

Происхождение астрофизических нейтрино высоких энергий: новые результаты и перспективы

С.В. Троицкий

Нейтринная астрофизика высоких энергий интенсивно развивается, и в течение последних двух лет были получены новые интересные результаты. Среди них — подтверждение существования диффузного потока астрофизических нейтрино новым независимым экспериментом Baikal-GVD, открытие нейтринного излучения нашей Галактики, новые подтверждения связи части астрофизических нейтрино с блазарами и многое другое. Этот краткий обзор, основанный на докладе автора на сессии ОФН РАН "Гамма-кванты и нейтрино из космоса: что видим сейчас и что нужно, чтобы увидеть больше", суммирует результаты, полученные после публикации обзора [УФН 191 1333 (2021)], и может служить дополнением к нему.

Ключевые слова: астрофизика высоких энергий, нейтринная астрофизика, многоканальная астрономия

PACS numbers: 95.30. – k, 95.55. Vj, 98.70. – f

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039581>

Содержание

- 1. Введение (371).**
 - 2. Экспериментальные новости (371).**
 - 2.1. Baikal-GVD. 2.2. Эксперименты в Средиземном море: ANTARES и KM3NeT. 2.3. IceCube. 2.4. Новые данные, старые трудности.
 - 3. Внегалактические нейтрино (373).**
 - 3.1. Нейтрино от блазаров. 3.2. Нейтрино от сейфертовских галактик. 3.3. Нейтрино от приливных разрушений звезд. 3.4. "Исчезающие" корреляции.
 - 4. Галактические нейтрино (378).**
 - 4.1. Открытие нейтринного излучения Млечного Пути. 4.2. Сравнение анализов. 4.3. Галактическое диффузное нейтринное и гамма-излучение выше 100 ТэВ. 4.4. Угловое распределение галактических нейтрино.
 - 5. Перспективы (381).**
 - 5.1. Борьба с атмосферными фонами: высокие энергии и большая статистика. 5.2. Борьба за точность: детекторы в жидкой воде.
 - 6. Заключение (382).**
- Список литературы (382).

1. Введение

Изучение астрофизических нейтрино высоких (ТэВ – ПэВ) энергий сейчас находится на этапе интенсивного развития. Крупнейший на сегодняшний день нейтринный

телескоп IceCube накопил достаточную статистику, чтобы делать выводы об астрофизических источниках нейтрино, а эксперименты Baikal-GVD и KM3NeT быстро наращивают объём и начинают давать первые данные. Вместе с тем, с учётом новых результатов, вопросов о происхождении таких нейтрино пока больше, чем ответов.

Здесь будет дана попытка суммировать многочисленные новые (после публикации [1], т.е. за 2022–2023 гг.) результаты в области нейтринной астрофизики высоких энергий и долгосрочные планы развития этой области. Более широкий обзор нейтринной астрофизики высоких энергий и полученных до 2021 г. включительно результатов можно найти в [1]. Значительная часть работ, упоминавшихся в [1], здесь не обсуждается, и ссылки на них не дублируются, чтобы не загромождать статью.

2. Экспериментальные новости

Остановимся сначала на значимых продвижениях в экспериментах, регистрирующих нейтрино высоких энергий, а результаты по астрофизическим источникам обсудим в следующих разделах.

2.1. Baikal-GVD

Крупнейший в Северном полушарии нейтринный телескоп Baikal-GVD продолжил наращивать свой эффективный объём путём постепенного добавления новых кластеров оптических модулей (по состоянию на 2023 год работают 12 кластеров, один из которых в неполной комплектации). Также в конфигурации эксперимента появились дополнительные струны, расположенные в пространстве между кластерами, что должно повысить эффективность регистрации и точность определения параметров нейтрино. В 2022 г. были опубликованы первые результаты работы эксперимента в неполной конфигурации (2018–2021 гг.).

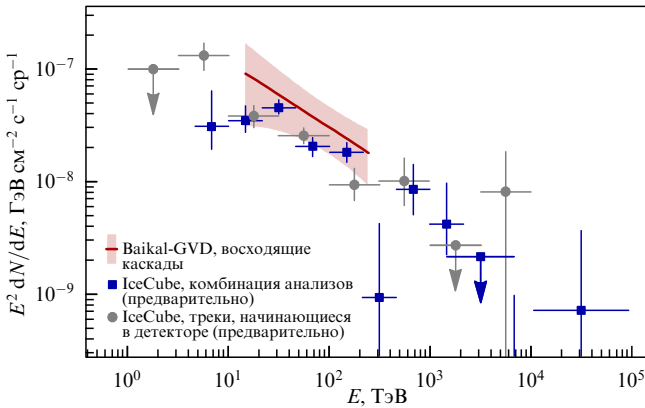
С.В. Троицкий

Институт ядерных исследований РАН,
просп. 60-летия Октября 7А, 117312 Москва, Российская Федерация;
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет,
Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: st@ms2.inr.ac.ru

Статья поступила 22 октября 2023 г.

Таблица 1. Параметры степенных фитов (1) спектров диффузных астрофизических нейтрино по результатам анализов 2022–2023 гг.

Анализ	Энергии	Φ_0	γ
Baikal-GVD, восходящие каскады [2]	15–100 ТэВ	$3,04^{+1,52}_{-1,27}$	$2,58^{+0,27}_{-0,33}$
IceCube, комбинация анализов [3]	2,5 ТэВ–6,3 ПэВ	$1,80^{+0,13}_{-0,16}$	$2,52 \pm 0,04$
IceCube, starting tracks [4]	3–550 ТэВ	$1,68^{+0,19}_{-0,09}$	$2,58^{+0,10}_{-0,09}$

**Рис. 1.** Спектры диффузного астрофизического нейтринного излучения в пересчёте на один аромат, сумма нейтрино и антинейтрино, по результатам анализов 2022–2023 гг.

Основным достижением не только байкальского эксперимента, но и всей нейтринной астрономии является подтверждение самого существования астрофизических нейтрино высоких энергий, все исследования которых основывались ранее на результатах одной установки IceCube, не свободной, как и любая другая, от систематических неопределённостей. На основе анализа двух выборок каскадных нейтринных событий Baikal-GVD с наиболее высокой вероятностью астрофизического происхождения в работе [2] гипотеза отсутствия астрофизического потока была отвергнута со статистической значимостью $3,05\sigma$. Первая выборка включала 16 событий с реконструированной энергией выше 70 ТэВ (самое высокоэнергичное — 1200 ТэВ). Для второй использовалось ограничение по энергии в 15 ТэВ, но события отбирались только с направлениями прихода из-под горизонта, что значительно снижает атмосферный фон. Таких событий было зарегистрировано 11, из них два имели энергию выше 70 ТэВ и потому попали в обе выборки. Событие из-под горизонта с максимальной энергией (224 ТэВ) пришло с весьма примечательного направления на небе (см. об этом ниже в разделе 3.1).

Напомним, что стандартная параметризация изотропного диффузного суммарного потока нейтрино и антинейтрино одного аромата степенным спектром даётся выражением

$$\frac{dF_{\nu+\bar{\nu}}}{dE} = \Phi_0 \left(\frac{E_\nu}{100 \text{ ТэВ}} \right)^{-\gamma} \times 10^{-18} \text{ ГэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}. \quad (1)$$

Традиционно в анализе предполагаются равными потоки нейтрино разных ароматов, так что полный поток получается умножением выражения (1) на три. Параметры Φ_0 и γ , полученные Baikal-GVD, приведены в табл. 1. Её можно считать дополнением к табл. 3 из [1]. Там же приведены параметры, полученные в двух новых анализах IceCube, о которых речь пойдёт ниже.

Рисунок 1 показывает, что полученный в анализе Baikal-GVD спектр хорошо согласуется с результатами IceCube. Этот результат важен не только потому, что получен в независимом от IceCube анализе другим коллективом, но и потому, что оба эксперимента существенно различаются как по чувствительности к разным областям неба (Южное и Северное полушария), так и по методике (лёд и жидкая вода, подробнее см. [1]).

2.2. Эксперименты в Средиземном море: ANTARES и KM3NeT

Другая группа экспериментов, регистрирующих нейтрино в жидкой воде, находится в Средиземном море. Эксперимент ANTARES завершил свою многолетнюю работу в 2022 г., когда рабочий объём приходящего ему на смену большого детектора KM3NeT превысил объём ANTARES. Финальные публикации по полному набору данных ANTARES ожидаются в ближайшем будущем, некоторые из них упомянуты в разделах 3.1 и 4.1. Хотя KM3NeT стал больше ANTARES, он пока очень невелик по сравнению с IceCube и Baikal-GVD и ещё не достиг экспозиции, позволяющей зарегистрировать диффузный поток. Эксперимент интенсивно наращивает свой рабочий объём, и в конце 2022 г. стали появляться первые его астрофизические результаты.

2.3. IceCube

Эксперимент IceCube работает с 2008 г., и основные астрофизические результаты по нейтрино высоких энергий по-прежнему основаны на его данных. Помимо продолжения набора статистики, в коллективе IceCube ведётся работа по улучшению качества реконструкции событий и повышению точности определения параметров нейтрино — энергий и направлений прихода. В новых реконструкциях должны быть более детально учтены свойства льда. Впервые для астрофизических анализов на этапе реконструкции отдельных событий IceCube были применены методы машинного обучения.

