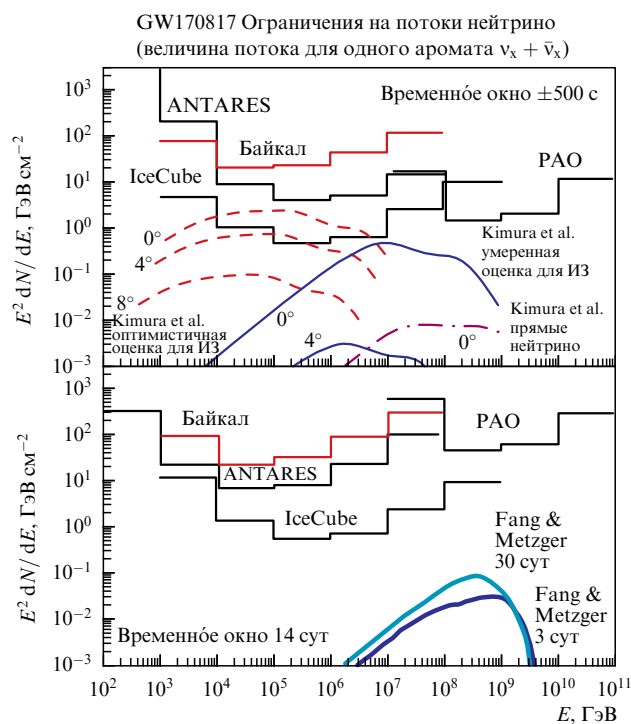


Рис. 21. (В цвете онлайн.) Верхние пределы на уровне достоверности 90 % потоков нейтрино, ассоциируемых с событием GW170817, для мгновенного излучения и испускания с задержкой (ИЗ). Данные детектора "Байкал" получены в конфигурации, которая составляет всего лишь четверть от развернутой в настоящее время, и включают в себя только каскадные события. Пределы сравниваются с различными предсказаниями (см. детали в [72]).

стоящее время при наличии восьми кластеров и предположении, что будут использоваться данные не только по каскадам, но и по трекам, ограничения GVD приблизились бы к пределам от IceCube.

Настоящая статья посвящена истории, а не анализу будущих перспектив. Тем не менее я не могу не процитировать то, что я написал в научно-популярной статье в 2000 г.: "Неясно, будет ли Байкальский телескоп вести главную партию или окажется всего лишь второй скрип-

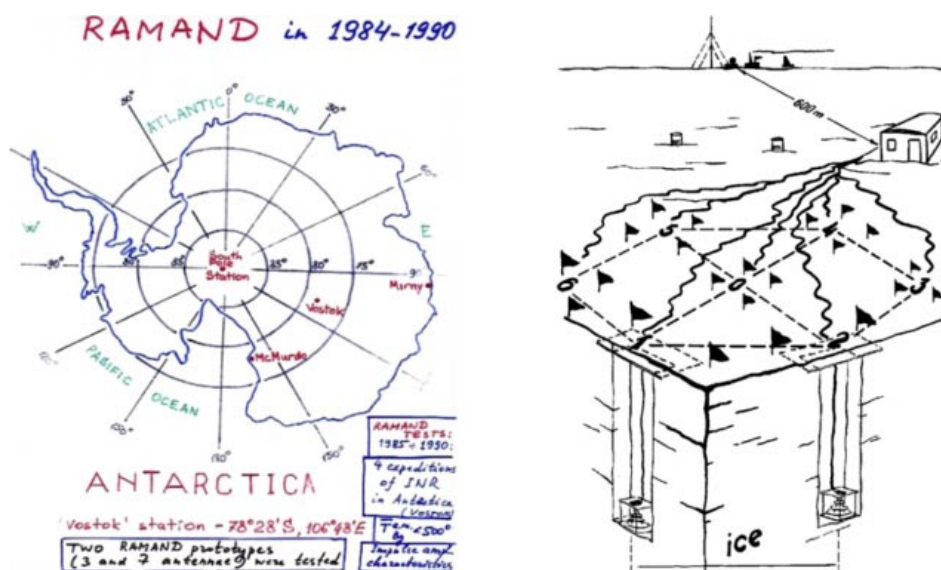


Рис. 22. Расположение и концепция нейтринного детектора RAMAND (слайды И.М. Железных). Установка RAMAND должна была целиком состоять из большой системы радиоантенн, установленных на умеренных глубинах.

