Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 5, с. 315 – 325

Событие ультравысокой энергии KM3-230213A как космогенное нейтрино в свете минимальных моделей потока КЛУВЭ

М. Ю. Кузнецов[+1)], *Н. А. Петров*[+*1)], *Я. С. Савченко*[*×1)]

[+]*Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия*

[*]*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия*

[×]*Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 19 ноября 2025 г.
После переработки 20 января 2026 г.
Принята к публикации 21 января 2026 г.

Недавно в рамках эксперимента KM3NeT было зафиксировано событие регистрации нейтрино с исключительно высокой энергией $E = 220$ ПэВ, происхождение которого остается неясным. Соответствующий этому событию поток нейтрино находится в противоречии с результатами других экспериментов по поиску нейтрино высоких энергий. В данной работе мы рассматриваем гипотезу о том, что данное нейтрино является космогенным, т.е. рожденным космическими лучами ультравысоких энергий в процессе их распространения через межгалактическую среду. Мы используем модели потока космическими лучами ультравысоких энергий, полученные экспериментом Telescope Array, для которого характерен преимущественно легкий массовый состав первичных частиц. Показано, что предсказания потока космогенных нейтрино в рамках этих моделей согласуются как с данными только KM3NeT, так и с результатами "глобальной нейтринной обсерватории" на уровне значимости около 2σ. Примечательно, что данный результат получен в минимальной версии моделей потока космических лучей ультравысоких энергий, предполагающей одну популяцию источников со стандартной космологической эволюцией. Мы также приводим оценку соответствующего потока космогенного гамма-излучения и показываем, что он не противоречит измерениям изотропного диффузного гамма-излучения (IGRB), выполненным телескопом Fermi-LAT, а также ограничениям на поток гамма-излучения ультравысоких энергий. Уточнение последних в будущем позволит провести проверку данных теоретических предсказаний.

DOI: 10.7868/S3034576626030019

1. Введение. 13 февраля 2023 года в рамках эксперимента KM3NeT было зарегистрировано событие исключительно высокой энергии, получившее обозначение KM3-230213A [1]. Данное событие соответствует мюону с расчетной энергией 120 ПэВ, который, в свою очередь, был рожден еще более высокоэнергетическим нейтрино, провзаимодействовавшим в окрестности детектора. В частности, оценка энергии нейтрино составляет 220 ПэВ, а ее значение находится в диапазоне 72 ПэВ$-$2.6 ЭэВ с доверительной вероятностью 90 %. Это делает нейтрино KM3-230213A самым энергичным из всех когда-либо зарегистрированных нейтрино. Примечательно, что другие эксперименты по поиску нейтрино высоких энергий, обладающие значительно большей экспозицией, не наблюдали нейтрино в данном энергетическом диапазоне. Так, верхние пределы на поток нейтрино ультравысоких энергий (УВЭ), полученные в экспериментах IceCube (IC) [2], обсерватории Пьера Оже (Auger) [3] и Baikal-GVD [4], проходят существенно ниже величины потока нейтрино, измеренной KM3NeT. В то же время все современные нейтринные эксперименты высоких энергий могут рассматриваться как единая "глобальная нейтринная обсерватория". В этом случае совместная аппроксимация (joint fit) потока дает p-значение 0.5 % (2.6σ) для случая одного зарегистрированного события в KM3NeT при отсутствии регистраций в экспериментах IceCube и Auger [5]. Соответствующий поток нейтрино оказывается значимо ниже того, что был выведен на основе одних лишь наблюдений KM3NeT. Более того, аномальные события УВЭ ранее также детектировались нейтринным экспериментом ANITA [6], однако их интерпретация как нейтрино УВЭ остается спорной [7].

Происхождение нейтрино KM3-230213A остается предметом дискуссий. В серии работ, последовавших за сообщением об обнаружении, коллаборация KM3NeT рассмотрела возможные сценарии

[1)]e-mail: mkuzn@inr.ac.ru; n.a.petrov@inp.nsk.su; ya.s.savchenko@inp.nsk.su

его происхождения: галактический [8], блазарный [9] и космогенный [10]. Каждое из этих объяснений сталкивается с определенными трудностями. Событие KM3-230213A также использовалось для интерпретаций в рамках физики за пределами Стандартной модели [11–16] и наложения соответствующих ограничений [17–20]. В данной статье мы обсуждаем возможность космогенного происхождения нейтрино KM3-230213A.

Космогенные нейтрино – это нейтрино высоких энергий, рожденные космическими лучами ультравысоких энергий (КЛУВЭ) в процессе их распространения через межгалактическую среду. Следовательно, для рассмотрения нейтрино такого происхождения необходимо сначала обсудить сами КЛУВЭ. Несмотря на многолетние исследования в различных экспериментах, происхождение КЛУВЭ остается открытым вопросом. Предполагается, что они имеют внегалактическую природу, поскольку галактические магнитные поля недостаточно сильны, чтобы удерживать их, а их наблюдаемое распределение по небесной сфере весьма изотропно [21]. Смежной, и до сих пор не решенной, проблемой является массовый состав КЛУВЭ [21]. Знание состава помогло бы в расшифровке происхождения КЛУВЭ. Стандартные методы определения массового состава основаны на анализе развития широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере Земли. На результаты этих методов влияют как стохастическая природа развития ливней, так и неопределенности в их измерениях и моделировании. Так, результаты стандартного определения состава КЛУВЭ, полученные двумя крупнейшими современными экспериментами – Telescope Array (TA) [22] и обсерваторией Пьера Оже (Auger) [23], – находятся в противоречии друг с другом [24, 25]. Существуют также альтернативные методы определения массового состава КЛУВЭ, основанные либо на измерениях наземных детекторов [26–29], либо на анизотропии КЛУВЭ [30, 31]. Однако первые подвержены еще большим неопределенностям в физике ШАЛ, чем стандартный метод, в то время как вторые зависят от неопределенностей в моделировании потока КЛУВЭ, из-за чего их результаты надежны только при самых высоких энергиях $E > 100$ ЭэВ.

Поток космогенных нейтрино рождается в $p\gamma$-процессах и чувствителен к массовому составу КЛУВЭ. Определение массового состава КЛУВЭ с помощью потока космогенных нейтрино свободно от неопределенностей, сопровождающих его выведение из измерений ШАЛ. Это преимущество послужило стимулом для интенсивного развития моделей космогенных нейтрино в последние годы [32–34], а также для их экспериментальных поисков [2, 35, 36], включая проекты будущих гигантских установок [37–39]. Возможен и обратный подход: задавшись определенной моделью потока КЛУВЭ, можно предсказать поток космогенных нейтрино и оценить его соответствие результатам нейтринных измерений. Данный подход был применен к анализу события KM3-230213A в ряде работ [10, 40–42]. Примечательно, что все они основывались на моделях потока КЛУВЭ, опирающихся на данные Auger о массовом составе. В настоящем исследовании мы рассматриваем нейтрино KM3-230213A как космогенное, предполагая минимальные модели потока КЛУВЭ с доминированием легких ядер, что согласуется с результатами эксперимента TA [43]. В рамках этих моделей мы также рассчитываем потоки космогенных каскадных гамма-квантов в МэВ–ГэВ диапазоне и космогенных гамма-квантов ультравысоких энергий. Первые сопоставляются с данными Fermi-LAT по IGRB [44], а последние – с данными Auger и TA по диффузному потоку гамма-излучения УВЭ [45–48].