На конференции ICRC2023 экспериментом IceCube были представлены два новых предварительных анализа диффузных потоков астрофизических нейтрино (см. табл. 1 и рис. 1). В частности, впервые представлен [3] спектр, объединяющий информацию от разных каналов наблюдения, включая каскады и треки, отобранные и обработанные разными способами. В отличие от предыдущих анализов, качество фита степенной функцией с изломом несколько лучше, чем без излома.

Другой новый спектр [4] основан на анализе треков, начинающихся в детекторе. Такой способ отбора эффективно исключает атмосферные мюоны, хотя, разумеется, оставляет в выборке событий атмосферные нейтрино, для выделения вклада которых используются статистические методы. Это позволяет продвинуться в область более низких энергий в оценке астрофизического потока. Обращает на себя внимание некоторое расхождение с объединённым спектром при низких энергиях (см. рис. 1).

При фитировании степенной функцией с изломом даже получается излом в другую сторону, хотя данный эффект не является статистически значимым. Проблема согласования спектров, полученных в разных анализах, подробно обсуждавшаяся в [1], сохраняет свою актуальность.

Следует отметить публикацию сразу нескольких публично доступных наборов данных, относящихся к направлениям прихода событий IceCube.

- *Каталог алертных и "алертноподобных" трековых событий IceCat-1* [5]. После публикации известного результата [6] о совпадении нейтрино высокой энергии с гамма-вспышкой блазара TXS 0506+056 IceCube изменил систему отбора и реконструкции публичных алертов, оповещающих обсерватории мира о приходе нейтрино с высокой вероятностью астрофизического происхождения. Алерты первого поколения публиковались в 2016–2018 гг., новые — с 2019 г. Каталог [5] представляет результаты переобработки событий, в том числе более ранних, из которых были отобраны удовлетворяющие новым алертным критериям, так что получилась однородная выборка из 275 событий. Важным новшеством является включение вето, связанного со срабатыванием расположенной на поверхности установки, позволяющее исключить некоторые события, с высокой степенью вероятности имеющие атмосферное происхождение. Каталог включает события с мая 2011 г. по декабрь 2019 г. (эксперимент работает с 2008 г.). Предполагается, что информация по более новым событиям будет добавляться в онлайн-версию каталога.

- *Обновлённые направления прихода событий высокой энергии, начинающихся в детекторе (High-Energy Starting Events, HESE)* [7]. Это — ещё одна переобработка всего массива данных с использованием новой процедуры реконструкции, которая должна более корректно учитывать свойства льда в объёме детектора IceCube. Направления прихода и соответствующие области неопределённости на небе (неправильной формы) приведены для 164 событий.

- *Карта северного неба по трековым событиям*. Представлена численно функция правдоподобия, использованная в работе, посвящённой поиску нейтрино от галактики NGC 1068 ([8]; подробнее см. раздел 3.2). Как и раньше, такая функция, определённая на небесной сфере, связана с вероятностью обнаружить локальный источник астрофизических нейтрино в данном направлении. Она определяется с учётом количества событий, пришедших с этого направления, и их энергий (чем выше энергии, тем выше вероятность астрофизического происхождения нейтрино).

- *Карта неба по каскадным событиям*. Аналогичная функция была опубликована также в связи с наблюдением нейтринного излучения от плоскости Галактики ([9], см. раздел 4.1). Для её построения использовались каскадные события.

Будучи открыто доступными, эти данные могут быть использованы не связанными с IceCube исследователями для новых анализов и проверки гипотез (см., однако, раздел 3.4).

2.4. Новые данные, старые трудности

Применение новых, уточнённых методов статистического анализа первичных данных и реконструкции свойств трековых и каскадных событий приводит к

уменьшению статистических ошибок направления прихода, а для каскадов — и энергии нейтрино. По мере продвижения в указанном направлении становится всё более ясным, что точность восстановления характеристик нейтрино ограничивается систематическими неопределённостями. Это проявляется, в частности, в различиях направлений и энергий, полученных для одних и тех же событий с использованием разных реконструкций (см. иллюстрации в [1]). Для эксперимента IceCube одним из основных источников неопределённости является недостаточно хорошее знание свойств льда — среды, где формируется и распространяется детектируемый сигнал. Недавно в работах IceCube стали появляться описания учёта систематических ошибок в имеющихся данных и обсуждения направлений улучшения таких оценок [10–12]. Направления прихода событий IceCube, имеющих высокую вероятность астрофизического происхождения, получены с использованием упрощённого алгоритма, в котором обработка в предположении разных моделей свойств льда была проведена лишь для одного события [13]. Полученная для данного конкретного события систематическая ошибка переносилась по определённым правилам [10] на все нейтринные алерты. Использование такой процедуры было мотивировано тем, что многократное повторение моделирования с разными предположениями о свойствах льда даже для небольшого количества наиболее интересных событий требовало слишком больших компьютерных ресурсов. Проведённое относительно недавно для некоторых событий такое моделирование ожидаемо показало [10], что реальная неопределённость реконструкции, связанная с недостаточным знанием свойств льда, может быть как меньше, так и больше, чем оценённая упрощённым методом. Коллектив IceCube работает над решением этого вопроса [11].

Применение того или иного конкретного подхода для оценки систематических неопределённостей, возникающих при реконструкции индивидуальных событий, пока остаётся задачей для будущего. Публикуемые сейчас характеристики событий IceCube, в том числе приведённые в каталоге [5], получены описанным выше упрощённым способом. В практических целях дополнительная систематическая ошибка для них может быть учтена с помощью искусственного увеличения статистической неопределённости [14, 15]. Отметим, что, хотя, в связи с большей однородностью жидкой воды по сравнению со льдом и относительной технической простотой контроля её свойств, систематические неопределённости ожидаются менее значительными для других детекторов, те же проблемы актуальны для всех инструментов.

Вопросы, связанные с неопределённостью моделирования, становятся очень серьёзными в контексте всё более широкого применения методов машинного обучения для реконструкции событий (подробнее см. раздел 3.4).

3. Внегалактические нейтрино

Новые данные и анализы подтверждают происхождение значительной части астрофизических нейтрино высоких энергий в блазарах (раздел 3.1). При этом, вероятно, в полный поток нейтрино вносят вклад и другие внегалактические источники (разделы 3.2, 3.3), и наша Галактика (см. раздел 4).

3.1. Нейтрино от блазаров

Напомним, что блазары — это мощные активные ядра галактик с релятивистскими струями, направленными на наблюдателя. Излучение, рождающееся в струе, имеет для наблюдателя большую интенсивность из-за релятивистских эффектов, поэтому блазары являются одними из самых мощных источников нетеплового излучения во Вселенной. Наиболее универсальным маркером направленной на наблюдателя релятивистской струи является синхротронное излучение релятивистских электронов на масштабах порядка парсек и меньше, видимое в радиодиапазоне с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Далеко не все блазары являются гамма-источниками, хотя среди внегалактических источников гамма-излучения высоких энергий они составляют доминирующую популяцию.

3.1.1. Нейтрино наиболее высоких энергий

Новые нейтринные события: прямая проверка гипотезы. Статистическая связь между нейтринными событиями IceCube и популяцией блазаров, отобранных по РСДБ-выборкам, была обнаружена в работе [14] для событий с энергиями выше 200 ТэВ, данные о которых были опубликованы до 2019 г. включительно. Полученные после выхода работы [14], в 2020–2022 гг., данные были проанализированы тем же методом в статье [16]. Использовались те же критерии отбора событий и тот же метод анализа. К 56 событиям из выборки [14] добавилось 15 новых событий. Статистическая значимость ассоциации нейтрино с энергиями выше 200 ТэВ и блазарами выросла с $3,1\sigma$ до $3,6\sigma$ (рис. 2). Это явилось прямым подтверждением результатов работы [14]; доля новых ассоциаций [16] среди всех нейтрино согласуется с ожидаемой из [14].

Повторные нейтрино от тех же блазаров. Накопление статистики IceCube, а также начало работы новых экспериментов Baikal-GVD и KM3NeT привело к появлению случаев, когда направления прихода нескольких нейтринных событий совпадают с одним и тем же блазаром. Остановимся на нескольких примечательных случаях (рис. 3).

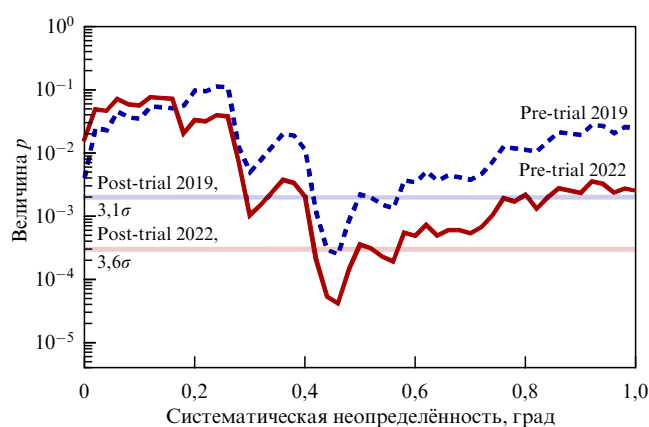


Рис. 2. Вероятность нулевой гипотезы случайного совпадения нейтрино высоких энергий с радиоблазарами по наборам данных до 2019 г. [14] и до 2022 г. [16] для разных предполагаемых значений дополнительной систематической ошибки (pre-trial). Горизонтальные линии указывают значимость с учётом подбора этого значения (post-trial).