кой в концерте будущих больших нейтринных телескопов".

Сейчас мы знаем ответ: заглавная партия будет и за ним!

4.5. Радиодетектирование и акустическое детектирование нейтрино

Регистрация нейтрино с помощью черенковского света, испускаемого вторичными частицами, по-видимому, является наилучшей методикой в диапазоне энергий до ~ 10 ПэВ. Однако спектры космических нейтрино от активных ядер галактик и их струй могут простираться до значительно более высоких энергий. Более того, ожидаются нейтрино от взаимодействия протонов с 3К-реликтовым излучением. Такое "ГЗК-взаимодействие" [14, 15] порождает нейтрино с энергиями свыше 100 ПэВ [73].

Для более высоких энергий необходимо применять альтернативные методы. Причина состоит в ограниченности расстояния, на которое видимый свет распространяется в воде и льду. Технологии, предназначенные для более высоких энергий, должны использовать сигналы, радиус затухания которых составляет несколько километров, и обеспечивать наблюдение за объемами, которые намного превосходят типичные показатели оптических нейтринных телескопов. В этих методах используются радиосигналы или акустические сигналы, испускаемые каскадами частиц с экстремально высокими энергиями.

Когерентное черенковское излучение испускается на радиочастотах электромагнитными каскадами. Этот эффект был предсказан в 1962 г. Г.А. Аскаряном [74]. Электроны "замечаются" в развивающийся ливень, который приобретает ненулевой электрический заряд благодаря добавленным оболочечным электронам. Этот заряд распространяется как релятивистский диск толщиной 1 см и диаметром 10 см. Каждая частица испускает черенковское излучение, причём суммарный сигнал является свёрткой перекрывающихся черенковских конусов. Если длина волны превосходит диаметр каскада, то возникает когерентность и сигнал возрастает пропорционально E_V^2 .

Ожидается, что акустические сигналы будут испускаться высокоэнергичными каскадами, выделяющими энергию в среде через ионизационные потери, которые немедленно превращаются в тепло. Этот эффект приводит к быстрому расширению с генерацией биполярного акустического импульса с шириной в воде или льду в несколько десятков микросекунд. Данный эффект был предсказан в 1957 г. также Г.А. Аскаряном [75]. Группа И.М. Железных активно занималась инновационными методами такого рода с 1970-х годов. Здесь следует упомянуть работы по регистрации нейтрино с помощью радиодетектора нейтрино в Антарктике (проект RAMAND — Radio Antarctic Muon And Neutrino Detector), гидроакустическому детектированию нейтрино и по регистрации нейтрино с помощью радиотелескопов (проект RAMHAND — Radio Astronomical Method of Hadron And Neutrino Detection).

Группа Железных первой предложила в 1984 г. использовать когерентные радиоволны в качестве экспериментальной методики регистрации космических нейтрино. Ею также были проведены первые экспериментальные исследования и заложены основы для развития радиоволновых детекторов нейтрино [76, 77]. Проводимые группой исследования включали измерения на станции "Восток" в Антарктиде, в частности определение температурного профиля льда до глубины 2 км и измерение частотной и температурной зависимостей поглощения радиоволн во льду. В период между 1985 г. и 1990 г. в пилотном эксперименте RAMAND [78, 79] (рис. 22) были протестированы многие аспекты радиорегистрации нейтрино на станции "Восток", включая критически важные первоначальные измерения естественного и искусственного фона радиоимпульсов в Антарктиде. К сожалению, эти первые работы были прерваны в 1991 г. вследствие развала Советского Союза.

Эта пионерская концепция была реализована в 1995 г. на станции "Амундсен-Скотт" в виде антенной системы среднего размера под названием RICE (Radio Ice Cherenkov Experiment) [80]. В последние годы две коллаборации развернули прототипы детекторов для будущей

установки площадью $\sim 100 \text{ км}^2$ на ледяном шельфе Росса и на Южном полюсе. Предполагается, что этот детектор станет частью IceCube-Gen2, будущего детектора объёмом 8 км^3 , покрытого оптическими детекторами и встроенного в систему радиоантенн площадью 100 км^2 .