Статья организована следующим образом. В разделе 2 кратко представлены данные по нейтрино различных экспериментов, используемые в работе. В разделе 3 описываются модели потока КЛУВЭ, а также численное моделирование распространения космических лучей и генерации космогенных потоков. В разделе 4 на основе выбранных моделей рассчитывается поток космогенных нейтрино и проводится сравнение полученных предсказаний с нейтринными данными отдельных экспериментов и их комбинаций. В разделе 5 вычисляется поток космогенного гамма-излучения в рамках тех же моделей КЛУВЭ и проводится его сопоставление с данными гамма-астрономии. В разделе 6 мы сравниваем наши результаты с другими исследованиями и обсуждаем перспективы будущей проверки рассмотренных моделей КЛУВЭ.

2. Данные по нейтрино УВЭ. В данной работе мы рассматриваем результаты поиска нейтрино УВЭ в нескольких экспериментах, таких как KM3NeT [1], IceCube (9 лет набора данных) [49], IceCube (12 лет набора данных) [2], Pierre Auger [3] и Baikal-GVD [4]. Время работы этих экспериментов приведено в табл. 1.

Для оценки ожидаемого числа событий в эксперименте необходимо знать экспозицию детектора $\mathcal{E}(E)$, которая зависит от времени работы T и эффективной площади $A_{\rm eff}(E)$:

$$\mathcal{E}(E) = 4\pi \cdot T \cdot A_{\rm eff}(E). \qquad (1)$$

Таблица 1. Время работы нейтринных экспериментов. Детектор Baikal-GVD состоит из нескольких независимых кластеров. Поскольку в процессе эксплуатации телескоп достраивался и расширялся, время его работы удобно выражать в "кластер-годах"

Experiment	Operation time
KM3NeT	335 days
Pierre Auger	18 years
IceCube 9 years	3142.5 days
IceCube 12 years	4605 days
Baikal-GVD	26.8 cluster-years

В нашем случае эффективная площадь $A_{\rm eff}(E)$ усреднена по небесной сфере, просуммирована по всем ароматам нейтрино и усреднена по нейтрино и антинейтрино. Эффективные площади для рассматриваемых экспериментов показаны на рис. 1. За исключением KM3NeT, данные эксперименты не зарегистрировали нейтринных событий в обсуждаемом в данной работе энергетическом диапазоне (72 ПэВ–2.6 ЭэВ).

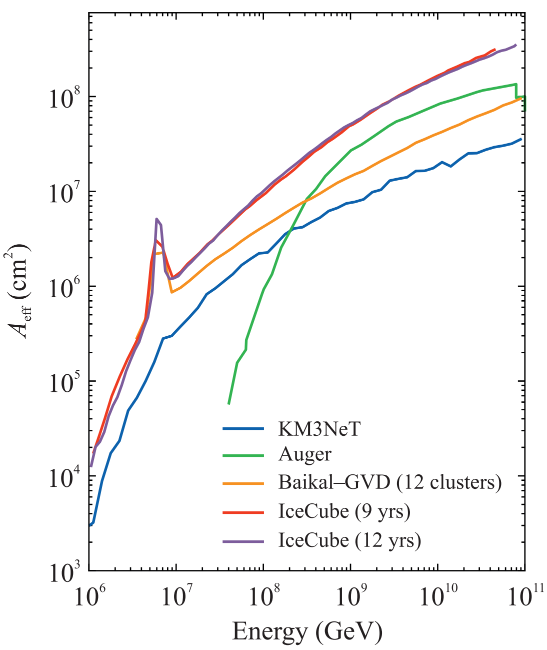

Рис. 1. (Цветной онлайн) Эффективные площади экспериментов, использованные в данной работе. Значения усреднены по всей небесной сфере, просуммированы по всем ароматам нейтрино и усреднены по нейтрино и антинейтрино

3. Модели потока КЛУВЭ и моделирование космогенных нейтрино. Космогенные нейтрино рождаются при распространении КЛУВЭ сквозь космологический фотонный фон, а именно: внегалактический фоновый свет (EBL) и реликтовое микроволновое излучение (CMB) [50–52]:

$$p + \gamma_{bkg} \to \Delta^+ \to n + \pi^+$$
$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu. \qquad (2)$$

При распаде Δ^+-резонанса вместо нейтрона может образоваться протон:

$$p + \gamma_{bkg} \to \Delta^+ \to p + \pi^0. \qquad (3)$$

Этот протон по-прежнему обладает УВЭ. Он может, в свою очередь, взаимодействовать с фотонами CMB и EBL (ур. (2)), порождая новые нейтрино.

π^0-мезон, возникающий при распаде Δ^+ (ур. (3)), почти мгновенно распадается на два фотона: $\pi^0 \to \to \gamma\gamma$. Эти фотоны обладают огромной энергией ($E > 10^{17}$ эВ) и называются гамма-квантами УВЭ. Гамма-кванты УВЭ, рожденные относительно близко к Земле ($\leq$ нескольких Мпк [53]), имеют шанс избежать взаимодействий и достичь Земли, сохранив свою высокую энергию. Их количество должно быть невелико, и на данный момент существуют лишь верхние пределы на их поток [45–47]. Гамма-кванты УВЭ от более далеких источников взаимодействуют с фоновыми фотонами и порождают электромагнитный каскад: $\gamma + \gamma_{bkg} \to e^+e^-$. Свой вклад в $e^\pm$-каскады также вносят протоны УВЭ (ур. (2), (3)), теряющие энергию на рождение пар: $p+\gamma \to p+e^+e^-$. Энергии фотонов в результирующих каскадах варьируются от $\sim$ ГэВ до сотен ГэВ; такие фотоны могут быть зарегистрированы гамма-обсерваториями [54].

Ожидаемые потоки космогенных нейтрино и диффузных фотонов УВЭ сильно зависят от состава КЛУВЭ, так как протоны производят много пионов, в то время как тяжелые ядра ($A > 1$) чаще распадаются на более легкие фрагменты, а не производят большое количество пионов напрямую. Также крайне важна эволюция источников КЛУВЭ с красным смещением, поскольку более многочисленные или яркие источники на больших красных смещениях приводят к увеличению потока у Земли [55]. Последнее применимо только к каскадным фотонам, так как фотоны УВЭ рождаются относительно близко к Земле, т.е. при малых красных смещениях. Наконец, поток нейтрино сильно зависит от максимальной энергии ускорения в источниках, так как она определяет число протонов с энергиями, достаточными для фотопионового рождения (см. ур. (2), (3)) [56].

Модели потока КЛУВЭ. Данное исследование основано на моделях источников КЛУВЭ, представленных в работе [43]. Эти модели были получены на основе совместной аппроксимации (combined fit) измерений спектра наземными детекторами (SD) TA [57] и стереоскопических измерений состава флуоресцентными детекторами (FD) TA [58]. В данном разделе мы кратко обсудим основные свойства и методологию моделей КЛУВЭ эксперимента TA.