PKS 1741-038. Один из самых мощных радиоблазаров на небе, он был выделен в работе [14] среди четырёх наиболее вероятных источников нейтрино на основе совпадения с нейтрино IC110930 и высокой плотности потока радиоизлучения компактной компоненты¹. В 2022 г. с того же направления пришло ещё одно нейтрино, удовлетворяющее всем критериям отбора, используемым в [14, 16], — IC220205.

TXS 0506+056. Связь данного блазара с событием IC170922 (~ 290 ТэВ) положила начало [6] истории наблюдательных ассоциаций блазаров и нейтрино; как нейтрино, так и блазар вошли в выборки, использованные в [14]. В конце 2022 г. эксперимент Baikal-GVD сообщил [17] о совпадении с тем же блазаром каскадного события GVD210418CA. Это — событие с самой высокой энергией (225 ± 75 ТэВ) из числа пришедших из-под горизонта каскадов, зарегистрированных на Байкале в 2018–2021 гг. Вероятность его астрофизического происхождения оценивается как 99,67%. Хотя ошибки направления прихода указанного события заметно больше ($6,0^\circ$, 90% CL), чем у треков IceCube, они в несколько раз меньше, чем у каскадов во льду, что позволило говорить о начале нейтринной астрономии точечных источников в каскадном канале.

PKS 0735+178. Внимание к этому источнику привлекло событие IC211208 (171 ТэВ). Хотя оно не удовлетворяло выработанным в [14] критериям отбора (энергия ниже 200 ТэВ) и потому не было использовано ни в каком статистическом анализе, оно совпало с исторической вспышкой блазара, зарегистрированной во всех диапазонах, от радио до гамма. Оказалось, что в дни вспышки в декабре 2021 г. события с направления на этот блазар регистрировали все работающие на Земле нейтринные телескопы — помимо IceCube, это Baikal-GVD [18, 19], Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) [20, 21] и KM3NeT [22]. Нейтрино от данного блазара обсуждались, в частности, в работах [23–25]. Стоит отметить, что, хотя БПСТ имеет небольшой геометрический объём и регистрирует треки восходящих мюонов от нейтрино с порогом энергии 1 ГэВ, т.е. на порядки ниже обсуждаемых здесь, его эффективный объём быстро растёт с энергией нейтрино, и регистрация одного события за вспышку на БПСТ вполне согласуется с одним событием IceCube [21] в предположении падающего степенного спектра нейтринного излучения источника.

Другие выборки событий IceCube или блазаров. Как обсуждалось в [1], статистически значимые ассоциации нейтрино высоких энергий с блазарами были найдены также в статье [26], где использовались критерии отбора событий и блазаров, отличные от [14]. Выборка нейтринных событий [26] (2009–2019 гг.) была вновь использована в работе [27] для поиска ассоциаций с источниками, отобранными по потокам в различных диапазонах, преимущественно блазарами. Результаты этого исследования подтверждают общую тенденцию, в том числе связь нейтрино с радиоисточниками с плоским спектром, отобранными по потоку на 8 ГГц. В отличие от других исследований, здесь не использовался наиболее

¹ Идентификаторы событий указывают на эксперимент, IC — IceCube, GVD — Baikal-GVD, и дату регистрации. Для трековых событий обычно указывается только наиболее вероятное значение энергии нейтрино, ошибки определения которой значительны [1, 6].

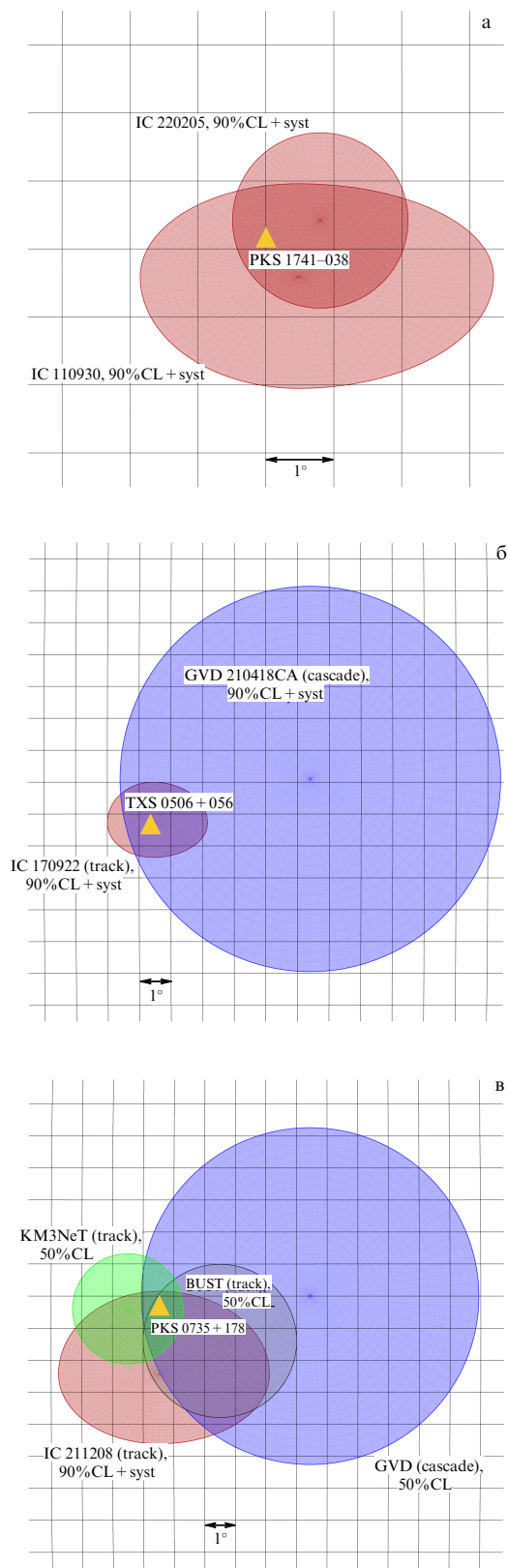


Рис. 3. Контуры ошибок определения направлений прихода для нейтрино, ассоциированных с блазарами (а) PKS 1741–038, (б) TXS 0506+056, (в) PKS 0735+178 (см. текст).

эффективный отбор блазаров на основе РСДБ, а выборка строилась на базе каталога CRATES, сконструированного по наблюдениям без использования радиоинтерфе-

рометрии. С радиоблазарами, отобранными по CRATES, могут быть связаны от 4 % до 42 % нейтрино (интервал 90 % CL), что согласуется с другими оценками.

В 2023 г. был опубликован [5] обновлённый каталог IceCat-1 событий IceCube, имеющих высокую вероятность астрофизического происхождения. Он содержит события с 2011 по 2019 гг., к которым ретроактивно были применены новые алгоритмы реконструкции, ныне используемые для определения алертных событий. Реконструированные направления прихода и энергии ранее опубликованных событий были изменены, в ряде случаев значительно; также добавилось много новых событий. Использование этого каталога для аналогичного работе [14] анализа с непосредственным применением критериев из [14] приводит к снижению [28] значимости ассоциаций нейтрино и радиоблазаров по сравнению с оригинальной работой (см. обсуждение ниже в разделе 3.4).

3.1.2. Все энергии выше \sim ТэВ

Радиоблазары — источники нейтрино от ТэВ до ПэВ.

Связь нейтрино более низких энергий с радиоблазарами из той же самой выборки была статистически установлена [29] на основе опубликованной карты функции правдоподобия, содержащей обобщённую информацию о направлениях прихода всех трековых событий IceCube за первые семь лет работы. Было показано, что порядка 25 % потока астрофизических мюонных нейтрино связано с популяцией блазаров с радиояркой компактной компонентой. Отдельные события были опубликованы для 10-летнего набора данных в другой реконструкции. Для этого каталога (с помощью другой процедуры анализа) не было обнаружено корреляций направлений прихода нейтрино с блазарами [30], что позволило поставить ограничение сверху на долю нейтрино от блазаров, $< 30\%$ (в согласии с [29]; см. обсуждение в [31], а также раздел 3.4 ниже).

Таким образом, статистические анализы указывают на связь с популяцией блазаров нейтрино как самых высоких, так и более низких энергий. Число блазаров в выборке велико, и между собой отдельные источники различаются достаточно сильно. Важным для понимания механизмов рождения нейтрино представляется вопрос, рождаются ли нейтрино с широким спектром в одних и тех же блазарах, или за разные энергетические диапазоны нейтрино отвечают разные популяции источников. Определённое продвижение в решении этого вопроса связано с работой [32], в которой была установлена статистически значимая ($3,6\sigma$) связь между фактом совпадения нейтрино из выборки [16] с радиоблазаром и наличием дополнительных нейтрино более низких энергий, пришедших одновременно (± 1 день) с того же направления. Вероятно, одни и те же блазары могут излучать нейтрино существенно разных энергий.

Анализы, основанные на других выборках. Связь всех событий, зарегистрированных большими нейтринными телескопами, с блазарами, подтверждается с использованием других данных. В частности, коллаборация ANTARES получила [33] указания (значимость $2,2\sigma$) на наличие пространственной корреляции направлений прихода событий, зарегистрированных за время работы эксперимента, с тем же каталогом радиоблазаров, что использовался в [14, 16, 29]. Кроме того, был проведён

поиск нейтринных вспышек с направлений этих блазаров. Наиболее примечательным оказался избыток событий с направления блазара PKS 0242+1101 в 2013 г.: одновременно с того же направления пришло нейтрино высокой энергии, зарегистрированное IceCube, а блазар испытывал мощную вспышку в гамма-излучении (Fermi LAT) и в радиодиапазоне (OVRO).

