

На правах рукописи

ЖЕЖЕР
Яна Валерьевна

**Исследование массового состава
космических лучей и поиск нейтрино
ультравысоких энергий
по данным эксперимента Telescope Array**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель:

Рубцов Григорий Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований РАН, заместитель директора по научной работе.

Официальные оппоненты:

Наумов Дмитрий Вадимович, доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), лаборатория ядерных проблем им. В.П. Дзержелова, заместитель директора по научной работе.

Птускин Владимир Соломонович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИ-РАН), лаборатория астрофизических исследований, главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Иркутский государственный университет” (ИГУ), Иркутск.

Защита состоится 16 мая 2019 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН, а также на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01,
д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

Троицкий С.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В диссертации рассматриваются вопросы, связанные со следующими основными задачами астрофизики космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) [1]:

1. Источники КЛУВЭ и процессы их рождения

Существуют основания утверждать, что космические лучи ультравысоких энергий приходят на Землю из-за пределов Галактики, однако источники и процессы, в которых рождаются частицы космических лучей пока что не определены.

Различают два сценария рождения космических лучей: модели распада (англ. “bottom-up”) и ускорительные модели (англ. “top-down”).

В ускорительных сценариях частицы рождаются в астрофизических источниках и затем ускоряются в них же или за их пределами. Для эффективного ускорения такие объекты должны обладать довольно сильными магнитными полями, поэтому в качестве “естественных” источников рассматриваются активные ядра галактик [2], блазары [3], внегалактические нейтронные звезды, в частности, магнитары [4], а также источники гамма-всплесков [5].

В моделях распада предполагается, что космические лучи рождаются вследствие распада тяжелых реликтовых частиц или топологических дефектов массой $m_\chi \gtrsim 10^{11}$ ГэВ, родившихся в ранней Вселенной. К ним относятся: сверхтяжелая темная материя и частицы “wimpzillas”, топологические дефекты типа струн, сверхпроводящих струн, магнитных монополей и космические “бусы” [6, 7].

Ни один из описанных сценариев не получил однозначного подтверждения. Источники, ускоряющие космические лучи и не

требующие использования “новой физики” активно изучаются, но корреляций ни с одним типом пока что не было найдено.

В свою очередь, модели распада требуют тонкой настройки параметров для поддержания наблюдаемого на Земле потока космических лучей.

2. Механизмы ускорения КЛУВЭ

Для ускорения космических лучей вплоть до самых высоких энергий необходимы высокие магнитные поля, распространяющиеся на большие расстояния. Учитывая искривление траекторий заряженных частиц в магнитных полях, можно получить ограничение на минимальный размер области ускорения R_{ac} :

$$R_{ac} = \frac{E}{qB} \quad (1)$$

где q — заряд частицы, B — среднее магнитное поле в области ускорения, E — энергия частиц. Уравнение 1 было впервые получено Хилласом [8], и в нем не учитывается конечное время жизни источников, а также потери на излучение и рождение вторичных частиц в процессе распространения.

Основные “претенденты” на роль ускорителей КЛУВЭ — нейтронные звезды, в том числе пульсары и магнитары; активные ядра галактик различного типа, а также их струи; гамма-всплески и самые протяженные объекты во Вселенной, обладающие магнитными полями — скопления галактик и крупномасштабные пустоты.

Механизмы ускорения космических лучей можно разделить на диффузные (стохастические) и индуктивные (нестохастические). В случае диффузного ускорения частица многократно взаимодействует с ускорителем, каждый раз получая порцию энергии в результате, например, взаимодействия с ударной волной или пересечения границы между слоями, обладающими разными скоростями.

К диффузным механизмам ускорения относятся механизмы ускорения Ферми первого и второго порядков [9, 10]. Такие механизмы могут быть реализованы, в частности, в джетах активных ядер галактик [10], гамма-всплесках [11] и в межзвездном пространстве при воздействии звездных ветров, вызываемых взрывами сверхновых [12].

В индуктивных механизмах частица ускоряется за однократный проход через ускоритель, что требует довольно высоких полей, упорядоченных на больших расстояниях. Такой сценарий предположительно возможен, например, в ультрарелятивистских потоках плазмы из активных галактик [13] и в сверхмассивных черных дырах [14].

Потери энергии в процессе распространения накладывают дополнительные ограничения на возможность ускорения космических лучей ультравысоких энергий; совместное изучение всех возможных условий проведено в работе [15].

Несмотря на разнообразие различных вариантов ускорения космических лучей ультравысоких энергий, задача по установлению определенного сценария, подтвержденного экспериментально, пока что не была решена.

3. Распространение КЛУВЭ в межгалактической среде

При распространении на пути от источника, космические лучи подвергаются различным процессам, которые в свою очередь влияют на наблюдаемые на Земле параметры. Потери энергии на излучение модифицируют наблюдаемый спектр, процессы распада ядер влияют на наблюдаемый массовый состав, а отклонения в галактических и внегалактических магнитных полях меняют траектории, что, помимо прочих факторов, мешает идентифицировать конкретные источники КЛ.

Процессы распространения частиц в межзвездных и межгалактических средах, а также в электрических и магнитных полях

довольно хорошо изучены в современной астрофизике. Частицы теряют энергию вследствие синхротронного излучения, обратного эффекта Комптона, изгибного и тормозного излучения, а также взаимодействий с внегалактическим фоновым излучением и частицами среды.

Большую неопределенность в процессы распространения КЛ вносят параметры межзвездных и межгалактических сред, а также конфигурации магнитных полей, которые изучаются в экспериментах косвенными методами.

Структура внегалактических магнитных полей на данный момент плохо изучена, и доступные инструментальные методы позволяют определять лишь ограничения на характерные напряженности магнитных полей. Ненаблюдение фарадеевского вращения плоскости поляризации в излучении квазаров позволило сделать вывод, что интенсивность внегалактических магнитных полей не превышает 10^{-9} Гс [16, 17]. Ограничения снизу на внегалактические поля вытекают из ненаблюдения каскадных фотонов с энергией ГэВ от источников, излучающих фотоны до энергий ТэВ [18, 19]. В то же время, в ряде работ показано, что существующие наблюдаемые данные совместны с нулевыми магнитными полями в межгалактическом пространстве [20].