Предполагается, что источники КЛУВЭ идентичны и распределены равномерно в соответствии с функцией эволюции источников (SE) [32]:

$$\mathrm{SE}(z) = \begin{cases} (1+z)^3 & \text{при } z < 1.5 \\ 2.5^3 & \text{иначе} \end{cases}, \tag{4}$$

где максимальное значение красного смещения z составляет $z_{\max} = 4$.

Источники испускают смесь ядер пяти типов (A): протоны (p), гелий (^{4}He), азот (^{14}N), кремний (^{28}Si) и железо (^{56}Fe) с заданными долями f_A. У спектров всех источников одинаковые наклоны степенного закона γ и зависящий от магнитной жесткости излом с экспоненциальным подавлением. Таким образом, дифференциальный энергетический спектр испускаемых источником ядер A dN_A/dE имеет следующий вид:

$$\frac{dN_A}{dE} = f(E) \cdot \begin{cases} 1 & \text{при } E < Z_A R_{\max} \\ \exp\left(1 - \frac{E}{Z_A R_{\max}}\right) & \text{иначе} \end{cases}$$

$$f(E) = J_0 f_A \cdot \left(\frac{E}{1\ \mathrm{EeV}}\right)^{-\gamma},$$

где J_0 – константа нормировки спектра, Z_A – заряд ядра A, а R_{max} – максимальная жесткость. Следовательно, параметрами потока КЛУВЭ являются: γ, $R_{\max}$ и пять долей ядер f_A, сумма которых равна единице. Общая структура этой модели следует аналогичному исследованию коллаборации Auger [59].

Модель построена с использованием только данных TA по спектру и $X_{\max}$ для энергий $E > 10^{18.7}$ эВ, т.е. выше “щиколотки” (ankle) спектра. Это подразумевает, что поток КЛУВЭ при более низких энергиях порождается отдельной популяцией источников и не описывается данной моделью. Хотя низкоэнергетическая компонента КЛУВЭ должна существовать, она не обязательно является внегалактической и не обязательно легкой. Оба этих варианта привели бы к пренебрежимо малому потоку космогенных нейтрино. Поэтому в данном исследовании мы не используем какую-либо модель для компоненты ниже “щиколотки” и фокусируемся на высокоэнергетической компоненте как на минимальной модели для описания данных нейтринных экспериментов высоких энергий. Также мы хотели бы подчеркнуть, что эволюция источников в рассматриваемой модели потока является фиксированной.

Моделирование. Распространение ядер моделируется с использованием программы CRPropa (версия 3.2.1) [60]. Моделирование учитывает взаимодействие КЛУВЭ с реликтовым излучением (CMB) и использует модель Гилмора [61] для инфракрасного фонового излучения (IRB) при расчете процессов фотопионового рождения, фоторасщепления ядер и рождения электрон-позитронных пар. Также рассчитываются электромагнитные взаимодействия, такие как рождение электронных пар и обратное комптоновское рассеяние.

В нашем исследовании мы рассматриваем два результата (т.е. две модели) совместной аппроксимации спектра и состава космических лучей по данным TA. Один из них соответствует глобальному минимуму (наилучшей аппроксимации), а другой – локальному [43]. Для простоты мы называем их “best-fit” и “local min.” соответственно. Их параметры приведены в табл. 2. Для обеих моделей мы промоделировали распространение космических лучей для одного миллиона событий.

Таблица 2. Параметры используемых моделей источников КЛУВЭ. Коэффициенты f_A для ядер, не указанных в таблице, равны нулю

Model	γ	$R_{\max}$	f_A
Best-fit	2.06	182 EV	He: 0.992, Fe: 0.008
Local min.	0.78	15.8 EV	p: 0.971, Fe: 0.029

На рисунке 2 проведено сравнение измеренного спектра наземных детекторов (SD) TA [57] со спектрами, рассчитанными для двух моделей. На этом рисунке измеренный спектр сдвинут на $\Delta \log_{10} E = -0.12$, согласно процедуре аппроксимации из работы [43], для учета возможных систематических неопределенностей в измерении энергии. Суммарные потоки ядер, рассчитанные с помощью CRPropa, нормированы на спектр TA в точке с энергией 20 ЭэВ. Мы убедились, что спектры компонент КЛУВЭ из оригинального исследования [43] хорошо воспроизводятся в наших расчетах.

Из рисунка 2 видно, что модель “local min.” не воспроизводит измеренный спектр при самых высоких энергиях. Качество аппроксимации для модели “local min.” также значительно хуже, чем для модели “best-fi”. Тем не менее, мы полагаем, что рассмотрение этой модели наравне с “best-fit” представляет интерес. Та часть спектра в области высоких энергий, которая не описывается моделью “local min.”, может быть отнесена к отдельному близкому источни-

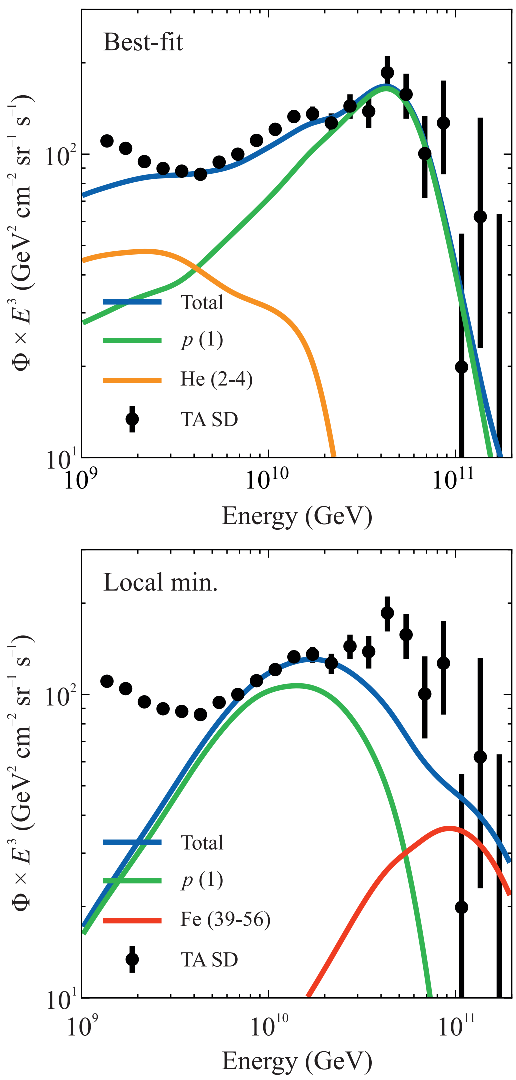

Рис. 2. (Цветной онлайн) Смоделированные спектры массовых компонент КЛУВЭ в соответствии с моделями потока TA (сплошные линии). Верхний и нижний графики соответствуют моделям “best-fit” (наилучшая аппроксимация) и “local min.” (локальный минимум) соответственно. Черные точки с ошибками – спектр всех частиц КЛУВЭ, измеренный TA SD

ку КЛУВЭ. Действительно, недавнее исследование TA указывает на существенную зависимость спектра всех частиц от склонения: в северной части неба наблюдается избыток при самых высоких энергиях [62]. Данное наблюдение может быть интерпретировано как вклад локального источника [63]. В пользу такой интерпретации существуют независимые аргументы. Во-первых, имеются свидетельства в пользу наличия близкого источника КЛУВЭ [64], следующие из недавней регистрации частицы экстремально высокой энергии экспериментом TA [65]. Во-вторых, тяжелый состав при самых высоких энергиях в модели “local min.” согласуется с недавними результатами TA о преобладании тяжелых ядер в этом энергетическом диапазоне [30, 31]. Таким образом, мы полагаем, что модель “local min.” представляет особый интерес для исследования.