Другие критерии отбора блазаров, в первую очередь основанные на использовании их оптических спектров, легли в основу каталога блазаров BZCAT, использованного в работах [34, 35]. Хотя данная выборка не является полной ни по какому критерию (в частности, источники распределены по небу неравномерно), в ней ожидается очень низкий уровень загрязнения неблазарными объектами. Внимание авторов [34] было обращено на трековые события Южного неба, т.е. для IceCube приходящие с направлений над горизонтом. Использовалась карта функции правдоподобия по данным семи лет работы IceCube — та же, что для Северного неба в [29]. Уровень загрязнения атмосферными мюонами для событий, приходящих над горизонтом, очень высок, поэтому карты для Северного и Южного неба формировались разными способами: для Южной части больший вес придавался наиболее энергичным событиям, для которых выше вероятность астрофизического происхождения. В [34] применялся довольно сложный метод: сначала определялись "горячие пятна" на Южном нейтринном небе — несколько точек с высокой вероятностью расположения в них нейтринного источника, — а затем уже эти точки проверялись на наличие в их направлениях блазаров. Ассоциация нейтринных "горячих пятен" с блазарами была установлена на уровне достоверности $4,7\sigma$. Что касается Северного неба, то там те же авторы использовали [35] другой набор данных — обновлённую карту, опубликованную вместе с результатом [8], и получили тем же методом тот же вывод, но со значимостью $2,7\sigma$. Отметим, что при использовании одного и того же набора данных для Южного и Северного неба значимых результатов для последнего не получается [36] (подробнее о таком исследовании см. раздел 3.4).

Подходы к объяснению. Происхождение нейтрино с энергиями от ТэВ до ПэВ в одних и тех же источниках — радиоярких блазарах, — вероятно, связано со взаимодействием протонов, ускоренных до энергий, примерно в 20 раз превышающих энергии нейтрино, с фотонами рентгеновского диапазона (более подробно см. в [1]). Максимальная вероятность рождения нейтрино с энергией порядка ПэВ соответствует взаимодействию протонов с фотонами ультрафиолетового диапазона, но для более низких энергий нейтрино требуются фотоны жёсткого рентгеновского излучения. Таким образом, наблюдательные результаты указывают на то, что нейтрино рождаются в тех частях блазаров, где присутствуют фотоны с энергиями в широком диапазоне. С другой стороны, связь нейтрино с потоком компактного радиоисточника, наблюдаемого с помощью РСДБ, указывает на их рождение не далее чем в нескольких парсеках от центральной чёрной дыры блазара.

В литературе описано не так много возможных механизмов, удовлетворяющих указанным требованиям, наиболее жёстким из которых оказывается присутствие достаточного количества рентгеновских фотонов. Жёст-

кое рентгеновское излучение блазаров часто связывают с обратным комптоновским рассеянием релятивистских электронов на фотонах их собственного синхротронного излучения. Последнее является как раз тем радиоизлучением, которое отвечает за РСДБ-поток, поэтому было предложено [29] связать область рождения нейтрино с областью, откуда приходит радиоизлучение. Дальнейшее развитие этого механизма позволило построить [37] реалистичную двухзонную модель, где протоны ускоряются вблизи чёрной дыры, а взаимодействуют с комптоновскими фотонами в так называемом миллиметровом коре блазара — области вблизи основания джета, дающей основной вклад в РСДБ-поток при наблюдениях в миллиметровом диапазоне [38]. В таком механизме поток нейтрино от отдельного блазара оказывается относительно небольшим, что хорошо согласуется с оценками числа источников нейтрино высоких энергий и с отсутствием корреляции между нейтрино и высокоэнергичным гамма-излучением блазаров (см. [1]).

Одно из предсказаний моделей этого класса — большие потоки жёсткого рентгеновского излучения тех блазаров, от которых приходят нейтрино, в том числе наиболее высоких энергий. Такое предсказание получило недавно наблюдательное подтверждение [39].

3.2. Нейтрино от сейфертовских галактик

Ещё одним выделенным индивидуальным источником нейтрино считается галактика M 77, она же NGC 1068. Эта галактика сочетает в себе признаки ядерной активности (сейфертовская галактика 2 типа) и интенсивного звездообразования. В статье IceCube [8] делается вывод об отклонении гипотезы отсутствия связи нейтрино с данной галактикой со статистической значимостью $4,2\sigma$. Интерпретация последней величины достаточно сложна из-за того, что сама по себе значимость концентрации нейтрино в направлении, близком к NGC 1068, с учётом скана по всему небу составляет [8] $2,0\sigma$. Значимость возрастает, если скан по всему небу заменить на перебор каталога из 110 "вероятных источников", составленного по достаточно произвольным правилам (более подробное обсуждение такого подхода см. в [1]). IceCube использует такой список уже некоторое время, однако следует отметить, что он был существенно расширен при переходе от анализа 2016 г. [40] к 2019 г. [41]. Именно в статье [41] в список была добавлена, вместе с семью другими галактиками с интенсивным звездообразованием, NGC 1068, и в той же самой статье был впервые обнаружен избыток событий с указанного направления. Поскольку в анализе [8] использовались события с 2011 по 2020 гг., в контексте включённого в 2019 г. источника NGC 1068 использование [8] термина "априори зафиксированный каталог", возможно, не вполне оправданно.

Стоит отметить ещё одно неожиданное отличие этого источника от других — очень мягкий спектр. Как известно, выделение вклада астрофизических нейтрино из атмосферного фона возможно только статистически, и оно основано на распределениях по зенитному углу и, главное, энергии (см. [1]): основная часть атмосферных событий имеет мягкий спектр с показателем степени $\approx 3,7$, а для астрофизических ожидаются показатели примерно от 2,0 до 2,7. В анализе событий от NGC 1068 получился показатель спектра $3,2 \pm 0,2$, т.е. астрофизический характер нейтринных событий следует в основном

из концентрации их направлений прихода в небольшой области неба, а не из их высоких энергий.

Как сейфертовские галактики, так и галактики с интенсивным звездообразованием многочисленны, и возникает естественный вопрос о вкладе других представителей тех же классов источников в нейтринный поток. Существуют, например, другие похожие близкие галактики — являются ли они нейтринными источниками? Данный вопрос изучен в работе [42]. Там составлен список аналогичных NGC 1068 близких галактик и оценена их ожидаемая нейтринная светимость. С учётом оценок светимости и положения на небе получилось, что нынешней чувствительности IceCube должно хватать для регистрации нейтринного сигнала всего от двух галактик (кроме самой NGC 1068), NGC 4151 и NGC 3079. Авторы проанализировали 10-летний публично доступный каталог событий IceCube [43] и обнаружили в нём избыток нейтрино от указанных источников со статистической значимостью $3,0\sigma$ и $3,9\sigma$ соответственно. Отметим, что, согласно [42], и эти источники имеют мягкий спектр, однако значения показателей степени в работе не приведены.

3.3. Нейтрино от приливных разрушений звёзд

В рамках одной из программ астрономических наблюдений, связанных с нейтринными алертами IceCube, было обнаружено совпадение нейтринного события высокой энергии с оптической вспышкой, связанной, вероятно, с приливным разрушением звезды гравитационным полем сверхмассивной чёрной дыры в центре одной из галактик [44]. Вскоре после первого было обнаружено [45] ещё одно похожее совпадение. В обоих случаях сравнение оптических и инфракрасных наблюдений предполагаемого источника выявило задержку инфракрасной вспышки, объяснимую рассеянием излучения на большом количестве пыли. Это мотивировало статистическое исследование [46], в котором был построен каталог аналогичных событий и обнаружено третье совпадение. Статистическая значимость совпадения трёх из 40 высокоэнергичных событий IceCube, вошедших в выборку, с упомянутыми тремя вспышками, связанными с аккрецией вещества на сверхмассивные чёрные дыры, составляет $3,6\sigma$. При интерпретации такого количественного результата следует учесть, что два события, мотивировавшие рассмотрение данной выборки, учитывались при вычислении значимости.

3.4. "Исчезающие" корреляции

Как было отмечено выше, изменение процедур реконструкции событий IceCube практически всегда приводит к заметному изменению основных характеристик — энергий и направлений прихода нейтрино. Можно заметить, что некоторые из интересных ассоциаций нейтрино с потенциальными астрофизическими источниками становятся менее статистически значимыми, когда используется переобработанная выборка тех же событий. Остановимся на нескольких таких случаях.

3.4.1. TXS 0506+056. Хотя активные ядра галактик были отнесены к числу потенциальных источников нейтрино высоких энергий задолго до открытия последних, наиболее серьёзное внимание к возможной связи нейтрино с блазарами вызвала публикация двух работ IceCube [6, 47], посвящённых одному и тому же источнику —

достаточно рядовому блазару TXS 0506+056. В первой из них было объявлено о наблюдении вспышки этого блазара в гамма-диапазоне через несколько дней после регистрации высокоэнергичного нейтрино с направления на данный источник в сентябре 2017 г., а во второй, опубликованной одновременно, — о найденной в последующем анализе нейтринной вспышке с того же направления в 2014 г. Статистическая значимость вспышки 2014 г., согласно статье [47], составляла $4,0\sigma$ до учёта штрафных факторов, связанных с подбором вариантов анализа, и $3,5\sigma$ после их учёта. В новой реконструкции, используемой IceCube в 2023 г., изменение характеристик тех же самых событий привело к уменьшению первого значения до $3,3\sigma$ [48] (использовались только события до октября 2017 г.). Последнее означает, что с учётом штрафных факторов вспышка, описанная в [47], в новой реконструкции имеет значимость $2,7\sigma$, а поток нейтрино, наилучшим образом описывающий результат, уменьшился в два раза.

