

На правах рукописи

Карпиков Иван Сергеевич

Моделирование и анализ данных
мюонного детектора
эксперимента по исследованию
космических лучей ШАЛ-МГУ

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Троицкий Сергей Вадимович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ИЯИ РАН, отдел теоретической физики, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Деденко Леонид Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики, старший научный сотрудник.

Ерлыкин Анатолий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), лаборатория адронных взаимодействий, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН), Якутск.

Защита состоится в _____ часов _____ на заседании диссертационного совета Д002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

Автореферат разослан _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИЯИ РАН по адресу:

<http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01,
доктор физ.-мат. наук,
член-корреспондент РАН

С.В. Троицкий

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Анализ экспериментальных данных по широким атмосферным ливням, равно как и планирование соответствующих экспериментов (ШАЛ), требует детального теоретического моделирования взаимодействия высокоэнергичной частицы с атмосферой. Для этих целей часто используют программный пакет CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscade) [1]. Для полного описания развития ШАЛ пакет CORSIKA использует подключаемые программные модули: модель электромагнитных взаимодействий, модели адронных взаимодействий при высоких и низких энергиях. Наибольший интерес представляют модели адронных взаимодействий при высоких энергиях, так как именно они играют главную роль в первых взаимодействиях с атмосферой и определяют развитие ШАЛ. Сегодня пакет CORSIKA позволяет выбрать следующие генераторы адронных взаимодействий: DPMJET, EPOS LHC, NEXUS, QGSJET, SIBYLL, VENUS. В данной работе в основном используется и исследуется модель QGSJET, а точнее ее апробированная версия QGSJET-II-04 [2]. Адронная модель QGSJET-II-04 разработана в рамках Реджевской теории поля и основывается на померон-померонном взаимодействии. Параметры адронных моделей подбираются таким образом, чтобы описать максимально точно результаты экспериментов ATLAS, TOTEM и др., проводимых на Большом адронном коллайдере. Отметим, что для описания ливней, вызванных энергичными частицами, все адронные модели требуют экстраполяции на более высокие энергии, чем те, при которых они проверены в лабораторных экспериментах.

Актуальность темы диссертации определяется тем, что, несмотря на многочисленные исследования и эксперименты по изучению природы космических лучей, остался ряд нерешенных астрофизических задач: не известны ни источники, ни механизм ускорения, ни точный первичный состав частиц наиболее высоких энергий. Кроме

этого, имеются задачи, связанные с физикой элементарных частиц: первичная энергия космических лучей на несколько порядков больше энергий, достигнутых искусственно, что предоставляет возможность изучать физику элементарных частиц за пределами возможностей ускорителей.

Как и любая теоретическая модель, генератор адронных взаимодействий нуждается в экспериментальной проверке. Число мюонов в ШАЛ сильно зависит от протекающих в нем процессов рождения и распадов адронов. Сравнение числа мюонов в искусственных ливнях и в соответствующих экспериментальных данных дает представление об адронных взаимодействиях при энергиях, недоступных в ускорительных экспериментах. К сожалению, на этом этапе возникает проблема. Она заключается в том, что некоторые эксперименты наблюдают количество мюонов в ШАЛ, значительно превышающее предсказываемое адронными моделями. Избыток мюонов в ШАЛ был обнаружен на обсерватории имени Пьера Оже (Pierre Auger Observatory PAO) [3] на Якутской комплексной установке ШАЛ (ЯКУШАЛ) [4] при первичных энергиях $E \gtrsim 10^{19}$ эВ и энергиях мюонов $E_\mu \gtrsim 1$ ГэВ. Ранее, эксперимент HiRes-MIA [5] также обнаружил превышение содержания мюонов по сравнению с предсказаниями в диапазоне первичных энергий 10^{17} эВ $\lesssim E \lesssim 10^{18}$ эВ при энергиях мюонов в ШАЛ $E_\mu \gtrsim 0.85$ ГэВ. Возможно, именно в связи с избытком числа мюонов в наблюдаемых ШАЛ возникает систематическое различие между восстановлением первичной энергией E с помощью флуоресцентных детекторов и с помощью наземной частью установки, что наблюдается в экспериментах PAO и Telescope Array (TA). Отметим, что коллаборация IceTop продемонстрировала предварительный противоположный результат [6], который заключается в том, что при первичных энергиях 10^{15} эВ $\lesssim E \lesssim 10^{17}$ эВ и энергиях мюонов в ШАЛ $E_\mu \sim 1$ ГэВ избытка плотности мюонов не наблюдается. Для понимания причины возникновения избыточного количества мюонов в ШАЛ и улучшения моделей адронных взаимодействий требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Понимание адронной компоненты ШАЛ необходимо для решения одной из важных задач физики космических лучей - поиска фотонов сверхвысокой энергии. Самая высокая энергия обнаруженных на сегодняшний день космических фотонов составляет ~ 50 ТэВ. Ливень, вызванный первичным фотоном сверхвысокой энергии, содержит меньшее количество мюонов по сравнению с адронными ливнями. Тем не менее, необходимо учесть флуктуации числа мюонов в адронных ШАЛ, так как они иногда могут индуцировать событие, по плотности мюонов схожее с первичным фотоном. Поток фотонов сверхвысоких энергий предсказывается в ряде теорий, объясняющие происхождение космических лучей, как консервативных, так и экзотических. В частности, фотоны должны возникать в ходе распада нейтральных пионов, которые рождаются в процессе Грейзена-Зацепина-Кузьмина - рассеяния протонов с энергией $E \gtrsim 5 \times 10^{19}$ эВ на реликтовом излучении. С другой стороны, значительный поток фотонов в космических лучах предсказывают теории с "новой физикой": распад частиц сверхтяжелой темной материи, модели с аксиноподобными частицами, некоторые теории с нарушенной Лоренц-инвариантностью. Фотоны несколько меньших энергий предсказываются в ряде моделей, объясняющих происхождение высокоэнергичных астрофизических нейтрино.