4. Предсказания потока нейтрино и сравнение с данными. Мы моделируем распространение ядер, испускаемых источниками КЛУВЭ, для двух моделей, описанных в предыдущем разделе, методами Монте-Карло, используя программу CRPropa. Эти расчеты также включают рождение космогенных нейтрино в результате взаимодействия космических лучей с EBL и CMB. Результаты моделирования включают наблюдаемый поток космогенных нейтрино (электронную и мюонную компоненты), поток КЛУВЭ, а также поток гамма-излучения. Все выходные потоки масштабируются на один и тот же коэффициент, полученный из аппроксимации суммарного потока КЛУВЭ к наблюдаемому спектру TA, как описано в предыдущем разделе. Чтобы учесть нейтринные осцилляции, мы дополнительно проводим усреднение по всем ароматам нейтрино и суммируем вклады от нейтрино и антинейтрино для получения итогового потока космогенных нейтрино: $\Phi^{1f}_{\nu+\bar{\nu}}(E)$. Важно отметить, что источники КЛУВЭ с $z > 1$ вносят малый вклад в спектр космических лучей, однако их вклад в поток нейтрино является существенным.

Первая простая проверка наших моделей потока включает сравнение с так называемым потоком “только KM3NeT” (KM3NeT-only) [1] и потоком совместной аппроксимации E^{-2} [4]. Поток “только KM3NeT” – это поток $\Phi(E) \propto E^{-2}$, необходимый для получения ровно одного нейтринного события в энергетическом диапазоне, связанном с событием KM3-230213A (с доверительной вероятностью 90 %). Построенная по аналогии совместная аппроксимация дополнительно учитывает отсутствие регистраций в том же энергетическом диапазоне в экспериментах Auger, IceCube (12 лет) и Baikal-GVD. Визуальный анализ рис. 3 показывает, что наши потоки лежат в пределах интервала 3σ потока E^{-2} “только KM3NeT” и совместной аппроксимации, так что статистическое противоречие не является сильным.

Для более детального сравнения с нейтринными экспериментами необходимо оценить ожидаемое число нейтринных событий высоких энергий в данной модели и сравнить его с числом фактически зарегистрированных событий. Для расчета ожидаемого числа событий в конкретном нейтринном эксперименте, $n_{\rm pred}$, необходимо проинтегрировать экспозицию эксперимента $\mathcal{E}(E)$ (1) с потоком космогенных нейтрино $\Phi^{1f}_{\nu+\bar{\nu}}(E)$, предсказанным моделью:

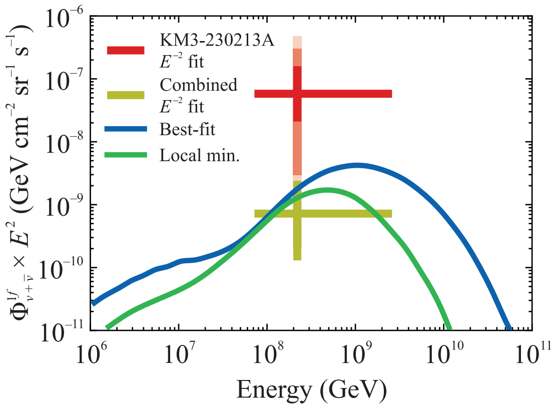

Рис. 3. (Цветной онлайн) Потоки нейтрино, усредненные по типам нейтрино в предположении их равного распределения ($\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$) и умноженные на квадрат энергии. Красными и зелеными крестами обозначены измерения "только KM3NeT" [1] и совместная аппроксимация E^{-2} [4]. Вертикальные отрезки представляют доверительные интервалы 1σ, 2σ, 3σ и 1σ Фельдмана–Казинса [66] для данных оценок соответственно. Синяя и зеленая сплошные линии показывают потоки для моделей "best-fi" и "local min."

$$n_{\text{pred}} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \mathcal{E}(E) \cdot \Phi^{1f}_{\nu+\bar\nu}(E) dE. \qquad (5)$$

В качестве пределов интегрирования $E_{\min}$, $E_{\max}$ мы используем 90 % доверительный интервал для энергии события KM3-230213A (72 ПэВ, 2.6 ЭэВ).

Ожидаемые числа событий приведены в табл. 3. Модель "local min." дает примерно в два раза меньшее ожидаемое число событий, чем модель "best-fit". Обе модели предсказывают как минимум одно событие для IceCube (9 лет) и IceCube (12 лет), чуть меньшее число событий для Auger и значительно меньше одного события для KM3NeT и Baikal-GVD. Обе модели согласуются с данными "только KM3NeT" в пределах около 2σ. В то же время мы можем оценить соответствие наших моделей потока результатам "глобальной нейтринной обсерватории", используя комбинированное p-значение для всех экспериментов. Комбинированные результаты также согласуются с обеими моделями на уровне около 2σ. Детали расчета комбинированной значимости приведены в Приложении.

5. Предсказания потока гамма-излучения и сравнение с данными.

Космогенные каскадные гамма-кванты и Fermi-LAT IGRB. Еще одно важное ограничение на модели источников КЛУВЭ накладывают измерения изотропного диффузного гамма-фона (IGRB) [67]. В частности, для этой цели подходят результаты обсерватории Fermi-LAT в диапазоне энергий от 100 МэВ до 820 ГэВ [44]. Эти ограничения особенно полезны для моделей КЛУВЭ с доминированием протонов, поскольку протоны порождают каскады эффективнее, чем ядра. Энергия протонов преобразуется в электромагнитные каскады посредством фотопионового рождения и образования электрон-позитронных пар на фотонах CMB и EBL [54]. Fermi-LAT способен регистрировать гамма-кванты этого $e^{\pm}$-каскада.

На рисунке 4 показан поток каскадных гамма-квантов, предсказанный моделями "best-fit" и "local min.". Полученные потоки для обеих моделей лежат существенно ниже оценок IGRB от Fermi-LAT. Стоит отметить, что ожидаемый вклад в IGRB мог бы быть выше при учете низкоэнергетической компоненты КЛУВЭ (см., например, [42]). В данной работе мы не рассматриваем такую возможность. Таким образом, мы можем лишь заключить, что наши модели высокоэнергетической компоненты КЛУВЭ не противоречат измерениям Fermi-LAT IGRB.