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является изучение характеристик космических лучей ультравысоких энергий, а именно массового состава, отношения доли протонов к гелию в потоке КЛ и определение верхнего предела на поток нейтрино ультравысоких энергий по данным эксперимента Telescope Array и обсерватории им. Пьера Оже. Данные характеристики связаны с механизмами рождения и ускорения космических лучей в источниках, а также с процессами их распространения.

Для достижения поставленной цели выделены следующие задачи:

1. Вычисление средней атомной массы КЛ в диапазоне энергий 10^{18} – 10^{20} эВ по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array:
 - построение метода классификации событий, основанного на усиленных деревьях решений (УДР) с использованием наблюдаемых параметров ШАЛ;
 - создание наборов модельных Монте-Карло событий, инициированных первичными протонами и ядрами железа для тренировки метода, а также наборов МК-событий для ядер гелия и азота для определения поправки к определяемому значению средней атомной массы;
 - построение метода анализа средней атомной массы на основе результата работы классификатора;
 - корректировка смещения оценки с использованием наборов модельных Монте-Карло событий для ядер гелия и азота;
 - определение систематической ошибки метода и неопределенности, связанной с выбором модели адронных взаимодействий на высоких энергиях.
2. Вычисление доли протонов по отношению к гелию в потоке КЛ в диапазонах энергий $10^{18.0}$ эВ $< E < 10^{18.5}$ эВ и $10^{18.3}$ эВ $< E < 10^{19.3}$ эВ с использованием значений экспоненциальной ширины распада, измеренной обсерваторией им. Пьера Оже и экспериментом Telescope Array в соответствующих диапазонах энергий:
 - создание наборов модельных Монте-Карло событий для первичных протонов, ядер гелия и углерода для наблюдаемых спектров КЛ обсерваторией им. Пьера Оже и экспериментом Telescope Array;
 - определение верхней границы на долю протонов по отношению к гелию из сравнения экспоненциальной ширины распада Λ

для различных смесей Монте-Карло наборов и для ее экспериментально полученных значений;

- исследование стабильности метода по отношению к потенциальной примеси более тяжелого элемента, углерода, в наблюдаемом потоке КЛ;
 - получение ограничений на модели рождения и ускорения КЛ, а также исследование безопасности будущих коллайдеров с использованием полученных ограничений.
3. Определение верхней границы на поток нейтрино по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array с энергиями $E > 10^{18}$ эВ:
- создание наборов модельных Монте-Карло событий, вызванных первичными нейтрино и набора сильно наклонных событий для первичных протонов;
 - классификация принадлежности событий к классам (ν, p) с использование метода, построенного в главе 1;
 - построение схемы оптимизации правила отбора кандидатов в нейтринные события;
 - вычисление экспозиции наземной решетки эксперимента Telescope Array по отношению к нейтрино, а также непосредственное вычисление верхнего предела на поток нейтрино ультравысоких энергий.

Положения, выносимые на защиту

1. Построен метод анализа состава первичных частиц КЛУВЭ для данных наземной решетки эксперимента Telescope Array на основе усиленных деревьев решений.
2. Получена зависимость средней массы первичных частиц КЛУВЭ по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array в диапазоне энергий $10^{18.0} - 10^{20.0}$ эВ: среднее значение атомной массы составляет $\langle \ln A \rangle = 2.0 \pm 0.1(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{syst.})$.

3. Определено отношение доли протонов к гелию в потоке космических лучей с использованием данных обсерватории им. Пьера Оже и эксперимента Telescope Array: $p/He > 7.3$ и $p/He > 0.43$ в диапазонах энергий $10^{18.0} < E < 10^{18.5}$ эВ и $10^{18.3} < E < 10^{19.3}$ эВ, соответственно.
4. Созданы наборы модельных Монте-Карло событий наземной решетки эксперимента Telescope Array, вызванных первичными нейтрино и сильно наклонных событий, вызванных первичными протонами.
5. Получен верхний предел на поток нейтрино ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array, $EF_{\nu} < 1.58 \times 10^{-6}$ ГэВ см⁻² с⁻¹ ср⁻¹.

Научная новизна

1. Впервые исследован массовый состав КЛУВЭ с использованием исключительно данных наземной решетки эксперимента Telescope Array.
2. Впервые получен нижний предел на долю протонов по отношению к гелию с использованием “хвоста” распределения глубины максимума развития ливня.
3. Впервые в эксперименте Telescope Array получен верхний предел на поток нейтрино ультравысоких энергий.

Практическая значимость

1. Полученные результаты могут применяться в изучении механизмов рождения, ускорения и распространения КЛУВЭ;
2. Полученные результаты могут использоваться для поиска фотонов, нейтрино и анализа массового состава в будущих крупномасштабных экспериментах по изучению КЛУВЭ;
3. Полученные результаты необходимы для гарантий безопасности будущих коллайдеров с энергией 100 ТэВ;

4. Полученные результаты поиска нейтрино ультравысоких энергий в свою очередь могут использоваться для исследования массового состава КЛУВЭ.

Основные публикации по теме диссертации

По материалам диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых международных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. I.I. Karpikov, G. I. Rubtsov and Y. V. Zhezher. Lower limit on the ultrahigh-energy proton-to-helium ratio from the measurements of the tail of the X_{\max} distribution // Phys. Rev. D – 2018. – V. 98. №10. – P. 103002.
2. R.U. Abbasi *et al.* [Telescope Array Collaboration]. Mass composition of ultra-high-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector Data // Phys. Rev. D – 2019. – V. 99. – № 2. – P. 022002.
3. M. Kuznetsov *et al.* Composition studies with the Telescope Array surface detector // PoS(ICRC2017) – 2017. – № 543.
4. G. Rubtsov *et al.* Telescope Array search for EeV photons and neutrinos // PoS(ICRC2017) – 2017. – № 551.
5. W. Hanlon *et al.* Telescope Array Composition Summary // PoS(ICRC2017) – 2017. – № 536.
6. Y. Zhezher. Ultra-high-energy cosmic rays mass composition studies with the Telescope Array Surface Detector data // EPJ Web of Conferences – 2018. – V. 191. – P. 08007.