Что касается связи события высокой энергии с гамма-вспышкой того же блазара [6], то её статистическая значимость также уменьшилась бы в современном анализе из-за большого количества алертных событий, которые не привели к детектированию какой-либо вспышки сопадающего по направлению источника в гамма-диапазоне. Такой анализ, однако, не очень легко провести корректным образом из-за упомянутой в разделе 2.3 смены критериев алертов после выхода статьи [6].

3.4.2. Популяции блазаров. Сходная ситуация наблюдается и с эффектами, обнаруженными в анализах популяций блазаров. Как было отмечено в разделе 3.1.1, значимость ассоциаций между нейтрино IceCube с энергиями выше 200 ТэВ и РСДБ-блазарами существенно снижается [28] при использовании новой реконструкции [5] по сравнению с [14], где использовались изначально опубликованные направления прихода и энергии. Здесь же можно вспомнить и работу [30], в которой не было обнаружено значимой связи тех же блазаров с нейтрино более низких энергий в одной из более новых реконструкций IceCube (см. обсуждение в [1, 31]).

Недавняя работа [36] полностью посвящена сравнению корреляций всего ансамбля нейтрино IceCube с популяциями блазаров в двух наборах данных IceCube — 7-летнем [40] и 10-летнем [43]. Авторы используют метод поиска горячих пятен на карте неба, применявшийся в [34] к карте функции правдоподобия 7-летнего набора данных в Южном небе. Для 10-летнего набора событий аналогичная карта строится в [36] самостоятельно. Статистическая значимость результата [34] при переходе к реконструкции [43] ухудшилась с $4,7\sigma$ до $0,3\sigma$. Таким же образом был рассмотрен и каталог радиоблазаров, использовавшийся в [29]. Интересно, что и для него в [36] были обнаружены корреляции с "горячими пятнами" Южного неба на уровне значимости $3,2\sigma$ (оригинальная работа [29] использовала только Северное небо и другой метод) — но только в 7-летнем наборе данных. Использование обновлённой реконструкции [43] приводит к размыванию этого вновь обнаруженного эффекта.

3.4.3. События приливного разрушения звёзд. В разделе 3.3 обсуждались три события IceCube, которые совпадали с эпизодами интенсивной аккреции на сверхмассивные

чёрные дыры. Недавняя работа IceCube [12] использует новый каталог нейтринных событий для проверки ассоциации с событиями приливного разрушения звёзд (TDE), отобранными по сходным с [46] критериям. Предварительные результаты указывают на отсутствие статистически значимой корреляции. Отмечается, что у двух из трёх ранее ассоциированных с TDE нейтринных событий изменённые в новой реконструкции направления прихода более не включают направление на TDE, а третье событие вообще не вошло в выборку.

3.4.4. Возможные причины. Стороннему наблюдателю трудно судить о том, почему при использовании более новых реконструкций для тех же событий IceCube пропадают ассоциации с астрофизическими источниками и их популяциями, которые были значимыми в более ранних анализах. Одно из объяснений состоит в том, что все эти источники действительно вносят вклад в нейтринный поток, но их вклад меньше, чем казалось при первых анализах. Такое объяснение, к которому приходят, например, авторы [36], конечно, возможно, однако более естественно было бы ожидать его применимости в случае, если эффект ослабевал бы не с переработкой тех же самых данных, а с набором новой статистики. Действительно, в статистическом анализе на пределе чувствительности установки слабые эффекты, как правило, открываются при положительных флуктуациях, и потому зачастую не видны в следующем наборе данных². Однако нелегко себе представить — хотя с небольшой вероятностью такое возможно, — что в целом ряде анализов статистически значимые результаты появлялись из-за использования неправильной реконструкции, а улучшение последней привело к их размытию.

Одна из возможных причин ослабления значимости с переходом к более новым реконструкциям состоит в тонком балансе статистических и систематических неопределённостей. Реконструкции событий, разработанные в последние годы, широко используют методы машинного обучения, приводящие к уверенно доказанному значительному уменьшению статистических ошибок определения параметров вызвавшей срабатывание детектора частицы. Что касается систематических неопределённостей, часто они превращаются при этом в серьёзную и трудно контролируемую проблему. Дело в том, что машинное обучение предполагает наличие тренировочного набора данных с известными характеристиками, на котором, собственно, алгоритм и обучается определять такие характеристики у других событий. В современной астрофизике частиц высоких энергий определение характеристик первичной частицы возможно лишь косвенным образом, поскольку фотоны, нейтрино и заряженные космические частицы регистрируются не непосредственно, а по продуктам их взаимодействия с веществом детектора или атмосферой. Поэтому в качестве тренировочных наборов данных используются искусственные наборы, основанные на моделировании Монте-Карло. Последнее включает в себя детальное моделирование процессов, происходящих в детекторе, а значит, требует их идеального знания. В случае IceCube

идеальное знание оптических свойств льда в объёме кубического километра пока невозможно, и поэтому тренировочные наборы данных с необходимостью основаны на некоторых предположениях. Если такие предположения не совсем правильны, то может сложиться ситуация, когда новый метод существенно уменьшает статистические ошибки определения, например, направления прихода нейтрино, однако центральное значение оказывается смещённым из-за неидеальности тренировочного набора данных. В этом случае выигрывали бы более простые, но менее модельно зависимые анализы, с каких и начиналась работа эксперимента. Насколько подобная ситуация может иметь место в действительности, трудно понять даже непосредственным участникам первичной обработки данных. Ясно, что окончательным критерием проверки гипотез о происхождении астрофизических нейтрино должны стать анализы данных независимых экспериментов, в первую очередь использующих жидкую воду, для которой существенно ниже как статистические, так и систематические ошибки [1] (см. раздел 5.2). Пока такая работа только начинается [17, 33, 50].

4. Галактические нейтрино

Взаимодействия космических лучей с веществом в диске Галактики приводят к рождению нейтрино, что гарантирует некоторый поток нейтрино высоких энергий от диска Млечного Пути. Дополнительные источники галактических нейтрино — отдельные астрофизические объекты, в которых происходит ускорение космических лучей, сопровождающееся взаимодействием с окружающим веществом. Определённый вклад ожидается также от взаимодействий покидающих Галактику космических частиц более высоких энергий с окологалактическим газом. Возможные источники галактических нейтрино и история их поисков описаны в обзорах [1, 51]. В 2022 г. эти поиски увенчались успехом.

4.1. Открытие нейтринного излучения Млечного Пути

В работе [52] был проведён анализ распределения направлений прихода событий IceCube, имеющих высокую вероятность астрофизического происхождения, энергии выше 200 ТэВ и качественную реконструкцию, по модулю галактической широты, $|b|$. Медианное значение $|b|$ для набора из 71 события, отобранного согласно установленным в предыдущих анализах критериям, составило $|b|_{\text{med}} \approx 21^\circ$. Ожидаемое для наборов событий, распределённых по небу в соответствии с экспозицией IceCube, $\langle |b|_{\text{med}} \rangle \approx 36^\circ$, и вероятность получить $|b|_{\text{med}} \leq 21^\circ$ в результате случайной флуктуации равна 4×10^{-5} (статистическая значимость $4,1\sigma$). Таким образом была доказана концентрация направлений прихода нейтрино из этой выборки к плоскости Галактики. Аналогичный анализ для всех событий из каталога [43] показал, что галактическая составляющая наблюдается и при более низких энергиях [52]. Использование одной наблюдаемой $|b|_{\text{med}}$ является наиболее простым и свободным от неопределённостей способом поиска галактической компоненты потока нейтрино, поскольку не требует никаких предположений о конкретных источниках и никакой подстройки параметров.

Коллаборация ANTARES также изучила [53] распределение направлений прихода событий и воспользова-

² Подобно тому как положительные флуктуации приводят к рекордам или аномальным успехам в спорте и других занятиях, которые тот же человек потом не может повторить (см., например., [49]).

лась тем, что для этого эксперимента центральные области Галактики наблюдаются из-под горизонта, что позволяет существенно уменьшить атмосферные фоны с данного направления. Был использован традиционный метод "on-off", в котором в качестве сигнальной ("on") области был выбран узкий прямоугольник $4^\circ \times 60^\circ$ в центре Галактики, а фон определялся по количеству событий в "off"-областях с теми же условиями наблюдения, но в направлениях вдали от центра. Был зарегистрирован избыток событий из сигнальной области со статистической значимостью $2,0\sigma$. Для описанного исследования использовались как трековые, так и каскадные события, но основной вклад в сигнал дали трековые: число треков нейтрино с энергиями выше 1 ТэВ в "on"-области составило 21 при фоновом ожидании $11,7 \pm 0,6$, число каскадов — 13 при фоне $11,2 \pm 0,9$.