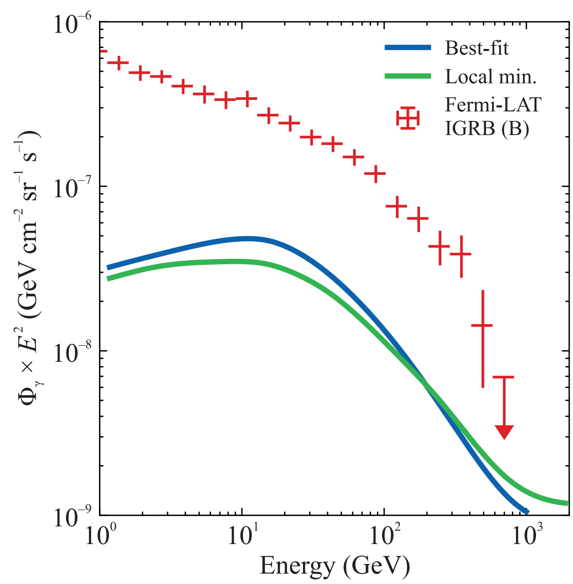

Рис. 4. (Цветной онлайн) Энергетический спектр каскадных фотонов. Синяя и зеленая сплошные линии соответствуют расчетным потокам для моделей "best-fit" и "local min." соответственно. Красные точки с ошибками представляют результаты измерений IGRB телескопом Fermi-LAT для модели галактического переднего плана B [44]

Космогенные гамма-кванты УВЭ. Диффузные гамма-кванты УВЭ с $E > 10^{17}$ эВ рождаются при взаимодействии КЛУВЭ с фоновым излучением по механизму Грайзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) [68, 69]. Эти фотоны впоследствии могут инициировать электромагнитные каскады и терять энергию при распространении. Ожидаемый поток гамма-

Таблица 3. Предсказания двух моделей потока КЛУВЭ и сравнение с результатами различных нейтринных экспериментов. $n_{\rm pred}$ – ожидаемое число нейтринных событий в энергетическом диапазоне KM3-230213A (90 % доверительный интервал), $n_{\rm obs}$ – число зарегистрированных событий. p-значения для отдельных экспериментов рассчитаны по закону Пуассона, статистическая значимость является односторонней. Комбинированные p-значения и значимости рассчитаны для экспериментов KM3NeT, Auger, Baikal-GVD и IC 12 лет (см. Приложение)

Best-fit model					Local min. model				
Experiment	$n_{\rm pred}$	$n_{\rm obs}$	p-value	Significance	Experiment	$n_{\rm pred}$	$n_{\rm obs}$	p-value	Significance
KM3NeT	0.037	1	0.036	1.80σ	KM3NeT	0.019	1	0.019	2.08σ
Auger	1.67	0	0.188	0.89σ	Auger	0.69	0	0.504	–
IC 9 years	1.90	0	0.150	1.04σ	IC 9 years	0.90	0	0.405	0.24σ
Baikal-GVD	0.16	0	0.849	–	Baikal-GVD	0.08	0	0.920	–
IC 12 years	2.97	0	0.051	1.63σ	IC 12 years	1.43	0	0.240	0.71σ
Combined (MC)	–	–	0.019	2.09σ	Combined (MC)	–	–	0.035	1.81σ
Combined (χ^2)	–	–	0.0064	2.49σ	Combined (χ^2)	–	–	0.035	1.81σ

квантов УВЭ мал, и на сегодняшний день сообщений об их регистрации не поступало. Тем не менее, экспериментальные верхние пределы от TA [47, 48] и Auger [45, 46] начинают накладывать ограничения на наиболее оптимистичные (т.е. протонные) модели потока КЛУВЭ.

Здесь мы проверяем модели потока КЛУВЭ эксперимента TA на соответствие этим экспериментальным результатам. На рисунке 5 показаны предсказания интегрального потока гамма-квантов для моделей “best-fit” и “local min.” вместе с наблюдательными верхними пределами. Видно, что предсказания моделей лежат ниже пределов; это означает, что ни одна из моделей не исключается текущими ограничениями на фотоны УВЭ. В то же время пределы при самых высоких энергиях близки к потоку, предсказанному в модели “best-fit”, что указывает на возможность ее проверки в экспериментах по КЛУВЭ в ближайшем будущем. Мы также отмечаем, что из-за относительно малой длины поглощения гамма-квантов УВЭ их измерение позволяет проверить только локальные свойства потока КЛУВЭ, тогда как эволюция источников остается вне досягаемости этих ограничений. Однако для моделей потока, обсуждаемых в данной работе, это не существенно, так как мы ограничиваемся анализом базовой версии моделей с консервативной эволюцией источников.

Важно отметить, что наше моделирование включает только взаимодействия с CMB и EBL. Однако на предсказанный поток фотонов также может влиять универсальный радиофон (URB) [72], который не учтен в наших расчетах. Следовательно, эти предсказания следует интерпретировать как оптимистичную оценку величины потока фотонов УВЭ. В работе [73] было показано, что учет URB снижает поток гамма-квантов УВЭ (например, примерно в 3 раза при $E \approx 10^{10}$ ГэВ).

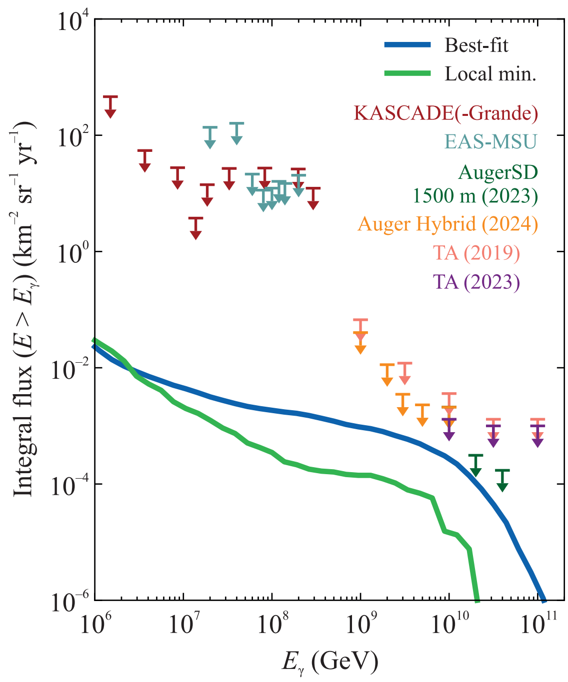

Рис. 5. (Цветной онлайн) Верхние пределы на интегральный поток гамма-квантов УВЭ. Здесь мы сравниваем предсказания моделей (сплошные линии) с наблюдениями (маркеры со стрелками вниз). Верхние пределы Auger [45, 46] обозначены зеленым и оранжевым, пределы TA [47, 48] – розовым и фиолетовым, пределы KASCADE(-Grande) [70] – красным, а пределы ШАЛ-МГУ [71] – бирюзовым. Синяя и зеленая сплошные линии соответствуют моделям “best-fi” и “local min.”