Гидроакустический метод изучался начиная с первых дней проекта DUMAND. В ходе плавания на судне "Витязь" в 1991 г. [81] исследователи из ИЯИ провели серию гидроакустических измерений (проект SADC (Sea Acoustic Detector of Cosmic Objects) [82]). Они также сделали попытку использовать бывшие военные гидроакустические системы для тестовых исследований. Одной из таких установок была система из 2400 гидрофонов, размещённая около побережья Камчатки, а другая установка — система из 132 гидрофонов — находилась в Чёрном море [82]. По соображениям безопасности и финансовым причинам, а также ввиду того что в Средиземном море основные усилия были направлены на метод оптической регистрации, эти проекты не были реализованы. Наиболее продвинутым проектом гидроакустического детектирования был детектор SPATS (South Pole Acoustic Test Setup), развёрнутый на Южном полюсе в качестве подпроекта DESY/Zeuthen в рамках IceCube. По результатам проекта были опубликованы три статьи в рецензируемых журналах, но он был свёрнут, поскольку длина затухания света оказалась меньше ожидаемой, а энергетический порог оказался слишком высоким (см., например, [83]). Вместо этого коллаборация IceCube теперь сосредоточила усилия на регистрации радиоволн при энергиях $> 10 \text{ ПэВ}$.

Третий из упомянутых методов стал известен под названием RAMHAND. В 1980-е годы группа ИЯИ вместе с исследователями из Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) предложили использовать Луну в качестве гигантской мишени, а наземные телескопы — для регистрации длинноволнового "хвоста" черенковских вспышек от взаимодействия нейтрино в лунном реголите [84]. Этот метод был затем применён на нескольких радиотелескопах по всему миру, включая телескоп в г. Калязине (Россия) [85], который наложил ограничения на потоки в диапазоне энергий 10^{20} эВ .

5. Заключение

Институт ядерных исследований имеет славную историю развития физики космических частиц высоких энергий. Многие фундаментальные идеи в этой области были сформулированы исследователями из ИЯИ, включая концепцию подводной регистрации нейтрино, концепцию использования черенковских детекторов для гамма-астрономии, определение обрезания потоков космических лучей при высоких энергиях и расчёт соответствующих потоков нейтрино, установление верхней границы диффузного потока нейтрино, радиорегистрацию нейтрино во льду и с помощью радиотелескопов. Благодаря детекторам, установленным в Баксанской долине и на озере Байкал, ИЯИ является пионером и в экспериментальных исследованиях в этой области.

ИЯИ также имеет хорошие позиции в будущей физике высокоэнергичных космических частиц и, в частности, в трёх важнейших проектах: Байкал-GVD является одним из трёх в мире телескопов нейтрино высоких энергий и крупнейшей в настоящее время установкой такого рода в Северном полушарии. Установка Telescope Array

вместе с Обсерваторией им. Пьера Оже задаёт рубежи в физике космических лучей очень высоких энергий. И последнее по списку, но не по значимости: обсерватория LHAASO в Китае может совершить квантовый скачок в гамма-астрономии. Участия в одних лишь указанных проектах достаточно для того, чтобы обеспечить ИЯИ ведущую роль в многоканальных наблюдениях.

Желаю моим коллегам из ИЯИ предстоящих захватывающих лет работы и успехов в построении карты космоса высоких энергий.

Благодарности. Я признателен Г.В. Домогацкому, А.С. Лидванскому, В.А. Рубакову, Г.Т. Рубцову, Ю.В. Стенькину, С.В. Троицкому и И.М. Железным за полезные замечания и поправки к тексту статьи. Я благодарю своих коллег по коллаборации "Байкал" за участие в моих первых шагах в области нейтринной астрономии и дружбу, которая продолжается уже 33 года.

6. Приложение. О солнечных нейтрино и нейтрино от сверхновых

Настоящая статья посвящена истории, достижениям и планам ИЯИ в области физики космических частиц *высоких энергий*. В эту тематику не входят нейтрино, образующиеся в термоядерных процессах (такие, как нейтрино от Солнца) или в термических процессах (такие, как нейтрино от вспышек сверхновых). И в этой области исследований, находящейся на передовых рубежах науки, ИЯИ есть чем гордиться. В связи с этим необходимо сделать небольшое дополнение относительно роли ИЯИ в физике солнечных нейтрино и нейтрино от сверхновых.