Одним из подходов к решению вышеуказанных задач является использование специальной установки по измерению параметров ШАЛ, которая имела бы как обширную решетку наземных регистрационных пунктов, так и детекторы, измеряющие мюонную компоненту ливня. Такая установка, ШАЛ-МГУ, существовала и продуктивно работала в СССР. Несмотря на то, что эксперимент завершился в 1990 году, его данные продолжают представлять интерес для изучения космических лучей. Это связано, в частности, с явной нехваткой мюонных детекторов в работающих сегодня экспериментах, изучающих ШАЛ. В диссертации речь пойдет о моделировании установки при помощи методов Монте-Карло и анализе экспериментальных данных ШАЛ-МГУ.

Установка ШАЛ-МГУ [7] была создана в конце 1950-х годов под руководством Д.В. Скобельцына и С.Н. Вернова и была модернизирована в начале 1980-х. Эксперимент был направлен на исследование широких атмосферных ливней, вызванных первичными частицами с энергиями в диапазоне от 10^{15} до 5×10^{17} эВ. Набор данных производился до 1990 года. Основные результаты работы этого эксперимента широко известны, среди них открытие «колена» в спектре космических лучей [8] с помощью ранней версии установки и исследование первичного спектра [9] и химического состава при энергиях в области "колена" [10, 11]. Уникальной особенностью эксперимента являлось наличие подземного мюонного детектора общей площадью 36.4 м^2 , расположенного на глубине 40 м водного эквивалента. Этот детектор чувствителен к мюонам с энергией порядка и выше 10 ГэВ.

Для получения надежных выводов из уникальных данных этого детектора чрезвычайно важно выполнить полное моделирование установки при помощи методов Монте-Карло и сравнить реальные данные с результатами моделирования. В частности, большой интерес представляет сравнение плотности мюонов в экспериментальных данных с результатами моделирования, так как это позволяет проверить модель адронных взаимодействий в данном диапазоне энергий. С другой стороны, при поиске фотонов сверхвысоких энергий нужно учесть, что безмюонные или маломюонные события можно объяснить редкими флуктуациями плотности мюонов в низкоэнергичных адронных ливнях, которые будут являться фоном в поисках первичных космических фотонов высоких энергий. Оценка этого фона является важнейшей задачей при исследовании событий-кандидатов на роль первичных фотонов сверхвысоких энергий. В предыдущих исследованиях [12] была использована упрощенная модель установки для оценки потока фотонов. Она не до конца учитывала флуктуации в содержании мюонов в адронных ливнях и не была предназначена для решения задачи о тестировании адронных моделей.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель работы - создание полной компьютерной модели установки ШАЛ-МГУ с использованием современных методов, анализ экспериментальных данных установки и получение физических результатов, основанных на измерении содержания мюонов в ШАЛ, вызванных первичными космическими частицам с энергиями порядка 10^{17} эВ.