6. Обсуждение. В данном исследовании мы показали, что модели потока КЛУВЭ, описывающие энергетический спектр и данные по $X_{\rm max}$, измеренные в эксперименте Telescope Array, естественным образом предсказывают поток космогенных нейтрино, который вполне согласуется с регистрацией события KM3-230213A УВЭ в эксперименте KM3NeT. В частности, модели предсказывают потоки нейтрино, которые меньше значения, полученного на основе одних только данных KM3NeT, но согласуются с ним на уровне $\sim 2\sigma$. В то же время эти модели дают ожидание в 1−2 нейтринных события в том же энергетическом диапазоне для других нейтринных экспериментов высоких энергий (IceCube, Auger и Baikal-GVD), хотя в них события не наблюдались. Комбинированное "измерение" всех этих экспериментов (включая KM3NeT) согласуется с нашими предсказаниями на том же уровне $\sim 2\sigma$. Состав КЛУВЭ в обеих моделях представлен преимущественно протонами и легкими ядрами. Эволюция источников с красным смещением в этих моделях является стандартной: с показателем степени $m = 3$ при $z < 1.5$ и отсутствие источников при $z > 4$.

Ранее было проведено несколько исследований возможного космогенного происхождения события KM3-230213A [10, 41, 42, 74]. В работе самой коллаборации KM3NeT [10] используется модель КЛУВЭ с промежуточным составом ядер, основанная на результатах эксперимента Pierre Auger [59]. Это приводит к необходимости введения экстремальной эволюции источников (когда большая часть потока нейтрино приходит от очень больших красных смещений), чтобы согласовать модель с регистрацией события KM3-230213A. Другая возможность увеличения потока космогенных нейтрино до уровня измерений KM3-230213A при сохранении моделей с промежуточным составом ядер заключается в добавлении отдельной протонной компоненты к потоку КЛУВЭ [33, 34, 42, 74]. Эта компонента должна иметь другой инжекционный спектр и происходить от иной популяции источников. Однако, как было показано в работе [42], добавление такой компоненты приводит к перепроизводству IGRB в диапазоне 10−100 ГэВ, что делает данный сценарий неправдоподобным.

В этом контексте примечательно, что рассматриваемые нами минимальные модели демонстрируют разумное согласие с данными всех нейтринных экспериментов высоких энергий без какой-либо специальной подстройки. Таким образом, не требуется ни экстремальной эволюции источников, ни вклада от источников на больших красных смещениях, ни дополнительной популяции протонных источников.

Мы также проверили предсказания потоков космогенных гамма-квантов для тех же моделей потока КЛУВЭ на соответствие ограничениям по гамма-излучению от Fermi-LAT, Auger и TA. Ожидаемые потоки не превышают существующих пределов. Предсказания для гамма-квантов УВЭ могут быть проверены в экспериментах Auger и TA при условии повышения эффективности их анализа по поиску гамма-излучения. Например, чувствительность анализа Auger должна быть увеличена примерно в 3 раза, чтобы начать проверку модели "best-fit" при энергии $2 \cdot 10^{10}$ ГэВ, в то же время чувствительность анализа TA должна вырасти в 5 раз при 10^{10} ГэВ. Предсказания модели "local min." остаются недосягаемыми для современных экспериментов по КЛУВЭ, однако в этом отношении сохраняется надежда на будущие космические миссии по регистрации КЛУВЭ.

Программный код, использованный в данной работе, доступен на GitHub[2)].

Авторы выражают благодарность Д. Бергману за разъяснения относительно моделей потока КЛУВЭ эксперимента Telescope Array, а также С. Троицкому, О. Калашеву, Г. Рубцову и П. Сатунину за полезные обсуждения.

Приложение. Расчет комбинированной значимости

Для оценки соответствия конкретной модели данным нейтринных экспериментов мы применяем следующую процедуру. Мы сравниваем наблюдаемое число нейтринных событий (n_i^{obs}) в каждом эксперименте с числом, предсказанным моделью (n_i^{pred}) для того же эксперимента в центральном 90% энергетическом диапазоне события KM3-230213A (72 ПэВ−2.6 ЭэВ). Функция правдоподобия ($\mathcal{L}$) рассчитывается как произведение индивидуальных пуассоновских вероятностей для каждого эксперимента:

$$\mathcal{L} = \prod_i \mathbb{P}(n_i^{\mathrm{obs}}, n_i^{\mathrm{pred}}), \tag{A.1}$$

где индекс i соответствует конкретному эксперименту (KM3NeT, Auger, Baikal-GVD и IceCube 12 лет), а $\mathbb{P}(n^{\mathrm{obs}}, n^{\mathrm{pred}})$ – пуассоновская вероятность наблюдать n^{obs} событий при предсказанном моделью среднем значении n^{pred}.

Чтобы количественно оценить согласие модели с данными, мы вычисляем комбинированное p-значение, определяемое как вероятность получения значения правдоподобия, равного наблюдаемому или ниже него. Затем это p-значение преобразуется в одностороннюю статистическую значимость.

p-значение определяется двумя взаимодополняющими методами: моделированием методом Монте-Карло (Toy MC) и аппроксимацией на основе теоремы Уилкса [75]. В первом методе мы генерируем на-

2) https://github.com/82492749123082/KM3-230213A_UHECR_TA.

бор данных из одного миллиона выборок для каждого эксперимента, где количество событий выбирается из распределения Пуассона со средним значением, предсказанным моделью. Затем p-значение вычисляется исходя из полученного распределения смоделированных правдоподобий. В качестве альтернативы мы используем следующее соотношение, согласно которому удвоенная разность логарифмов правдоподобия распределена по закону хи-квадрат (χ^2):

$$\chi^2 \sim -2\left(\ln\mathcal{L} - \ln\mathcal{L}_0\right), \tag{A.2}$$

где $\mathcal{L}_0$ – максимально возможное правдоподобие, соответствующее "насыщенной" модели (saturated model), в которой предсказанное число событий идеально совпадает с наблюдаемым для каждого эксперимента ($n_i^{\rm pred} = n_i^{\rm obs}$). В нашем случае распределение χ^2 имеет 4 степени свободы, что соответствует четырем независимым экспериментам, включенным в тест. Аналогичный подход использовался в исследовании KM3NeT [5] для количественной оценки согласия комбинированных измерений нескольких экспериментов с моделями нейтринного потока. Таким образом, наши результаты в терминах χ^2 (комбинированные p-значения и соответствующие статистические значимости) могут напрямую сравниваться с результатами упомянутой работы KM3NeT. Однако следует отметить, что этот подход является приближенным; результаты метода Монте-Карло являются более точными.