Апробация работы

Результаты диссертации были доложены на следующих российских и международных семинарах и конференциях:

1. 72-я ежегодная встреча Японского физического сообщества, Осака, Япония, 17–21 марта 2017 года.
2. 35-я международная конференция по космическим лучам (ICRC 2017), Пусан, Южная Корея, 12–20 июля 2017 года.

3. 18-я Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, Москва, Россия, 24–30 августа 2017 года.
4. Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (HEA 2017), Москва, Россия, 18–21 декабря 2017 года.
5. Международный семинар “XXth International Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2018)”, Валдай, Россия, 27 мая – 2 июня 2018 года.
6. 26-й расширенный симпозиум по космическим лучам и 35-я российская конференция по космическим лучам (26th E+CRS / 35th RCRC), Барнаул, Россия, 6–10 июля 2018 года.
7. Школа ISAPP “БАК и космические лучи”, Женева, Швейцария, 27 октября – 2 ноября 2018 года.

Личный вклад

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии. В материале первой главы автором построен и оптимизирован классификатор событий, основанный на усиленных деревьях решений; созданы наборы Монте-Карло моделирований для тренировки классификатора и реализован метод вычисления средней атомной массы первичных частиц по результатам работы классификатора. Во второй главе автором получены ограничения на долю протонов по отношению к гелию в потоке КЛУВЭ, а затем выполнена интерпретация полученных результатов. В третьей главе автором созданы наборы модельных Монте-Карло событий для первичных нейтрино, построен нейтрино-протонный классификатор, вычислена экспозиция эксперимента по отношению к нейтрино и получено верхнее ограничение на поток нейтрино ультравысоких энергий. В коллаборации Telescope Array автор является ответственным за публикацию [21], выполненную от имени коллаборации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Объем работы составляет 122 страницы, включая 31 рисунок и 1 таблицу. Список литературы насчитывает 203 наименования.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и дан краткий обзор настоящего состояния физики космических лучей.

Первая глава посвящена вопросу исследования массового состава космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array. Массовый состав космических лучей, наблюдаемых на Земле — одна из характеристик, которую возможно установить по наблюдаемым широким атмосферным ливням. Массовый состав напрямую связан и с механизмами ускорения в источниках, и с распространенностью последних во Вселенной, и с процессами распространения космических лучей.

Эксперимент *Telescope Array* [22] расположен в штате Юта, США. Наземная решетка эксперимента состоит из 507 детекторов, расположенных в узлах квадратной решетки со стороной 1200 м. Каждая станция наземной решетки включает в себя два слоя пластикового сцинтиллятора толщиной 1.2 см и площадью 3 м^2 , оснащенных фотоумножителями. В целом решетка детекторов покрывает площадь более 700 км^2 .

В **разделе 1.1** описаны основные методы анализа массового состава космических лучей ультравысоких энергий. Наиболее часто применяемый метод основан на измерении продольной формы широких атмосферных ливней при помощи флуоресцентных телескопов. При этом в качестве величины, чувствительной к составу первичных частиц, используется глубина максимума развития

ливня X_{\max} [23]. Измерение X_{\max} имеет ограничения, связанные с особенностью работы флуоресцентных телескопов: наблюдения возможны только в ясные безлунные ночи, их рабочий цикл составляет до 10–15 %. Глава 1 посвящена альтернативному подходу к измерению массового состава, основанному исключительно на данных наземной решетки эксперимента Telescope Array. Наземные детекторы, в отличие от флуоресцентных телескопов, функционируют в любое время суток, и их рабочий цикл превышает 95 %.

Глубина максимума развития ливня является максимальной чувствительной к составу первичных частиц характеристикой ШАЛ и пока что нет какой-либо иной наблюдаемой, которая смогла бы сравниться с ней по эффективности. В связи с этим предложенный метод одновременно использует набор из нескольких наблюдаемых. Анализ основан на усиленных деревьях решений, одном из способов анализа многомерных данных, который уже неоднократно успешно применялся при анализе данных астрофизических экспериментов [24–26].

Набор экспериментальных данных описан в **разделе 1.2**. В анализе использовались данные девяти лет работы наземной решетки эксперимента Telescope Array с 11 мая 2008 года по 10 мая 2017 года. После отбора по качеству событий, набор данных наземной решетки содержит 18077 событий с энергиями больше 10^{18} эВ.

В **разделе 1.3** описана процедура создания наборов событий Монте-Карло, инициированных первичными протонами и ядрами железа при помощи программного пакета CORSIKA [27] с использованием модели адронного взаимодействия QGSJETII-03 для высокоэнергетичных адронных взаимодействий [28], пакета FLUKA для низкоэнергетичных адронных взаимодействий [29, 30] и EGS4 [31] для электромагнитных взаимодействий.

Раздел 1.4 посвящен работе классификатора на основе усиленных деревьев решений. В случае, когда данные эксперимента описываются набором из более чем одной переменной, становит-

ся удобным использование методов анализа многомерных данных. Деревья решений (англ. Decision Trees) — метод, применяемый в тех задачах, в которых необходимо классифицировать события и определить, являются ли они событиями фона или событиями сигнала [32]. Деревья решений относятся к методам машинного обучения, и требуют заранее смоделированных наборов тренировочных данных.

В результате применения классификатора, каждому событию из данных и из МК-наборов ставится в соответствие число ξ , лежащее в интервале $\xi \in [-1; 1]$, где $\xi = 1$ соответствуют событию-сигналу, а $\xi = -1$ — событию-фону. Распределения переменной ξ для данных и для Монте-Карло наборов затем используются в последующем одномерном анализе.

Классификатор, определяющий, инициировано ли данное событие первичными протонами или ядрами железа, строится на наборе из 16 переменных, чувствительных к составу первичных частиц:

1. Параметр кривизны Линсли.
- 2–3. Отношение площади сигнала к его максимальному значению (AoP) и параметр наклона AoP [33].
4. Число сработавших детекторов.
5. Количество детекторов, исключенных из аппроксимации фронта ливня в процедуре реконструкции [34].
6. $\chi^2/d.o.f.$ для аппроксимации ФПР.
- 7–8. Параметр S_b для значений $b = 3$ и $b = 4.5$ [35].
9. Сумма сигналов всех детекторов события.
10. Асимметрия сигнала между верхним и нижним слоями детекторов.