Наконец, в 2023 г. была опубликована статья коллаборации IceCube [9], представившая результаты поиска сигнала от галактической плоскости в наборе каскадных событий. Выбор каскадов мотивировался высоким фоном для треков со стороны центра Галактики, который для IceCube всегда наблюдается над горизонтом. Методология поиска использовалась существенно иная. Фактически, речь шла не о поиске произвольного сигнала от Галактики, а о проверке трёх конкретных моделей диффузного излучения, связанного со взаимодействиями космических лучей с газом в диске. Первая из моделей была основана на наблюдениях Fermi LAT диффузного гамма-излучения в ГэВ-ном диапазоне: предполагалось, что такое излучение связано с распадами π^0 -мезонов, а нейтринное — π^\pm -мезонов, рождённых в тех же взаимодействиях. Распределение направлений прихода и спектр (степенной с показателем 2,7) экстраполировались из ГэВ-ного диапазона Fermi LAT в ТэВ-ный диапазон IceCube. Две другие модели, называемые $KRA_{\gamma 5}$ и $KRA_{\gamma 50}$, были получены в результате моделирования распространения космических частиц в Галактике программой DRAGON и их взаимодействия с веществом; разница между ними состоит в энергии предполагаемого обрезания спектра космических лучей (5 или 50 ТэВ соответственно). Для каждой из трёх моделей был рассчитан, с учётом регистрации и отбора событий IceCube, шаблон ожидаемого распределения нейтрино по направлениям и энергиям. Затем рассчитанные распределения сравнивались с реально зарегистрированными с использованием функции правдоподобия. Нулевая гипотеза отсутствия нейтрино от галактической плоскости была исключена со статистической значимостью $4,71\sigma$ (шаблон π^0), $4,37\sigma$ (шаблон $KRA_{\gamma 5}$) и $3,96\sigma$ (шаблон $KRA_{\gamma 50}$). Окончательная значимость, полученная с учётом этих трёх попыток, составила $4,5\sigma$.

Описанные результаты позволяют с уверенностью говорить об открытии галактических нейтрино высоких энергий — Млечный Путь виден теперь и на нейтринном небе. Однако, как мы увидим ниже, до надёжных выводов о происхождении таких нейтрино пока далеко. Представ-

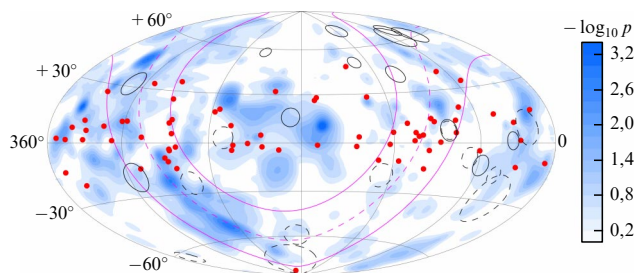


Рис. 4. Карта неба (экваториальные координаты, проекция Хаммера) с распределением функции правдоподобия, построенной по каскадным событиям IceCube [9] (голубая заливка). Направления прихода 71 трека IceCube, которые использовались в анализе Ковалёва и др. [52], показаны красными точками. Для направлений прихода каскадных событий Baikal-GVD из работы [50] приведены области 90 % CL неопределённости их определения: сплошные линии — выборка событий с $E > 100$ ТэВ, штриховые — каскады, зарегистрированные из-под горизонта (одно событие, попавшее в обе выборки и совпавшее с TXS 0506+056 (см. раздел 3.1) показано двойным контуром). Штриховая фиолетовая линия — плоскость Галактики, а сплошные фиолетовые линии ограничивают полосу $|b| < 20^\circ$.

ляет интерес также проверка полученных результатов в данных Baikal-GVD. Первые, пока немногочисленные, опубликованные данные по каскадным событиям не противоречат предположению о наличии галактической составляющей. Более того, круги ошибок определения направлений прихода трёх из 11 событий с энергиями выше 100 ТэВ пересекаются, и этот триплет находится вблизи от плоскости Галактики [50]. Указанная область на небе достаточно интересная; там находится, среди прочих возможных источников, одна из нескольких галактических двойных систем, наблюдавшихся в гамма-диапазоне, LSI+61 303, а также точка максимума функции правдоподобия, использованной IceCube для поиска точечных источников в Северном небесном полушарии по данным семи лет экспозиции для трековых событий [40]. В более поздних анализах максимальное правдоподобие соответствовало направлению, близкому к NGC 1068 (см. раздел 3.2).

4.2. Сравнение анализов

На рисунке 4 приведена карта неба, на которой показана функция правдоподобия каскадного анализа IceCube [9], направления трековых событий IceCube из выборки [52] и каскадных событий Baikal-GVD [50]. Можно заметить некоторую концентрацию нейтрино к широкой полосе возле плоскости Галактики во всех случаях, однако сравнение результатов разных анализов напрямую не представляется возможным. Анализы [9, 52, 53] относятся к разным областям неба и разным энергиям нейтрино, а главное, используют принципиально разные подходы (табл. 2). Чтобы сравнить спектры галактических нейтрино, полученные в разных предположениях, можно воспользоваться обобщённой характеристи-

Таблица 2. Анализы 2022–2023 гг., в которых были обнаружены нейтрино высоких энергий от нашей Галактики

Анализ	Энергии	Метод	Значимость
Kovalev et al. [52]	$\gtrsim 200$ ТэВ	Медиана распределения $ b $	$4,1\sigma$
ANTARES [53]	$\sim 1-100$ ТэВ	On/off, центр Галактики	$2,0\sigma$
IceCube [9]	$\sim 1-100$ ТэВ	Шаблоны распределений	$4,5\sigma$

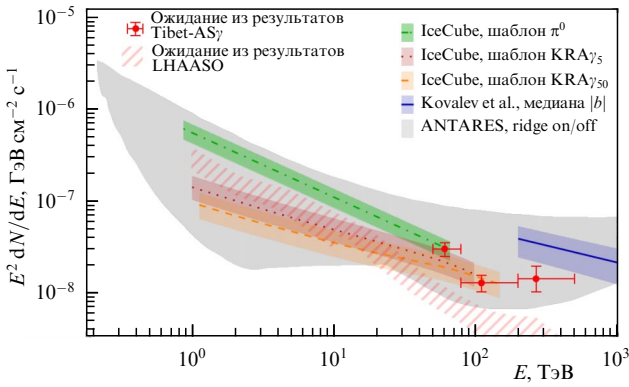


Рис. 5. Оценка полного (проинтегрированного по небесной сфере) потока нейтрино от Галактики в зависимости от энергии по результатам работ Ковалёва и др. [52], ANTARES [53, 54] и IceCube [9]. Заштрихованная область и точки с ошибками — спектр нейтрино, ожидаемых из измерения диффузного галактического гамма-излучения LHAASO [55] и Tibet-AS γ [56] соответственно (см. раздел 4.3).

кой — полным потоком нейтрино галактического происхождения, оцениваемым на основе предположений о том, какая часть его вкладывает в зарегистрированный поток. Это легко сделать, когда поток ищется по шаблону (статья IceCube [9]).

Такой пересчёт для результата ANTARES [53] был представлен в докладе [54], а для работы [52] его легко произвести на основе оценённой в статье доли от диффузного потока нейтрино, относящейся к Млечному Пути. Результаты сравнения пересчитанных таким образом спектров показаны на рис. 5. Они указывают на качественное согласие всех трёх анализов, но не позволяют провести детальное количественное сравнение без обращения к конкретным данным, использованным при их получении. Мы вернёмся к этому обсуждению в разделе 4.4.

4.3. Галактическое диффузное нейтринное и гамма-излучение выше 100 ТэВ

Одновременно с диффузным нейтринным излучением в диске Галактики должны рождаться и фотоны того же диапазона энергий. В отличие от внегалактического, гамма-излучение диапазона энергий порядка десятков ТэВ почти не поглощается за счёт рождения e^+e^- -пар на фоновых фотонах, поэтому сопутствующее нейтринному фотонное излучение от Млечного Пути может быть зарегистрировано. Оно было открыто на установке Tibet-AS γ [56] раньше, чем нейтринное излучение Галактики, а в 2023 г. зарегистрировано и независимым экспериментом LHAASO [55]. В целом, результаты двух установок качественно согласуются между собой, хотя поток, измеренный LHAASO, формально несколько меньше, чем получился у Tibet-AS γ . Это может быть связано с особенностями учёта вклада точечных галактических источников двумя экспериментами или с другими систематическими неопределённостями.

Хотя потоки F_ν и F_γ нейтрино и фотонов, рождающихся одновременно во взаимодействиях протонов высоких энергий, приблизительно связаны простым соотношением

$$F_\nu(E_\nu) \approx 2F_\gamma\left(\frac{E_\nu}{2}\right)$$

(см. обсуждение в [1]), на практике сравнить результаты нейтринных экспериментов с предсказаниями, основанными на приведённой формуле, не так легко. Дело вновь в том, что анализы относятся к разным областям неба и к разным энергиям, а также получены разными методами. Некоторые попытки сравнения были сделаны в работах [52, 57–59]; они указывают на хорошее согласие результатов измерений нейтринного [9, 52, 53] и фотонного [55, 56] потоков диффузного излучения Млечного Пути между собой, тем самым косвенно подтверждая происхождение обоих в адронных взаимодействиях. Это иллюстрирует рис. 5, где мы приводим вместе с нейтринными потоками их ожидания из диффузного фотонного излучения Галактики, измеренного двумя экспериментами. Для последнего пересчёта были использованы результаты [58].

4.4. Угловое распределение галактических нейтрино

Для количественного понимания механизмов происхождения галактических нейтрино ключевым является вопрос о пространственном распределении их источников. Здесь, на первый взгляд, наблюдается некоторое противоречие между результатами разных анализов. Как мы сейчас увидим, на сегодняшний день это противоречие является кажущимся.