Важно подчеркнуть, что в данном комбинированном тесте используются независимые экспериментальные результаты. По этой причине мы включаем данные IceCube за 12 лет и исключаем более ранние результаты IceCube за 9 лет, так как они не являются статистически независимыми.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 25-12-00111.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. S. Aiello, A. Albert, A.R. Alhebsi et al. (KM3NeT Collaboration), "Observation of an ultra-highenergy cosmic neutrino with KM3NeT", Nature **638**, 376, (2025).
2. R. Abbasi, M. Ackermann, J. Adams et al. (IceCube Collaboration), "Search for Extremely-High-Energy Neutrinos and First Constraints on the Ultrahigh-Energy Cosmic-Ray Proton Fraction with IceCube", Phys. Rev. Lett. **135**, 031001 (2025).
3. A. Abdul Halim, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger Collaboration), "Latest results from the searches for ultra-high-energy photons and neutrinos at the Pierre Auger Observatory", PoS **ICRC2023**, 1488 (2023).
4. V. A. Allakhverdyan, A. D. Avrorin, A. V. Avrorin et al. (Baikal-GVD Collaboration), "Constraints on the diffuse flux of multi-PeV astrophysical neutrinos obtained with the Baikal Gigaton Volume Detector", Phys. Rev. D **112**, 083025, (2025).
5. O. Adriani, S. Aiello, A. Albert et al. (KM3NeT Collaboration), "Ultrahigh-Energy Event KM3-230213A within the Global Neutrino Landscape", Phys. Rev. X **15**, 031016 (2025).
6. P.W. Gorham, A. Ludwig, C. Deaconu et al. (ANITA Collaboration), "Unusual Near-Horizon Cosmic-Ray-like Events Observed by ANITA-IV", Phys. Rev. Lett. **126**, 071103, (2021).
7. R. Prechelt, S. A. Wissel, A. Romero-Wolf et al. (ANITA Collaboration), "Analysis of a tau neutrino origin for the near-horizon air shower events observed by the fourth flight of the Antarctic Impulsive Transient Antenna", Phys. Rev. D **105**, 042001 (2022).
8. O. Adriani, S. Aiello, A. Albert et al. (KM3NeT Collaboration), "On the Potential Galactic Origin of the Ultra-High-Energy Event KM3-230213A", arXiv:2502.08387.
9. O. Adriani, S. Aiello, A. Albert et al. (KM3NeT, MessMapp Group, Fermi-LAT, Owens Valley Radio Observatory 40-m Telescope Group, SVOM), "Characterising Candidate Blazar Counterparts of the Ultra-High-Energy Event KM3-230213A", arXiv:2502.08484.
10. O. Adriani, S. Aiello, A. Albert et al. (KM3NeT Collaboration), "On the Potential Cosmogenic Origin of the Ultra-high-energy Event KM3-230213A", Astrophys. J. Lett. **984**, L41, (2025).
11. P.S.B. Dev, B. Dutta, A. Karthikeyan, W. Maitra, L.E. Strigari, and A. Verma, ""Dark" Matter Effect as a Novel Solution to the KM3-230213A Puzzle", arXiv:2505.22754.
12. V. Brdar and D.S. Chattopadhyay, "Does the 220 PeV Event at KM3NeT Point to New Physics?", arXiv:2502.21299.
13. S. Palmisano, D. Redigolo, M. Tammaro, and A. Tesi, "Exploring ultra-high energy neutrino experiments through the lens of the transport equation", arXiv:2507.10665.
14. Y. Jho, S. C. Park, and C.S. Shin, "Superheavy supersymmetric dark matter as the origin of the KM3NeT ultrahigh energy signal", Phys. Rev. D **112**, 115004, (2025).
15. D. Borah, N. Das, N. Okada, and P. Sarmah, "Possible origin of the KM3-230213A neutrino event from dark matter decay", Phys. Rev. D **111**, 123022, (2025).
16. Y. Farzan and M. Hostert, "Astrophysical flux of dark particles as a solution to the KM3NeT and Ice-Cube tension over KM3-230213A", JHEP **10**, 208 (2025).

17. O. Adriani, S. Aiello, A. Albert et al. (KM3NeT), "KM3NeT constraint on Lorentz-violating superluminal neutrino velocity", Commun. Phys. **8**, 457 (2025).
18. P. Satunin, "Ultra-high-energy event KM3-230213A constraints on Lorentz Invariance Violation in neutrino sector", Eur. Phys. J. C **85**, 545 (2025).
19. R. Aloisio, A. Ambrosone, and C. Evoli, "Constraining Super-Heavy Dark Matter with the KM3-230213A Neutrino Event", arXiv:2508.08779.
20. Y. He, J. Liu, X.-P. Wang, and Y.-M. Zhong, "Implications of the KM3NeT Ultrahigh-energy Event on Neutrino Self-interactions", arXiv:2504.20163.
21. R. Alves Batista, J. Biteau, M. Bustamante et al. (Collaboration), "Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies", Front. Astron. Space Sci. **6**, 23 (2019).
22. T. Abu-Zayyad, R. Aida, M. Allen et al. (Telescope Array), "The surface detector array of the Telescope Array experiment", Nucl. Instrum. Meth. A **689**, 87 (2013).
23. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger), "The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory", Nucl. Instrum. Meth. A **798**, 172 (2015).
24. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger), "Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory. II. Composition implications", Phys. Rev. D **90**, 122006 (2014).
25. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array), "Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode", Astrophys. J. **858**, 76 (2018).
26. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array), "Mass composition of ultrahighenergy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector data", Phys. Rev. D **99**, 022002 (2019).
27. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger), "Inferences on mass composition and tests of hadronic interactions from 0.3 to 100 EeV using the water-Cherenkov detectors of the Pierre Auger Observatory", Phys. Rev. D **96**, 122003 (2017).
28. A. Abdul Halim, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger), "Measurement of the depth of maximum of air-shower profiles with energies between 1018.5 and 1020 eV using the surface detector of the Pierre Auger Observatory and deep learning", Phys. Rev. D **111**, 022003 (2025).
29. A. Abdul Halim, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger), "Inference of the Mass Composition of Cosmic Rays with Energies from 1018.5 to 1020 eV Using the Pierre Auger Observatory and Deep Learning", Phys. Rev. Lett. **134**, 021001 (2025).
30. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array), "Isotropy of Cosmic Rays beyond 1020 eV Favors Their Heavy Mass Composition", Phys. Rev. Lett. **133**, 041001 (2024).
31. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array), "Mass composition of ultrahigh energy cosmic rays from distribution of their arrival directions with the Telescope Array", Phys. Rev. D **110**, 022006 (2024).
32. A. van Vliet, R. Alves Batista, and J. R. Hörandel, "Determining the fraction of cosmic-ray protons at ultrahigh energies with cosmogenic neutrinos", Phys. Rev. D **100**, 021302, (2019).
33. D. Ehlert, A. van Vliet, F. Oikonomou and W. Winter, "Constraints on the proton fraction of cosmic rays at the highest energies and the consequences for cosmogenic neutrinos and photons", JCAP **02**, 022 (2024).
34. M. S. Muzio, M. Unger, and S. Wissel, "Prospects for joint cosmic ray and neutrino constraints on the evolution of trans-Greisen–Zatsepin–Kuzmin proton sources", Phys. Rev. D **107**, 103030 (2023).
35. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger), "Probing the origin of ultra-high-energy cosmic rays with neutrinos in the EeV energy range using the Pierre Auger Observatory", JCAP **10**, 022 (2019).
36. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array), "Search for Ultra-High-Energy Neutrinos with the Telescope Array Surface Detector", JETP **131**, 255 (2020).
37. J. Álvarez-Muniz, R. Alves Batista, A. Balagopal V. et al. (GRAND), "The Giant Radio Array for Neutrino Detection (GRAND): Science and Design", Sci. China Phys. Mech. Astron. **63**, 219501 (2020).
38. M. G. Aartsen, R. Abbasi, M. Ackermann et al. (IceCube-Gen2), "IceCube-Gen2: the window to the extreme Universe", J. Phys. G **48**, 060501 (2021).
39. A. V. Olinto, J. Krizmanic, J. H. Adams et al. (POEMMA), "The POEMMA (Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) observatory", JCAP **06**, 007 (2021).
40. S. W. Li, P. Machado, D. Naredo-Tuero, and T. Schwemberger, "Clash of the Titans: ultrahigh energy KM3NeT event versus IceCube data", arXiv:2502.04508.
41. S. Das, B. Zhang, S. Razzaque, and S. Xu, "Cosmic-Ray Constraints on the Flux of Ultra-High-Energy Neutrino Event KM3-230213A", arXiv:2504.10847.
42. A. Cermenati, A. Ambrosone, R. Aloisio, D. Boncioli, and C. Evoli, "Scrutinizing the cosmogenic origin of the KM3-230213A event: A Multimessenger Perspective", arXiv:2507.11993.
43. D. Bergman (Telescope Array), "Telescope Array Combined Fit to Cosmic Ray Spectrum and Composition", PoS **ICRC2021**, 338 (2021).
44. M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert et al. (Fermi-LAT), "The spectrum of isotropic diffuse gammaray emission between 100 MeV and 820 GeV", Astrophys. J. **799**, 86 (2015).