11. Полное количество пиков в развертках всех аналогово-цифровых преобразователей события.
12. Количество пиков в детекторе с наибольшим сигналом.
13. Количество пиков, присутствующих только в верхнем слое детекторов.
14. Количество пиков, присутствующих только в нижнем слое детекторов.
15. Зенитный угол θ .
16. Энергия события.

В рамках данного раздела описывается метод получения оценки средней атомной массы первичной частицы $\langle \ln A \rangle$ на основе выходного параметра деревьев решений ξ . В каждом энергетическом бине, к распределению величины ξ для данных и для наборов модельных Монте-Карло событий была применена процедура фитирования при помощи шаблонов. Полученный результат корректируется с учетом смещения оценки величины $\langle \ln A \rangle$ для наборов модельных Монте-Карло событий, инициированных первичными ядрами гелия и азота. Также оценивается систематическая ошибка метода, главным источником которой является невозможность различать потоки космических лучей, состоящих из смеси различных частиц и частиц одного типа.

В разделе 1.5 представлены полученные результаты. В пределах ошибок $\langle \ln A \rangle$ не зависит от энергии, и ее среднее значение равняется $\langle \ln A \rangle = 2.0 \pm 0.1(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{syst.})$. На рисунке 1 приведен массовый состав космических лучей ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array в сравнении с гибридными результатами этого же эксперимента и в сравнении с результатами обсерватории им. Пьера Оже. **Раздел 1.6** посвящен обсуждению полученных результатов.

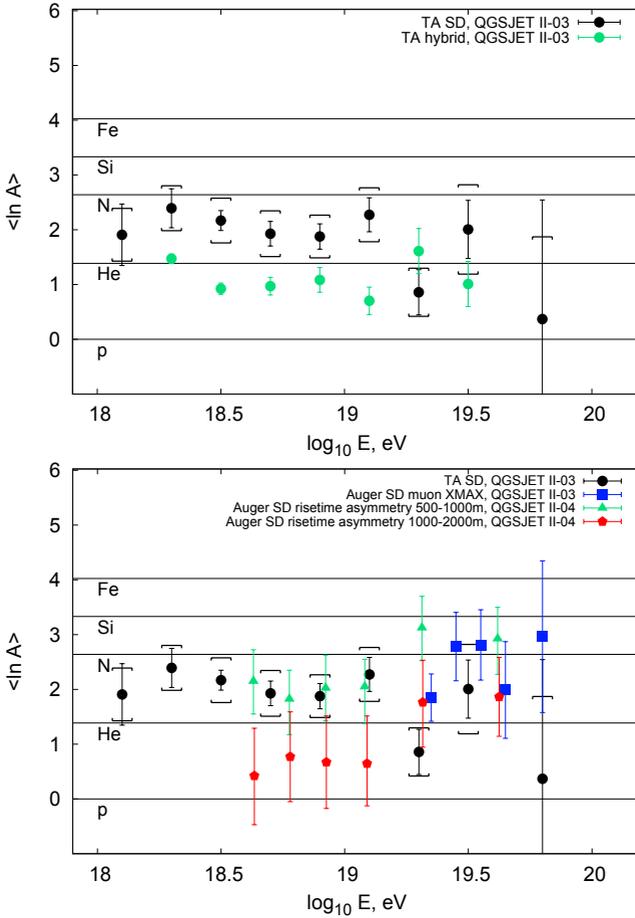


Рис. 1. Средняя атомная масса $\langle \ln A \rangle$, полученная при анализе в данной главе в сравнении с результатами гибридных измерений эксперимента Telescope Array [36] и в сравнении с результатами обсерватории им. Пьера Оже, основанными на вычислении глубины максимума развития мюонной компоненты ливня X_{max}^{μ} и азимутальной асимметрии времени нарастания сигнала [37, 38]; статистические ошибки показаны “усами”, систематические — скобками

Во **второй** главе определяется доля протонов по отношению к гелию в потоке космических лучей. Доля протонов по отношению к гелию в КЛУВЭ является важной характеристикой, позволяющей

ограничивать модели рождения космических лучей в источниках, а также модели популяции последних. Не менее важна доля протонов по отношению к гелию в космических лучах ультравысоких энергий для исследования безопасности будущих коллайдеров. В определенных теоретических моделях с дополнительными пространственными измерениями становится возможным рождение микроскопических черных дыр в высокоэнергетичных взаимодействиях адронов. Доказательство безопасности коллайдеров основано на стабильности плотных астрофизических объектов, таких как белые карлики и нейтронные звезды. Скорость рождения черных дыр зависит от энергии на нуклон во взаимодействиях, поэтому определение доли протонов играет важную роль для данных исследований.

Разделы 2.1 и 2.2 посвящены способу определения доли протонов по отношению к гелию. “Хвост” распределения максимума глубины развития ливня для определенного набора данных возможно аппроксимировать экспоненциальной функцией $\exp(-X_{\max}/\Lambda)$, где Λ называется экспоненциальным декрементом затухания, который оказывается чувствительным к сечению взаимодействия протонов с воздухом. В работе [39] было показано, что экспоненциальный декремент затухания также чувствителен к доле протонов по отношению к гелию p/He .

Первый этап анализа представляет собой создание наборов Монте-Карло событий ШАЛ, инициированных первичными протонами, ядрами гелия и углерода при помощи программного пакета CORSIKA [27]. Моделирование проводилось с использованием двух моделей адронных взаимодействий: QGSJET II-04 [40] и EPOS-LHC [41] для условий обоих экспериментов.

На следующем шаге, смоделированные Монте-Карло наборы “смешиваются” в различных пропорциях от $p/\text{He}=0.01$ до $p/\text{He}=100.0$ с шагом $\log_{10}\Delta=0.2$. Для каждой из смесей производится аппроксимация “хвоста” X_{\max} экспоненциальной функцией для получения экспоненциального декремента затухания.