Дата 23 февраля 1987 г. отмечена открытием сверхновой SN1987 A — первой сверхновой в столетии, которая расположена достаточно близко для того, чтобы породить измеримый нейтринный сигнал на Земле. Группа Е.Н. Алексеева на установке BUST объявила о наблюдении пяти событий с кандидатами на нейтрино от SN1987 A [86], которые по времени совпали с наблюдениями в детекторе Kamiokande (Япония) и IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven experiment) (США) [87, 88]. Две дюжины нейтрино, зарегистрированных в 7:35 UT этими тремя детекторами, стали настоящим "Клондайком" для физики элементарных частиц и физики сверхновых (масса нейтрино, его время жизни, магнитный момент и заряд, температура внутри нейтронной звезды и т.п.).

Между тем в 2:52 UT, примерно на 4,5 ч раньше момента одновременной регистрации сигналов на установках Kamiokande, IMB и BUST, детектор LSD (Liquid Scintillation Detector) зарегистрировал другой избыток нейтрино [89]. Установка LSD, расположенная под Монбланом, использовалась российско-итальянской коллаборацией, ведущую роль в которой играла группа из ИЯИ под руководством О.Г. Ряжской. Вероятность наблюдения избытка в пять событий в течение 7 с крайне мала. Были предложены изощрённые модели "двойного взрыва", которые должны были объяснить тот факт, что как ни один из трёх первых экспериментов не наблюдал значительного превышения числа нейтрино в 2:52 UT, так и LSD не наблюдал избытка нейтрино в 7:35 UT [90–92], однако вопрос о механизме, лежащем в основе явления SN1987A, по-прежнему открыт.

Преемник LSD был установлен в лаборатории Гран-Сассо в Италии, и здесь, как и ранее, группа ИЯИ является ведущим партнёром. Детектор большого объёма, названный LVD (Large Volume Detector), заполнен 1000 т жидкого сцинтиллятора (в 11 раз больше, чем в LSD, и в пять раз больше, чем в BUST). Первоначальная задача LVD состояла в регистрации нейтрино от сверхновых. К сожалению, с 1992 г., когда LVD начал работу, галактические сверхновые не возникали, однако LVD смог установить жёсткое верхнее ограничение на скорость коллапса ядра и количество несостоявшихся взрывов сверхновых на расстояниях до 25 кпк (примерно один раз в десятилетие [93]).

Экспериментом SAGE в Баксанской нейтринной лаборатории [94, 95] руководил В.Н. Гаврин. Этот эксперимент проводился для измерения сечения захвата солнечных нейтрино в реакции $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$. Наряду с экспериментом GALLEX (Gallium Experiment) [96] в лаборатории Гран-Сассо это был первый эксперимент с чувствительностью к реакции слияния протонов $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, в которой генерируется большая часть энергии Солнца и которая почти не зависит от деталей солнечной модели. В установке SAGE содержится примерно 57 т галлия, в GALLEX — 30 т. Детектор SAGE начал сбор данных в 1990 г., GALLEX — в 1991 г. Эксперимент SAGE завершился примерно два года назад, а GALLEX (и соответственно его второй этап GNO (Gallium Neutrino Observatory)) был закрыт в 2003 г. Результаты обоих экспериментов подтвердили, что дефицит солнечных нейтрино обусловлен не некорректностью модели Солнца, а нейтринными осцилляциями (оставив при этом маленький шанс для механизма распадов нейтрино, возможность которых была закрыта в эксперименте SNO (Sudbury Neutrino Observatory) в 2001 г.).

Результаты физики солнечных нейтрино при энергиях выше энергии реакции pp невозможно понять без учёта эффекта Михеева–Смирнова–Вольфенштейна (Mikheyev–Smirnov–Wolfenstein — MSW). В 1978 г. Л. Вольфенштейн показал, что параметр осцилляции нейтрино изменяется в веществе [97]. В 1985 г. С.П. Михеев и А.Ю. Смирнов (оба сотрудники ИЯИ) обнаружили, что при уменьшении плотности материи (по пути следования сгенерированных в центре Солнца нейтрино, движущихся наружу) смешивание нейтрино может усиливаться резонансным образом [98, 99]. Этот эффект проявляется наиболее сильно для ${}^8\text{B}$ -солнечных нейтрино и отсутствует для pp -нейтрино.