Угловое распределение диффузного галактического излучения в шаблонах, используемых IceCube [9], в значительной степени определяется распределением вещества в диске Галактики и потому представляет собой узкую полосу на небе (шириной в несколько градусов, наподобие наблюдаемого в видимом излучении Млечного Пути). В то же время модельно-независимое исследование [52] указывает на избыток событий в значительно более широкой полосе $|b| \lesssim 20^\circ$. Отметим, что основной результат [52] не использует и напрямую не предсказывает ширину полосы, и эта величина появляется в дополнительном анализе, причём как для основной выборки событий с энергиями выше 200 ТэВ, так и при заметно более низких энергиях.

Чтобы разобраться в причинах таких разных результатов, обратим внимание на существенную разницу в нормировках спектров галактического диффузного излучения IceCube [9], полученных с использованием разных шаблонов (см. рис. 5). При низких энергиях (именно там накапливается основная статистика) разница в потоках, предполагающих разные шаблоны, составляет несколько стандартных отклонений. Отметим также, что наибольшая статистическая значимость получена для шаблона, использующего экстраполяцию на три порядка величины без привлечения какой-либо количественной физической модели. Существенное расхождение в результатах, полученных в рамках разных предположений, вероятно, означает, что хотя бы некоторые из предположений неверны. При этом из-за плохого углового разрешения для каскадных событий IceCube не представляется возможным определить форму галактического нейтринного сигнала надёжным образом без использования заранее предполагаемого шаблона. Рисунок 4 качественно демонстрирует, что избыток каскадных событий IceCube от галактической плоскости, возможно, согласуется и с более широким распределением направлений прихода, нежели заложено в шаблонах.

Любая модель происхождения диффузного потока нейтрино от взаимодействия космических частиц с веще-

ством в диске Галактики использует распределение этого вещества и зависящие от точки пространства спектры космического излучения. В то время как распределение газа достаточно хорошо известно из наблюдений, о концентрации и спектрах космических лучей в удалённых областях диска мы можем судить только по косвенным данным. Последнее связано со сложным характером движения заряженных частиц в магнитных полях, которые сами известны очень плохо. На сегодняшний день многие модели распространения заряженных космических частиц в Галактике основываются на упрощённых предположениях. Одно из ключевых предположений состоит в том, что регистрируемый в окрестностях Земли спектр галактических космических лучей является репрезентативным для Галактики. Существует ряд указаний на то, что такое предположение не соответствует действительности (см., например, [60–63]). В частности, наличие близкого источника космических лучей в сочетании с повышенной плотностью газа в так называемом Местном пузыре может привести к увеличенному вкладу близкой области Галактики в наблюдаемый поток нейтрино [60, 64]. В проекции на небесную сферу этот поток будет приходиться с более высоких галактических широт, чем основной вклад от диска Галактики, что приведёт к уширению распределения галактических нейтрино по широте.

5. Перспективы

Основными факторами, ограничивающими дальнейшее развитие нейтринной астрофизики, определение и изучение источников нейтрино высоких энергий, остаются высокая доля неастрофизических событий (фон атмосферных нейтрино и мюонов) и неточность определения параметров нейтрино (большие статистические и систематические ошибки). Не удивительно, что перспективы развития этой области науки связаны с решением двух упомянутых проблем.

5.1. Борьба с атмосферными фонами: высокие энергии и большая статистика

Поскольку атмосферный фон является неустранимым, а каждое отдельно взятое атмосферное нейтрино ничем не отличается от астрофизического, продвижения здесь могут быть связаны лишь с увеличением количества зарегистрированных событий, для чего требуется большой эффективный объём детектора. С одной стороны, большая статистика позволяет точнее выделить вклад астрофизических нейтрино в полный наблюдаемый сигнал — ансамбли нейтрино атмосферного и астрофизического происхождения имеют разные распределения по энергиям, ароматовому составу и направлениям прихода. С другой, увеличение объёма детектора позволяет регистрировать редкие события с очень высокими энергиями, для которых атмосферный фон невелик.

Среди конкретных планов строительства экспериментов, существенно превышающих по размеру работающие сегодня, — проект IceCube-GEN2 [65], предполагающий расширение имеющегося детектора IceCube (1 км^3) до занятого инструментом объёма в $7,9 \text{ км}^3$ (в основном за счёт увеличения площади, потому что при увеличении глубины сильно ухудшаются оптические свойства льда). Количество нейтринных событий по сравнению с IceCube должно возрасти примерно пропорционально объёму. За

пределами действующего сегодня детектора расстояние между струнами оптических модулей будет существенно увеличено.

Помимо IceCube-GEN2, в числе проектируемых детекторов с очень большим объёмом следует упомянуть обсуждаемые ниже, в разделе 5.2, установки TRIDENT [66] и HUNT [67].

Для нейтрино с энергиями $\gtrsim 10^{17}$ эВ атмосферный фон отсутствует, и основной проблемой становятся низкие потоки. Основные надежды в этом диапазоне энергий связаны с детектированием нейтрино по радиоизлучению вызываемых ими каскадных процессов (проекты ARA [68], ARIANNA [69], RNO-G [70], GRAND [71] и др.). Возможные потоки астрофизических нейтрино ещё более высоких энергий столь малы, что для их регистрации нужны космические аппараты, просматривающие одновременно большие объёмы атмосферы Земли (JEM-EUSO [72], POEMMA [73] и др.). Обсуждение таких энергетических диапазонов выходит за рамки данной работы.

5.2. Борьба за точность: детекторы в жидкой воде

В ближайшее время на Южном полюсе будет реализован проект IceCube Upgrade [74] (не путать с IceCube-GEN2), который, в числе прочего, будет включать установку дополнительных калибровочных устройств, позволяющих точнее учитывать оптические свойства льда и тем самым улучшить точность определения параметров нейтрино. Однако свойства льда меняются в пределах рабочего объёма установки, а калибровка будет проведена только в небольшой его области. Основные перспективы уточнения характеристик нейтринных событий связаны с использованием нейтринных детекторов в жидкой воде (см. обсуждение в [1]).

На сегодняшний день крупнейшим водным нейтринным детектором является Baikal-GVD [75], объём которого по состоянию на 2023 г. составляет около $0,6 \text{ км}^3$ и ежегодно увеличивается примерно на $0,1 \text{ км}^3$. Данные, полученные на Baikal-GVD в неполной конфигурации, используются для астрофизических анализов с 2018 г. (см. обсуждения в предыдущих разделах). К другим детекторам масштаба $\sim 1 \text{ км}^3$ относятся KM3NeT [76] (Средиземное море), который начал набор данных в 2022 г., и проектируемые инструменты P-ONE [77] (Тихий океан, с использованием инфраструктуры для изучения океана у берегов Канады, ведутся работы на прототипе) и NEON [78] (Южнокитайское море, существенно более плотным, по сравнению с действующими телескопами, расположением оптических модулей). Также в Южнокитайском море предлагается разместить установку TRIDENT [66] с рабочим объёмом 8 км^3 . Наконец, наиболее далеко идущие планы недавно представила группа исследователей, связанных с упоминавшимся выше экспериментом LHAASO: проект эксперимента HUNT [67] нацелен на создание нейтринного телескопа с рабочим объёмом до 30 км^3 . В качестве места размещения такого огромного инструмента рассматривается либо достаточно удалённая от берега локация в Южнокитайском море, либо озеро Байкал, где меньше глубина, но зато имеется удобная инфраструктура. Испытания оборудования на первой из этих двух площадок прошли в 2022–2023 гг., а на Байкале запланированы на 2024 г. Нейтринный телескоп на озере Байкал более 25 лет назад впервые в истории зарегистрировал нейтринные

события тем методом, которым получены все обсуждавшиеся в настоящей статье результаты [79, 80] (см. также исторический обзор [81]). Возможно, ещё через 25 лет данная установка превратится в самый амбициозный нейтринный детектор в мире с рабочим объёмом, в 30 раз превышающим современный IceCube.

Мы отмечали выше, что существенным ограничением астрофизических возможностей нейтринных экспериментов являются систематические неопределённости, которые для каждого эксперимента свои. Поэтому ключевым фактором надёжности нейтринной астрофизики является объединение усилий разных экспериментов, использующих разные методы, а также имеющих разную чувствительность к Северному и Южному небу. Уже с 2013 г. такие усилия развиваются [82, 83] в рамках Глобальной нейтринной сети³ (GNN). Вероятно, создание фокусных тематических рабочих групп, включающих представителей разных экспериментов, позволит продвинуться гораздо дальше в понимании астрофизических источников нейтрино. Положительный опыт работы таких групп уже имеется в области космических лучей сверхвысоких энергий.

6. Заключение

- Нейтринная астрофизика высоких энергий переходит к новому этапу развития в связи с началом работы экспериментов кубокилометрового масштаба в жидкой воде: Baikal-GVD и KM3NeT. Впервые само существование астрофизических нейтрино подтверждено независимо от IceCube в эксперименте Baikal-GVD.

- Результаты различных анализов, в том числе формально проверяющих сформулированные ранее гипотезы с новыми данными, подтверждают происхождение значительной части астрофизических нейтрино в блазарах. Из-за систематических различий между подходами и наборами данных точную долю потока нейтрино, связанную с блазарами, определить трудно.

- Имеются серьёзные указания на то, что часть регистрируемых на Земле нейтрино рождается в других внегалактических источниках, среди которых сейфертовские галактики и центры галактик, в которых происходят приливные разрушения звёзд.

- Обнаружено нейтринное излучение Млечного Пути. Три независимых анализа, использующие разные данные, качественно согласуются между собой и с наблюдениями диффузного галактического гамма-излучения. Расхождения в результатах модельно-зависимых количественных анализов указывают на возможную необходимость пересмотра моделей распространения космических лучей в диске Галактики.