Окончательно, после выполнения экспоненциального фитирования “хвоста” распределения X_{\max} для каждой смеси, значения Λ_i определяются как функция p/He . Ограничения на долю протонов по отношению к гелию получаются затем из сравнения с экспериментально измеренными значениями Λ [42–44].

В **разделе 2.3** показаны полученные результаты. Значения параметра Λ как функции доли протонов по отношению к гелию для различных долей углерода для модели QGSJETII-04 показаны на рисунке 2.

Для экспериментального значения Λ , полученного в анализе обсерватории им. Пьера Оже, $\Lambda = 57.4 \pm 1.8_{\text{stat.}} \pm 1.6_{\text{syst.}}$ г/см² [44] в диапазоне энергий $10^{18.0} \text{ эВ} < E < 10^{18.5} \text{ эВ}$, что приводит к следующим ограничениям:

$$\begin{aligned} p/\text{He} > 7.3 \text{ (68\% CL)} \quad \text{QGSJET II-04,} \\ p/\text{He} > 24.0 \text{ (68\% CL)} \quad \text{EPOS-LHC.} \end{aligned} \quad (2)$$

Аналогично, для значения Λ , определенного в эксперименте Telescope Array, $\Lambda = 50.47 \pm 6.26$ г/см² [42] в диапазоне энергий $10^{18.3} \text{ эВ} < E < 10^{19.3} \text{ эВ}$, мы приходим к следующим ограничениям на долю протонов по отношению к гелию:

$$\begin{aligned} p/\text{He} > 0.43 \text{ (68\% CL)} \quad \text{QGSJET II-04,} \\ p/\text{He} > 0.63 \text{ (68\% CL)} \quad \text{EPOS-LHC.} \end{aligned} \quad (3)$$

Обсуждение полученных результатов приведено в **разделе 2.4**. Полученные наименьшие значения доли протонов по отношению к гелию позволяют ограничить модели источников с преимущественно гелиевым составом, такие как видоизмененную версию “разочаровывающей” модели, в которой в источниках рождаются только ядра гелия [45]. Также по данным обсерватории им. Пьера Оже, уравнение (2), исключается модифицированная модель с “углублением”, в которой предполагается доля протонов по отношению к гелию $p/\text{He} = 5$.

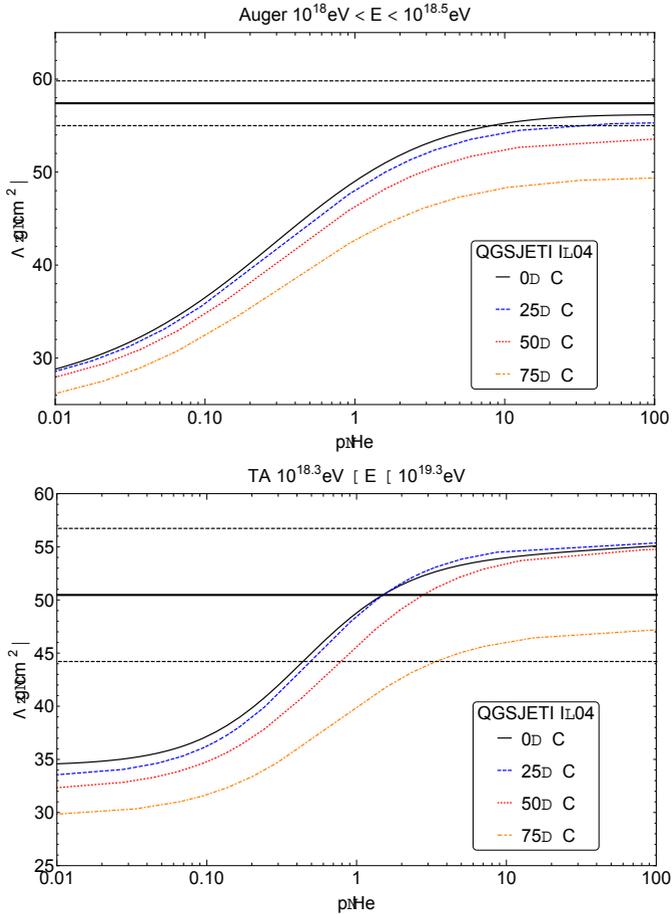


Рис. 2. Параметр Λ как функция доли протонов по отношению к гелию для двухкомпонентной смеси (протоны и ядра гелия, показано черной линией) и для трехкомпонентной смеси (протоны, ядра гелия и 25 % ядер углерода — показано синей линией; протоны, ядра гелия и 50 % ядер углерода — показано красной линией; протоны, ядра гелия и 75 % ядер углерода — показано оранжевой линией) для наборов модельных Монте-Карло событий с моделью адронных взаимодействий QGSJET II-04. Черная закрашенная линия и прерывистые линии соответствуют экспериментальному значению $\Lambda = 57.4 \pm 1.8_{\text{stat.}} \pm 1.6_{\text{sys.}} \text{ г/см}^2$ и соответствующей ошибке, полученной обсерваторией им. Пьера Оже [44] и значению $\Lambda = 50.47 \pm 6.26 \text{ г/см}^2$ и соответствующей ошибке, полученной экспериментом Telescope Array [42]

Доказательства безопасности коллайдеров в значительной степени основываются на наличии ненулевого потока протонов ультравысоких энергий [46]. Результаты, приведенные на рисунке 2 показывают, что предсказываемые значения Λ в моделях с отсутствием протонов более чем на 5 стандартных отклонений отличаются от значений, измеренных обсерваторией им. Пьера Оже. Таким образом, безопасное функционирование будущих коллайдеров подтверждается с большой степенью статистической достоверности.

Целью **главы 3** является поиск нейтрино ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array. Нейтрино в космических лучах рождаются в адрон-адронных и фотоядерных взаимодействиях. При этом они практически не поглощаются при распространении и не отклоняются в магнитных полях, а значит, их направление прихода указывает на источники космических лучей.