Методика Ga–Ge, которая с успехом использовалась для изучения солнечных нейтрино, в настоящее время применяется в эксперименте BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions), в котором будет исследоваться возможное существование четвёртого (стерильного) нейтрино [100]. Долгосрочные планы Баксанской лаборатории связаны с огромным детектором с жидким сцинтиллятором, который будет в основном предназначен для изучения геонейтрино и солнечных нейтрино.

Перевод с английского М.Ж. Шматиков

Список литературы

1. Alekseev E N, Alexeyeva L N, Chudakov A E, in *Proc. 16th ICRC, Kyoto, 1979* Vol. 10, p. 276
2. Alexeyev E N et al., Preprint No. 853/94 (Moscow: INR, 1994)
3. Алексеев Е Н и др. *Изв. АН СССР* **38** 1097 (1974)

4. Chudakov A E et al., in *Proc. 17th ICRC, Paris* Vol. 6 (1981) p. 183
5. Lidvansky A S *EPJ Web Conf.* **208** 15003 (2019)
6. Бакатанов В Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **48** 121 (1988); Bakatanov V N et al. *JETP Lett.* **48** 129 (1988)
7. Bakatanov V N et al., in *Proc. 21st ICRC, Adelaide* Vol. 9 (1990) p. 375
8. Bogdanov A G et al. *Astropart. Phys.* **36** 224 (2012)
9. Bakatanov V N et al. *Astropart. Phys.* **12** 19 (1999)
10. Верешков Г М и др. *Ядерная физика* **66** 591 (2003); Vereshkov G M et al. *Phys. Atom. Nucl.* **66** 565 (2003)
11. Petkov V B, in *Proc. of the 31st Intern. Cosmic Ray Conf., July 07–15, 2009, Lodz, Poland* (Lodz, 2010) p. 127; arXiv:0911.5679
12. Abu-Zayyad T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **689** 87 (2013)
13. Tokuno H et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **676** 54 (2012)
14. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **4** 114 (1966); Zatsepin G T, Kuzmin V A *JETP Lett.* **4** 78 (1966)
15. Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
16. Abbasi R U et al., arXiv:1801.07820
17. Ivanov D et al. (Telescope Array Collab.) *PoS ICRC2019* 298 (2019); in *36th ICRC, Madison* (2019)
18. Abbasi R U et al. *Astrophys. J. Lett.* **790** L21 (2014); arXiv:1404.5890
19. Budnev N M et al. *Astropart. Phys.* **117** 102406 (2020); arXiv:2104.03599
20. LHAASO. Large High Altitude Air Shower Observatory, <http://English.ihep.cas.cn/lhaaso/>
21. Bartoli B et al. *Astropart. Phys.* **81** 49 (2016); arXiv:1512.01326
22. Gromuskin D N et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **409** 012044 (2013); arXiv:1612.09460
23. Громушкин Д М и др. *ЭЧАЯ* **49** 1056 (2018); Gromuskin D M et al. *Phys. Part. Nucl.* **49** 602 (2018)
24. Galbraith W, Jelley J *Nature* **171** 349 (1953)
25. Нестерова Н М, Чудаков А Е *ЖЭТФ* **28** 384 (1955); Nesterova N M, Chudakov A E *Sov. Phys. JETP* **1** 388 (1955)
26. Chudakov A E et al. *Proc. 6th ICRC* **2** 46 (1959)
27. Зацепин Г Т, Чудаков А Е *ЖЭТФ* **41** 655 (1962); Zatsepin G T, Chudakov A E *Sov. Phys. JETP* **14** 469 (1962)
28. Чудаков А Е, Препринт № 26 (М.: ФИАН, 1964) с. 118
29. Weekes T et al. *Astrophys. J.* **342** 379 (1989)
30. Tluczykont M et al. *Astropart. Phys.* **56** 42 (2014); arXiv:1403.5688
31. TAIGA, <https://taiga-experiment.info>
32. Budnev N M et al. *JINST* **15** C09031 (2020)
33. Kuzmichev L A, private communication
34. Aharonian F et al. *Chinese Phys. C* **45** 025002 (2021); arXiv:2010.06205
35. Aharonian F et al. (LHAASO Collab.), arXiv:2101.03508
36. Lidvansky A S *EPJ Web Conf.* **208** 15003 (2019) contribution to ISVHECRI 2018
37. Alexeenko V V et al. *Nuovo Cimento C* **10** 161 (1987)
38. Berezhinsky V S *Nature* **334** 506 (1988)
39. Alexeenko V V et al., in *Proc. Intern. Workshop on Very High Energy Gamma Ray Astronomy, Crimea 1989* (Eds A A Stepanyan, D J Fegan, M F Cawley)
40. Dzhappuev D D et al. *Письма в ЖЭТФ* **109** 223 (2019); *JETP Lett.* **109** 226 (2019)
41. Петков В Б и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **83** 1038 (2019); Petkov V B et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **83** 941 (2019)
42. Dzhappuev D D et al. *Письма в ЖЭТФ* **112** 797 (2020); *JETP Lett.* **112** 753 (2020); arXiv:2011.02452
43. Greisen K *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **10** 63 (1960)
44. Reines F *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **10** 1 (1960)
45. Markov M M, in *10th Intern. Conf. on High Energy Physics* (Rochester: Univ. of Rochester, 1960) p. 578
46. Markov M M, Zheleznykh I M *Nucl. Phys.* **27** 385 (1961)
47. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *ЖЭТФ* **41** 1818 (1961); Zatsepin G T, Kuzmin V A *Sov. Phys. JETP* **14** 1294 (1962)
48. Болиев М М и др. *Ядерная физика* **34** 1418 (1981); Boliev M M et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **34** 787 (1981)
49. Алексеев Е Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **33** 664 (1981); Alekseev E N et al. *JETP Lett.* **33** 651 (1981)
50. Alekseev E N et al. *Lett. Nuovo Cimento* **35** 413 (1982)
51. Boliev M M et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **48** 83 (1996)
52. Roberts A *Rev. Mod. Phys.* **64** 259 (1992)