45. A. Abdul Halim, P. Abreu, M. Aglietta, et al. (Pierre Auger), "Search for photons above 1018 eV by simultaneously measuring the atmospheric depth and the muon content of air showers at the Pierre Auger Observatory", Phys. Rev. D **110**, 062005 (2024).
46. P. Abreu, M. Aglietta, I. Allekotte et al. (Pierre Auger), "Search for Photons above 1019 eV with the Surface Detector of the Pierre Auger Observatory", JCAP **05**, 021 (2023).
47. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array), "Constraints on the diffuse photon flux with energies above 1018 eV using the surface detector of the Telescope Array experiment", Astropart. Phys. **110**, 8 (2019).
48. I. Kharuk, G. Rubtsov, and M. Kuznetsov (Telescope Array), "Search for EeV photon-induced events at the Telescope Array", PoS **ICRC2023**, 324 (2023).
49. M. G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams et al. (IceCube), "Differential limit on the extremelyhigh-energy cosmic neutrino flux in the presence of astrophysical background from nine years of Ice-Cube data", Phys. Rev. D **98**, 062003 (2018).
50. V. S. Berezinsky and G. T. Zatsepin, "Cosmic neutrinos of superhigh energy", Yad. Fiz. **11**, 200 (1970).
51. F. W. Stecker, "Ultrahigh energy photons, electrons and neutrinos, the microwave background, and the universal cosmic ray hypothesis", Astrophys. Space Sci. **20**, 47 (1973).
52. C. T. Hill and D. N. Schramm, "Ultrahigh-Energy Cosmic Ray Neutrinos", Phys. Lett. B **131**, 247 (1983).
53. P. Bhattacharjee and G. Sigl, "Origin and propagation of extremely high-energy cosmic rays", Phys. Rept. **327**, 109, (2000).
54. V. Berezinsky and O. Kalashev, "High energy electromagnetic cascades in extragalactic space: physics and features", Phys. Rev. D **94**, 023007 (2016).
55. K. Kotera, D. Allard, and A. V. Olinto, "Cosmogenic Neutrinos: parameter space and detectabilty from PeV to ZeV", JCAP **10**, 013 (2010).
56. M. Ahlers and F. Halzen, "Minimal Cosmogenic Neutrinos", Phys. Rev. D **86**, 083010 (2012).
57. Y. Tsunesada, T. Abuzayyad, D. Ivanov, G. Thomson, T. Fujii, and D. Ikeda, "Energy Spectrum of Ultra-High-Energy Cosmic Rays Measured by The Telescope Array", PoS **ICRC2017**, 535 (2018).
58. D. Bergman and T. Stroman, "Telescope Array measurement of UHECR composition from stereoscopic fluorescence detection", PoS **ICRC2017**, 538 (2018).
59. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. (Pierre Auger), "Combined fit of spectrum and composition data as measured by the Pierre Auger Observatory", JCAP **04**, 038 (2017).
60. R. Alves Batista, J. Becker Tjus, Dörner et al., "CRPropa 3.2 – an advanced framework for highenergy particle propagation in extragalactic and galactic spaces", JCAP **09**, 035 (2022).
61. R. C. Gilmore, R. S. Somerville, J. R. Primack, and A. Dominguez, "Semi-analytic modeling of the EBL and consequences for extragalactic gamma-ray spectra", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **422**, 3189 (2012).
62. R. U. Abbasi, T. Abu-Zayyad, M. Allen et al. (Telescope Array), "Observation of Declination Dependence in the Cosmic Ray Energy Spectrum", arXiv:2406.08612.
63. P. Plotko, A. van Vliet, X. Rodrigues, and W. Winter, "Differences between the Pierre Auger Observatory and Telescope Array Spectra: Systematic Effects or Indication of a Local Source of Ultrahigh-energy Cosmic Rays?", Astrophys. J. **953**, 129 (2023).
64. M. Y. Kuznetsov, "A nearby source of ultra-high energy cosmic rays", JCAP **04**, 042 (2024).
65. R. U. Abbasi, M. Allen, R. Arimura et al. (Telescope Array), "An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array", Science **382**, abo5095 (2023).
66. G. J. Feldman and R. D. Cousins, "A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals", Phys. Rev. D **57**, 3873 (1998).
67. V. Berezinsky, A. Gazizov, and O. Kalashev, "Cascade photons as test of protons in UHECR", Astropart. Phys. **84**, 52 (2016).
68. J. Wdowczyk, W. Tkaczyk, C. Adcock, and A. W. Wolfendale, "The possibility of detectable fluxes of cosmic ray gamma rays with energy above 10-tothe-19 ev", J. Phys. A **4**, L37 (1971).
69. G. Gelmini, O. E. Kalashev, and D. V. Semikoz, "GZK photons as ultra high energy cosmic rays", JETP **106**, 1061 (2008).
70. W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velázquez, K. Bekk et al. (KASCADE Grande), "KASCADE-Grande Limits on the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Flux between 100 TeV and 1 EeV", Astrophys. J. **848**, 1 (2017).
71. Y. A. Fomin, N. N. Kalmykov, I. S. Karpikov, G. V. Kulikov, M. Y. Kuznetsov, G. I. Rubtsov, V. P. Sulakov, and S. V. Troitsky, "Constraints on the flux of $\sim (10^{16}$–$10^{17.5})$ eV cosmic photons from the EAS-MSU muon data", Phys. Rev. D **95**, 123011 (2017).
72. R. J. Protheroe and P. L. Biermann, "A New estimate of the extragalactic radio background and implications for ultrahigh-energy gamma-ray propagation", Astropart. Phys. **6**, 45 (1996).
73. G. B. Gelmini, O. Kalashev, and D. Semikoz, "Upper Limit on the Diffuse Radio Background from GZK Photon Observation", Universe **8**, 402, (2022).
74. M. S. Muzio, T. Yuan, and L. Lu, "Emergence of a neutrino flux above 5 PeV and implications for ultrahigh energy cosmic rays", arXiv:2502.06944.
75. S. S. Wilks, "The Large-Sample Distribution of the Likelihood Ratio for Testing Composite Hypotheses", Annals Math. Statist. **9**, 60 (1938).