В **разделах 3.1, 3.2 и 3.3** представлен обзор современных экспериментов по поиску нейтрино ультравысоких энергий, дан обоснование для поиска нейтрино в сильно наклонных широких атмосферных ливнях. Нейтрино могут взаимодействовать в атмосфере Земли через заряженные и нейтральные токи, и поскольку сечения взаимодействия нейтрино на много порядков меньше, чем сечения взаимодействия протонов и более тяжелых ядер, вероятность рождения широких атмосферных ливней первичным нейтрино сильно подавлена по сравнению с другими первичными частицами [47], вследствие чего было предложено регистрировать ливни, инициированные нейтрино, на больших зенитных углах. Широкие атмосферные ливни, инициированные нейтрино, преимущественно начинают развиваться глубоко в атмосфере, в отличие от протонных и фотонных ливней, которые рождаются в верхних слоях. При этом нейтринные широкие атмосферные ливни при достижении Земли оказываются “молодыми” — их электромагнитная компонента не успевает поглотиться.

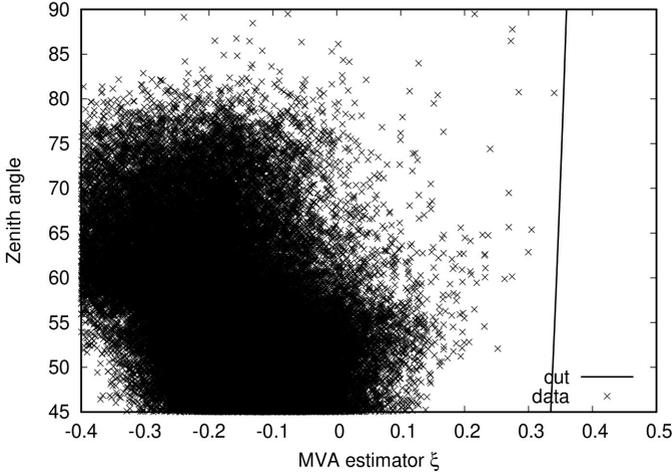


Рис. 3: Распределение параметра УДР-классификатора ξ как функция зенитного угла, показанное вместе с критерием отбора кандидатов в нейтринные события ξ_{cut} для экспериментальных данных

В **разделах 3.4, 3.5** описан набор экспериментальных данных и Монте-Карло наборы. В процедуре анализа используются данные девяти лет работы наземной решетки эксперимента Telescope Array с 11 мая 2008 года по 10 мая 2017 года. Ограничение по энергии не накладываается, и количество событий в диапазоне зенитных углов $\theta \in [45^\circ; 90^\circ]$ составляет 197250.

Анализ главы 3 также основан на методе усиленных деревьев решений. Процедура создания Монте-Карло наборов для событий, вызванных первичными нейтрино и сильно наклонными протонами, описана в **разделе 3.5**. Для тренировки классификатора, основанного на усиленных деревьях решений, используется МК-набор событий, инициированных первичными нейтрино в качестве событий сигнала, и набор сильно наклонных событий, инициированных протонами, в качестве фоновых событий.

Оптимизация критерия отбора нейтринных кандидатов описана в **разделе 3.6**. Кандидат в событие, инициированное нейтри-

но, при этом должен иметь параметр ξ больше заданной функции $\xi_{\text{cut}}(\theta)$, которая задается в форме квадратичной функции от зенитного угла:

$$\xi_{\text{cut}}(\theta) = \xi_0 + \xi_1 \times \theta + \xi_2 \times \theta^2.$$

Значения ξ_0 , ξ_1 и ξ_2 определяются путем минимизации оценочной функции, которая представляет собой среднее ожидаемое значение верхнего предела на поток нейтрино в случае справедливости нулевой гипотезы отсутствия нейтрино:

$$f_{\text{merit}}(\xi_0, \xi_1, \xi_2, \theta) = \frac{\langle n_p \rangle_{90\% \text{ C.L.}}}{n_\nu}. \quad (4)$$

В данном разделе приведена процедура вычисления экспозиции эксперимента для нисходящих нейтрино. Экспозиция определяется как отношение числа Монте-Карло событий, удовлетворяющих условиям на качество событий и критерию отбора по ξ к числу событий нейтрино, брошенных в атмосферу, умноженных на геометрическую экспозицию и число ароматов нейтрино:

$$A_{\text{eff}}^\nu = A_{\text{geom}}^{MC} \times \frac{N_{\text{pass}}}{N_{\text{thrown}}} \times N_{\text{flavor}}. \quad (5)$$

Полученный критерий отбора по ξ проходят $N_{\text{pass}} = 8278$ событий из нейтринного МК-набора, что соответствует 20.8 % от всех событий нейтринного набора, удовлетворяющих критериям качества. Число событий, брошенных в атмосферу, $N_{\text{thrown}} = 2.81 \times 10^{11}$, и мы следующую получаем эффективную экспозицию для нисходящих нейтрино:

$$A_{\text{eff}}^\nu = 1.6 \times 10^{-3} \text{ км}^2 \text{ ср год.}$$

Разделы 3.7, 3.8 посвящены обсуждению результатов.

Распределение параметра ξ для данных вместе с критерием ξ_{cut} показано на рисунке 3.

В данных обнаружено 0 кандидатов в нейтринные события. Используя статистику Фельдмана-Казинса [48], мы получаем

верхний предел на число нейтринных событий всех ароматов в данных $\bar{n}_\nu = 2.44$ на уровне достоверности 90%. Таким образом, мы получаем верхний предел на диффузный поток нейтрино одного аромата для энергий $E > 10^{18}$ эВ, показанный на рисунке 4:

$$EF_\nu < 1.58 \times 10^{-6} \text{ ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} \text{ (90\% C.L.)} .$$