53. Deineko A O et al., in *Proc. Third Intern. Workshop on Neutrino Telescopes*, 26–28 February 1991, Venice, Italy, p. 407
54. Bezrukov L B et al., in *Proc. XI Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics*, 11–16 June 1984, Nordkirchen, Dortmund, Germany (Eds K Kleinknecht, E A Paschos) (Singapore: World Scientific, 1984) p. 550
55. Domogatsky G V et al., in *Proc. XII Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics*, 3–8 June 1986, Sendai, Japan (Eds T Kitagaki, H Yuta) (Singapore: World Scientific, 1986) p. 737
56. Рубаков В А *Письма в ЖЭТФ* **33** 658 (1981); Rubakov V A *JETP Lett.* **33** 644 (1981)
57. Belolaptikov I A et al., astro-ph/9802223
58. Bagdavev R et al. *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A* **420** 138 (1999); astro-ph/9903347
59. Sokalski I, Spiering C (Baikal Collab.) (Eds) "The Baikal Neutrino Telescope NT-200", Tech. Rep. Baikal-92-03
60. Balkanov V A et al. *Astropart. Phys.* **12** 75 (1999)
61. Balkanov V A et al., in *Proc. 25th ICRC, Durban, July 28–August 8, 1997*; astro-ph/9705245
62. Belolaptikov I A et al. *Astropart. Phys.* **7** 263 (1997)
63. Aynutdinov V et al. *Astropart. Phys.* **25** 140 (2006); astro-ph/0508675
64. Аврорин А В и др. *Письма в Астрон. журн.* **35** 723 (2009); Avrorin A V et al. *Astron. Lett.* **35** 651 (2009)
65. Aynutdinov V et al. *Astropart. Phys.* **29** 366 (2008)
66. IceCube Collab. *Science* **342** 1242856 (2013)
67. Aartsen M G et al. (IceCube-Gen2 Collab.) *J. Phys. G* **48** 060501 (2021); arXiv:2008.04323
68. Aynutdinov V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Res. A* **602** 227 (2009); arXiv:0811.1110
69. Avrorin A D et al. *Eur. Phys. J.*, submitted
70. Safronov G (Baikal-GVD Collab.), arXiv:2012.03373
71. Dzhilkibaev Zh-A, in *Proc. 19th Int. Workshop on Neutrino Telescopes, Venice* (2021) in press
72. Avrorin A D et al. *Письма в ЖЭТФ* **108** 803 (2018); *JETP Lett.* **108** 787 (2018)
73. Березинский В С, Зацепин Г Т *Ядерная физика* **11** 200 (1970)
74. Аскарьян Г А *ЖЭТФ* **41** 616 (1962); Askar'yan G A *Sov. Phys. JETP* **14** 441 (1962)
75. Аскарьян Г А *Атомная энергия* **3** 921 (1957)
76. Markov M A, Zheleznykh I M *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **248** 242 (1986)
77. Гусев Г А и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **49** (7) 150 (1985)
78. Bogomolov A F et al. *Proc. 25th ICRC, Moscow* **6** 472 (1987)
79. Boldyrev I N et al., in *Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venice* (1991) p. 337
80. Kravchenko I et al. *Astropart. Phys.* **19** 15 (2003); astro-ph/0112372
81. Karaevsky S Kh et al. *Proc. 23rd ICRC Calgary* **4** 550 (1993)
82. Dedenko L G et al., astro-ph/9705189
83. Abbasi R et al. *Astropart. Phys.* **34** 382 (2011)