- Статистическая значимость целого ряда утверждений, указывающих на точечные источники нейтрино, в том числе относящихся к самому первому обнаруженному источнику TXS 0506+056, значительно уменьшается при использовании переобработанных с помощью новых алгоритмов реконструкций тех же событий IceCube. Это снова демонстрирует важность понимания и корректного учёта систематических неопределённостей эксперимента.

- Проекты будущих нейтринных телескопов мотивированы увеличением экспозиции, нужным для более

точного выделения астрофизического сигнала над атмосферным фоном, и использованием жидкой воды для уменьшения статистических и систематических неопределённостей. Эксперименты сегодняшнего поколения объединены в Глобальную нейтринную сеть, обмен данными и совместные анализы в рамках которой должны позволить избавиться от ряда неопределённостей в выводах уже в ближайшие годы.

Автор признателен за интересные и полезные обсуждения разных аспектов, связанных с происхождением астрофизических нейтрино высоких энергий, своим коллегам, соавторам и участникам научной сессии ОФН РАН "Гамма-кванты и нейтрино из космоса: что видим сейчас и что нужно, чтобы увидеть больше".

Список литературы

1. Троицкий С В *УФН* **191** 1333 (2021); Troitsky S V *Phys. Usp.* **64** 1261 (2021)
2. Allakhverdyan V A et al. (Baikal-GVD Collab.) *Phys. Rev. D* **107** 042005 (2023)
3. Naab R, Ganster E, Zhang Z *PoS ICRC2023* 1064 (2023)
4. Silva M, Mancina S, Osborn J *PoS ICRC2023* 1008 (2023)
5. Abbasi R et al. *Astrophys. J. Suppl.* **269** 25 (2023)
6. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Science* **361** eaat1378 (2018)
7. Abbasi R et al. *PoS ICRC2023* 1030 (2023)
8. Abbasi R et al. (IceCube Collab.) *Science* **378** 538 (2022)
9. Abbasi R et al. (IceCube Collab.) *Science* **380** 1338 (2023)
10. Abbasi R et al. *PoS ICRC2021* 1045 (2021)
11. Lagunas Gualda C et al. *PoS ICRC2023* 1186 (2023)
12. Abbasi R et al. *PoS ICRC2023* 1478 (2023)
13. Kankare E et al. (Pan-STARRS Collab.) *Astron. Astrophys.* **626** A117 (2019)
14. Plavin A et al. *Astrophys. J.* **894** 101 (2020)
15. Giommi P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **497** 865 (2020)
16. Plavin A V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **523** 1799 (2023)
17. Allakhverdyan V A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **527** 8784 (2024)
18. Dzhilkibaev Z A, Suvorova O, Baikal-GVD Collab., The Astronomer's Telegram (15112) 1 (2021)
19. Aynutdinov V M et al. *PoS ICRC2023* 1458 (2023)
20. Petkov V B et al., The Astronomer's Telegram (15143) 1 (2021)
21. Petkov V B et al. *PoS MUTO2022* 033 (2022)
22. Filippini F et al., The Astronomer's Telegram (15290) 1 (2022)
23. Sahakyan N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **519** 1396 (2023)
24. Prince R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **527** 8746 (2024)
25. Acharyya A et al. *Astrophys. J.* **954** 70 (2023)
26. Giommi P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **497** 865 (2020)
27. Kun E et al. *Astrophys. J.* **934** 180 (2022)
28. Abbasi R et al. *Astrophys. J.* **954** 75 (2023)
29. Plavin A V et al. *Astrophys. J.* **908** 157 (2021)
30. Zhou B, Kamionkowski M, Liang Y *Phys. Rev. D* **103** 123018 (2021)
31. Plavin A et al. *PoS ICRC2021* 967 (2021)
32. Suray A, Troitsky S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **527** L26 (2024)
33. Albert A et al. *Astrophys. J.* **964** 3 (2024)
34. Buson S et al. *Astrophys. J. Lett.* **933** L43 (2022); *Astrophys. J. Lett.* **934** L38 (2022) Erratum
35. Buson S et al., arXiv:2305.11263
36. Bellenghi C et al. *Astrophys. J. Lett.* **955** L32 (2023)
37. Kalashev O E, Kivokurtseva P, Troitsky S *JCAP* **2023** (12) 007 (2023)
38. Daly R A, Marscher A P *Astrophys. J.* **334** 539 (1988)
39. Plavin A V et al., arXiv:2306.00960
40. Aartsen M G et al. *Astrophys. J.* **835** 151 (2017)
41. Aartsen M G et al. *Phys. Rev. Lett.* **124** 051103 (2020)
42. Neronov A, Savchenko D, Semikoz D V *Phys. Rev. Lett.* **132** 101002 (2024)
43. Abbasi R et al. (IceCube Collab.), arXiv:2101.09836
44. Stein R et al. *Nat. Astron.* **5** 510 (2021)
45. Reusch S et al. *Phys. Rev. Lett.* **128** 221101 (2022)
46. van Velzen S et al., arXiv:2111.09391
47. IceCube Collab., Aartsen M et al. *Science* **361** 147 (2018)

³ <https://www.globalneutrino.org/>.

48. Abbasi R et al. *PoS ICRC2023* 1465 (2023)
49. Kahneman D *Thinking, Fast and Slow* (New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011)
50. Allakhverdyan V A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **526** 942 (2023)
51. Kheirandish A *Astrophys. Space Sci.* **365** 108 (2020)
52. Kovalev Y Y, Plavin A V, Troitsky S V *Astrophys. J. Lett.* **940** L41 (2022)
53. Albert A et al. (ANTARES Collab.) *Phys. Lett. B* **841** 137951 (2023)
54. Lamoureux M et al. *PoS ICRC2023* 1103 (2023)
55. Cao Z et al. (LHAASO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **131** 151001 (2023)
56. Amenomori M et al. (Tibet AS_γ Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **126** 141101 (2021)
57. Shao C, Lin S, Yang L *Phys. Rev. D* **108** L061305 (2023)
58. Fang K, Murase K *Astrophys. J. Lett.* **957** L6 (2023)
59. Yan K et al. *Nat. Astron.* (2024) <https://doi.org/10.1038/s41550-024-02221-y>; arXiv:2307.12363
60. Andersen K J, Kachelriess M, Semikoz D V *Astrophys. J. Lett.* **861** L19 (2018)
61. Koldobskiy S, Neronov A, Semikoz D *Phys. Rev. D* **104** 043010 (2021)
62. Giacinti G, Semikoz D, arXiv:2305.10251
63. Neronov A et al. *Phys. Rev. D* **108** 103044 (2023)
64. Bouyahiaoui M, Kachelrieß M, Semikoz D V *Phys. Rev. D* **101** 123023 (2020)
65. Aartsen M G et al. *J. Phys. G* **48** 060501 (2021)
66. Ye Z P et al., arXiv:2207.04519
67. Huang T Q et al. *PoS ICRC2023* 1080 (2023)
68. Allison P et al. *Astropart. Phys.* **35** 457 (2012)
69. Barwick S W et al. *Astropart. Phys.* **70** 12 (2015)
70. Aguilar J A et al. *JINST* **16** P03025 (2021); *JINST* **18** E03001 (2023) Erratum
71. Fang K et al. *PoS ICRC2017* 996 (2018)
72. Takahashi Y, JEM-EUSO Collab. *New J. Phys.* **11** 065009 (2009)
73. POEMMA Collab., Olinto A V et al. *JCAP* **2021** (06) 007 (2021)
74. Ishihara A *PoS ICRC2019* 1031 (2021)
75. Avrorin A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **639** 30 (2011)
76. Adrián-Martínez S et al. *J. Phys. G* **43** 084001 (2016)
77. Agostini M et al. *Nat. Astron.* **4** 913 (2020)
78. Zhang H et al. *PoS ICRC2023* 1017 (2023)
79. Balkanov V A et al. (Baikal Collab.), astro-ph/9705245
80. Balkanov V A et al. *Astropart. Phys.* **12** 75 (1999)
81. Шпиринг К *УФН* **191** 1261 (2021); Spiering C *Phys. Usp.* **64** 1198 (2021)
82. Шпиринг К *УФН* **184** 510 (2014); Spiering C *Phys. Usp.* **57** 470 (2014)
83. Spiering C *J. Phys. Conf. Ser.* **1690** 012178 (2020)

Origin of high-energy astrophysical neutrinos: new results and prospects

S.V. Troitsky

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences,
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7A, 117312 Moscow, Russian Federation;
Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation
E-mail: st@ms2.inr.ac.ru*

High-energy neutrino astrophysics is developing intensively, and new and exciting results have been obtained in the last two years. Among them are the confirmation of the existence of a diffuse flux of astrophysical neutrinos by the new independent Baikal-GVD experiment, the discovery of neutrino emission in our Galaxy, new confirmations of the connection of some astrophysical neutrinos to blazars, and much more. This brief review, based on the author's presentation at the session of the RAS Physical Science Division, "Gamma quanta and neutrinos from space: what we can see now and what we need to see more," summarizes the results obtained since the publication of the review [*Phys. Usp.* **64** 1261 (2021)] and can be considered a companion to it.

Keywords: high-energy astrophysics, neutrino astrophysics, multimessenger astronomy

PACS numbers: **95.30. – k**, **95.55.Vj**, **98.70. – f**

Bibliography — 83 references

Received 22 October 2023

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (4) 371 – 383 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (4) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039581>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.04.039581>