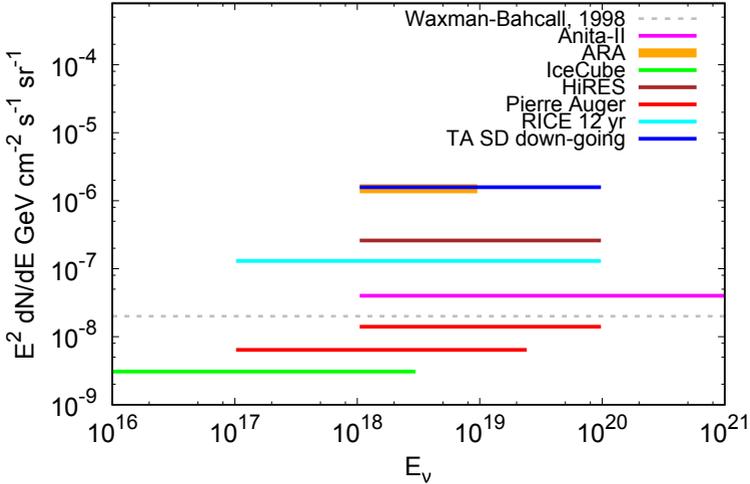


Рис. 4: Верхний предел на диффузный поток нейтрино одного аромата для энергий $E > 10^{18}$ эВ, полученный по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array, показанный в сравнении с результатами обсерватории им. Пьера Оже [49], ANITA-II [50], RICE [51], IceCube [52], ARA [53] и HiRes [54]. Также для сравнения приведен предел Ваксман-Бэколла [55]

В **Заключении** диссертации перечислены основные результаты работы. Также в заключении выражены благодарности автора диссертации.

Приложение А посвящено более подробному описанию процедуры реконструкции событий наземной решетки эксперимента Telescope Array, результаты которой в дальнейшем используются для получения значения наблюдаемых, чувствительных к составу первичных частиц.

В Приложении Б описан принцип работы методов машинного обучения, основанных на усиленных деревьях решений, которые лежат в основе методов классификации событий, используемых в главе 1 и главе 3.

Список литературы

- [1] V. S. Berezhinsky, S. V. Bulanov, V. A. Dogiel, V. L. Ginzburg and V. S. Ptuskin. *Astrophysics of cosmic rays* // Amsterdam, Netherlands: North-Holland. – 1990.
- [2] V. Berezhinsky, A. Gazizov and S. Grigorieva. Propagation and signatures of ultra high energy cosmic rays // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* – 2004. – V. 136. – P. 147.
- [3] A. Kusenko. Ultrahigh-energy nuclei, photons, and magnetic fields // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* – 2011. – V. 212–213. – P. 194.
- [4] J. Arons. Magnetars in the metagalaxy: an origin for ultrahigh-energy cosmic rays in the nearby universe // *Astrophys. J.* – 2003. – V. 589. – P. 871.
- [5] E. Waxman. Gamma-ray bursts, cosmic rays and neutrinos // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* – 2000. – V. 87. – P. 345.
- [6] V. Berezhinsky. Ultrahigh-energy cosmic rays from cosmological relics // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* – 2000. – V. 87. – P. 387.
- [7] V. A. Kuzmin and V. A. Rubakov. Ultrahigh-energy cosmic rays: A Window to postinflationary reheating epoch of the universe? // *Phys. Atom. Nucl.* – 1998. – V. 61. – P. 1028.
- [8] A. M. Hillas. The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays // *Rev. Astron. Astrophys.* – 1984. – V. 22. – P. 425.
- [9] E. Fermi. On the Origin of the Cosmic Radiation // *Phys. Rev.* – 1949. – V. 75. – P. 1169.
- [10] R. Blandford, D. Eichler. Particle acceleration at astrophysical shocks // *Phys. Rep.* – 1987. – V. 154 – № 1. – P. 1.
- [11] M. Vietri. On the acceleration of ultrahigh-energy cosmic rays in gamma-ray bursts // *Astrophys. J.* – 1995. – V. 453. – P. 883.

- [12] V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin. Cosmic ray acceleration in magnetic circumstellar bubbles // *Astropart. Phys.* – 2018. – V. 98. – P. 21.
- [13] M. Lyutikov, R. Ouyed. Inductive acceleration of UHECRs in sheared relativistic jets // *Astropart. Phys.* – 2007. – V. 27. – P. 473.
- [14] A. Y. Neronov, D. V. Semikoz and I. I. Tkachev. Ultra-High Energy Cosmic Ray production in the polar cap regions of black hole magnetospheres // *New J. Phys.* – 2009. – V. 11. – P. 065015.
- [15] К.В. Птицына, С.В. Троицкий. Физические условия в потенциальных ускорителях космических лучей сверхвысоких энергий: обновлённая диаграмма Хилласа и ограничения из потерь на излучение // *УФН* – 2010. – Т. 180. – С. 723.
- [16] J.P. Blasi, S. Buresch and A. V. Olinto. Cosmological magnetic fields limits in an inhomogeneous universe // *Astrophys. J.* – 1999. – V. 514. – P. 79.
- [17] M.S. Pshirkov, P.G. Tinyakov, F.R. Urban. New limits on extragalactic magnetic fields from rotation measures // *Phys. Rev. Lett.* – 2016. – V. 116. – no. 19. – P. 191302.
- [18] A. Neronov, I. Vovk. Evidence for strong extragalactic magnetic fields from Fermi observations of TeV blazars // *Science.* – 2010. – V. 328. – P. 73.
- [19] A.M. Taylor, I. Vovk, A. Neronov. Extragalactic magnetic fields constraints from simultaneous GeV-TeV observations of blazars // *Astron. Astrophys.* – 2011. – V. 529. – P. A144.
- [20] T.C. Arlen et al. Intergalactic Magnetic Fields and Gamma-Ray Observations of Extreme TeV Blazars // *Astrophys. J.* – 2014. – V. 796. – P. 1.
- [21] R. U. Abbasi et al. [Telescope Array Collaboration]. Mass composition of ultra-high-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector Data // *Phys. Rev. D* – 2019. – V. 99. – № 2. – P. 022002.
- [22] H. Kawai et al. Telescope Array Experiment // *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements.* – 2008. – V. 175–176. – P. 221.
- [23] T. K. Gaisser et al. Cosmic-ray composition around 1018 eV // *Phys. Rev. D* – 1993. – V. 47. – P. 1919.
- [24] M. Krause et al. Improved γ /hadron separation for the detection of faint gamma-ray sources using boosted decision trees // *Astropart. Phys.* – 2017. – V. 89. – P. 1.