84. Дагкесаманский Р Д, Железных И М *Письма в ЖЭТФ* **50** 233 (1989); Dagkesamanskii R D, Zheleznykh I M *JETP Lett.* **50** 259 (1989)
85. Березняк А Р и др. *Астрон. журн.* **82** 149 (2005); Beresnyak A R et al. *Astron. Rep.* **49** 127 (2005)
86. Алексеев Е Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **45** 461 (1981); Alexeyev E N et al. *JETP Lett.* **45** 589 (1987)
87. Hirata K et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 1490 (1987)
88. Bionta R M et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 1494 (1987)
89. Aglietta M et al. *Europhys. Lett.* **3** 1321 (1987)
90. Имшенник В С, Рязжская О Г *Письма в Астрон. журн.* **30** 17 (2004); Imshennik V S, Ryzhskaya O G *Astron. Lett.* **30** 14 (2004)
91. Имшенник В С *УФН* **180** 1121 (2010); Imshennik V S *Phys. Usp.* **53** 1081 (2010)
92. Postnov K A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **463** 1642 (2016)
93. Agafonova N Y et al. *Astrophys. J.* **802** 47 (2015)
94. Abazov A I et al. *Phys. Rev. Lett.* **67** 3332 (1991)
95. Abdurashitov J N et al. *Phys. Rev. Lett.* **77** 4708 (1996)
96. Anselmann P et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **285** 376 (1992)
97. Wolfenstein L *Phys. Rev. D* **17** 2369 (1978)
98. Михеев С П, Смирнов А Ю *Ядерная физика* **42** 1441 (1985); Mikheev S P, Smirnov A Yu *Sov. J. Nucl. Phys.* **42** 913 (1985)
99. Mikheyev S P, Smirnov A Yu *Nuovo Cimento C* **9** 17 (1986)
100. Barinov V et al. *Phys. Rev. D* **99** 111702 (2019)

50 years Institute for Nuclear Research: exploring the high-energy universe

C. Spiering

Deutsches Elektronensynchrotron (DESY) Zeuthen, D-15738, Germany

E-mail: christian.spiering@desy.de

This article is an attempt to review 50 years of high-energy cosmic particle physics at the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. It is written by an outsider whose scientific career, to a large part, was shaped by collaborating with INR scientists in the late 1980s and 1990s. The review covers the fields of cosmic-ray, gamma-ray, and high-energy neutrino physics. The main focus will be on INR's large facilities in the Baksan Valley and at Lake Baikal. Research at these facilities is accompanied by participation in top experiments at different places around the world: recently, the Telescope Array in the USA and the LHAASO detector in China.

Keywords: neutrino astronomy, cosmic rays, gamma-ray astronomy, supernova, underground detectors, air showers, cosmic ray detectors

PACS numbers: **01.65. + g**, **29.40. – n**, 95.55.Vj

Bibliography — 100 references

Received 7 December 2020, revised 19 June 2021

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **191** (12) 1261–1279 (2021)

Physics—Uspekhi **64** (12) (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.06.038998>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.06.038998>