- [25] A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]. Search for photons with energies above 1018 eV using the hybrid detector of the Pierre Auger Observatory // JCAP – 2017. – V. 1704. – № 04. – P. 009.
- [26] R. Abbasi *et al.* [IceCube Collaboration]. Measurement of the atmospheric neutrino energy spectrum from 100 GeV to 400 TeV with IceCube // Phys. Rev. D – 2011. – V. 83. – P. 012001.
- [27] D. Heck *et al.*. CORSIKA: a Monte-Carlo code to simulate extensive air showers // Report FZKA-6019, Forschungszentrum Karlsruhe – 1998.
- [28] S. Ostapchenko. QGSJETII: towards reliable description of very high energy hadronic interactions // Nucl. Phys. Proc. Suppl. – 2006. – V. 151. – P. 143.
- [29] T.T. Böhlen *et al.*. The FLUKA Code: Developments and challenges for high energy and medical applications // Nucl. Data Sheets – 2014.– V. 120.– P. 211.
- [30] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso and J. Ranft. FLUKA: A multi- particle transport code // CERN-2005-010, SLAC-R-773, INFN-TC- 05-11.
- [31] W. R. Nelson, H. Hirayama, D.W.O. Rogers. The Egs4 Code System // SLAC-0265.
- [32] L. Breiman *et al.*. Classification and Regression Trees // Wadsworth International Group – 1984.
- [33] J.Abraham *et al.* [Pierre Auger Collaboration]. Upper limit on the diffuse flux of UHE tau neutrinos from the Pierre Auger Observatory // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V. 100. – P. 211101.
- [34] T.Abu-Zayyad *et al.* [Telescope Array Collaboration]. The Cosmic Ray Energy Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment // ApJL – 2013. – V. 768. – L1.
- [35] G. Ros *et al.*. A new composition-sensitive parameter for Ultra-High Energy Cosmic Rays // Astropart. Phys. – 2001. – V. 35. – P. 140.
- [36] W.Hanlon for the Telescope Array Collaboration. Composition Measurements via Depth of Airshower Maximum at the Telescope Array // Contributions to the 2016 International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays – 2016.
- [37] A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]. Azimuthal Asymmetry in the Risetime of the Surface Detector Signals of the Pierre Auger Observatory // Phys. Rev. D – 2016. – V. 93. – № 7. – P. 072006.

- [38] P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]. The Pierre Auger Observatory II: Studies of Cosmic Ray Composition and Hadronic Interaction models // Contributions to the 32nd International Cosmic Ray Conference – 2011.
- [39] A. Yushkov, M. Risse, M. Werner and J. Krieg. Determination of the proton-to-helium ratio in cosmic rays at ultra-high energies from the tail of the X_{\max} distribution. – *Astropart. Phys.* – V. 85. – P. 29.
- [40] S. Ostapchenko. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model // *Phys. Rev. D* – 2011. – V. 83. – P. 014018.
- [41] T. Pierog, I. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko and K. Werner. EPOS LHC : test of collective hadronization with LHC data // *Phys. Rev. C* – 2015. – V. 92. – № 3. – P. 034906.
- [42] R.U. Abbasi *et al.* [Telescope Array Collaboration]. Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array’s Middle Drum detector and surface array in hybrid mode // *Phys. Rev. D* – V. 92. – № 3. – P. 032007.
- [43] P. Abreu *et al.* [Pierre Auger Collaboration]. Measurement of the Proton-Air Cross Section at $\sqrt{s} = 57$ TeV with the Pierre Auger Observatory // *Phys. Rev. Lett.* – V. 109. – P. 062002.
- [44] R. Ulrich. Extension of the measurement of the proton-air cross section with the Pierre Auger Observatory // *PoS(ICRC2015)*. – 2016. – № 401.
- [45] R. Aloisio, V. Berezhinsky and A. Gazizov. Ultra High Energy Cosmic Rays: The disappointing model // *Astropart. Phys.* – 2011. – V. 34. – P. 620.
- [46] A. V. Sokolov and M. S. Pshirkov. Possibility of hypothetical stable micro black hole production at future 100 TeV collider // *Eur. Phys. J. C* – 2017. – V. 77. – № 12. – P. 908.
- [47] A. Kusenko and T. J. Weiler. Neutrino cross-sections at high-energies and the future observations of ultrahigh-energy cosmic rays // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – V. 88. – P. 161101.
- [48] G. J. Feldman and R. D. Cousins. Unified approach to the classical statistical analysis of small signals // *Phys. Rev. D* – 1998. – V. 57. – P. 3873.
- [49] A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration]. Improved limit to the diffuse flux of ultrahigh energy neutrinos from the Pierre Auger Observatory // *Phys. Rev. D* – 2015. – V. 91. – № 9. – P. 092008.

- [50] P. W. Gorham *et al.* [ANITA Collab.]. Observational Constraints on the Ultra-high Energy Cosmic Neutrino Flux from the Second Flight of the ANITA Experiment // *Phys. Rev. D* – 2012. – V. 85. – P. 049901(E).
- [51] I. Kravchenko *et al.* Updated Results from the RICE Experiment and Future Prospects for Ultra-High Energy Neutrino Detection at the South Pole // *Phys. Rev. D* – 2012. – V. 85. – P. 062004.
- [52] M. G. Aartsen *et al.* [IceCube Collaboration]. Probing the origin of cosmic rays with extremely high energy neutrinos using the IceCube Observatory // *Phys. Rev. D* – 2013. – V. 88. – P. 112008.
- [53] P. Allison *et al.* [ARA Collaboration]. Performance of two Askaryan Radio Array stations and first results in the search for ultrahigh energy neutrinos // *Phys. Rev. D* – 2016. – V. 93. – № 8. – P. 082003.
- [54] R. U. Abbasi *et al.* An upper limit on the electron-neutrino flux from the HiRes detector // *Astrophys. J.* – 2008. – V. 684. – P. 790.
- [55] E. Waxman and J. N. Bahcall. High-energy neutrinos from astrophysical sources: An Upper bound // *Phys. Rev. D* – 1999. – V.59. – P. 023002.

Жежер
Яна Валерьевна
Исследование массового состава
космических лучей и поиск нейтрино ультравысоких энергий
по данным эксперимента Telescope Array

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему
Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 0,95 Зак. № 22440 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а