В рамках используемого подхода для моделирования развития ШАЛ применяется пакет CORSIKA 7.4001 [1]. Методами Монте-Карло моделируется отклик конкретных детекторов установки на попавшие на поверхность Земли частицы ливня, что позволяет создать ансамбль искусственных событий, регистрируемых установкой. Как принято в современных экспериментах по изучению ШАЛ [13], каждое модельное событие записывается в формате, идентичном формату экспериментальных данных, и реконструируется теми же алгоритмами, что используются при обработке реальных событий. Это позволяет как корректно учесть все статистические флуктуации, так и минимизировать влияние возможных несовершенств процедуры реконструкции. Как следствие, становится возможным проверить точность восстановления параметров ливня и оценить эффективность установки. Именно такое моделирование эксперимента ШАЛ-МГУ позволило в этой работе получить надежные ответы на физические вопросы, о которых говорилось выше: проверить правильность предсказаний адронной модели QGSJET-II-04 для числа мюонов в ливнях и ограничить поток первичных фотонов при энергиях $\sim 10^{17}$ эВ.

Положения, выносимые на защиту

В данной работе были получены следующие основные результаты:

- Построена полная модель установки ШАЛ-МГУ с использованием метода Монте-Карло, учитывающая отклик каждого детектора установки. Модельные искусственные события записываются в том же формате, что и экспериментальные данные, и обраба-

тываются теми же процедурами. Показано, что модель хорошо описывает экспериментальные данные.

- По данным ШАЛ-МГУ определен первичный состав космического излучения при энергиях в диапазоне от $10^{16.5}$ эВ до $10^{17.75}$ эВ двумя независимыми методами - на основе анализа возраста ливней и на основе анализа мюонной компоненты. В предположении двухкомпонентного состава (протоны и ядра железа) доля протонов, определенная по возрасту ливня, составляет 43%; по содержанию мюонов 46%.
- Показано, что содержание мюонов с энергиями $E_\mu \gtrsim 10$ ГэВ в ШАЛ, вызванных первичными космическими частицами с энергиями $E \sim 10^{17}$ эВ, хорошо описывается моделью адронных взаимодействий QGSJET-II-04. В условиях эксперимента ШАЛ-МГУ избыток наблюдаемого числа мюонов по сравнению с моделью отсутствует.
- На основе данных мюонного детектора ШАЛ-МГУ получены ограничения сверху на потоки диффузного космического гамма-излучения с энергиями $E \gtrsim 10^{16}$ эВ. Ограничения на интегральный поток фотонов с $E \gtrsim 8 \times 10^{16}$ эВ и $E \gtrsim 10^{17}$ эВ составляют $3.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ и $3.9 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, соответственно, и являются наиболее строгими в мире.

Научная новизна и практическая значимость

Полное моделирование установки ШАЛ-МГУ с использованием современных методов Монте-Карло проделано впервые. Сравнение мюонных данных с результатами Монте-Карло моделирования впервые проведено с использованием результатов о составе первичных частиц, полученных из данных наземных детекторов. Данное исследование поможет понять причины возникновения избыточного количества мюонов в ШАЛ и улучшить модели адронных взаимодействий.

Ограничения сверху на потоки диффузного космического гамма-излучения, полученные в данной работе, могут быть использованы для усовершенствования различных астрофизических моделей и для установления ограничений на модели "новой физики". Ограничения на интегральный поток фотонов с $E \gtrsim 8 \times 10^{16}$ эВ и $E \gtrsim 10^{17}$ эВ составляет $3.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ и $3.9 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, соответственно, являются наиболее строгими в мире.

Основные публикации по теме диссертации

Материалы, составляющие содержание диссертации, изложены в работах:

- Y. A. Fomin, N. N. Kalmykov, I. S. Karpikov et al. Full Monte-Carlo description of the Moscow State University Extensive Air Shower experiment. // JINST -2016. -11. -T08005. [arXiv:1607.00309 [astro-ph.HE]].
- Y. A. Fomin, N. N. Kalmykov, I. S. Karpikov et al. No muon excess in extensive air showers at 100-500 PeV primary energy: EAS-MSU results // Astropart. Phys. -2017. -92. -p.1-6. [arXiv:1609.05764[astro-ph.HE]].
- Y. A. Fomin, N. N. Kalmykov, I. S. Karpikov et al. Constraints on the flux of $\sim (10^{16} - 10^{17.5})$ eV cosmic photons from the EAS-MSU muon data. // arXiv:1702.08024[astro-ph.HE]

Апробация работы

Основные результаты диссертации доложены на 34 Всероссийской конференции по космическим лучам, на 19 Международном симпозиуме по взаимодействию космических лучей сверхвысоких энергий, на Всероссийской конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра -2016», на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017», на семинарах НИИЯФ МГУ и ИЯИ РАН.

Личный вклад

Автор работы внес основной вклад в моделирование и анализ данных эксперимента ШАЛ-МГУ:

- создание библиотеки искусственных ШАЛ с помощью пакета CORSIKA и обработка данных установки,
- определение первичного состава космического излучения при энергиях в диапазоне от $10^{16.5}$ эВ до $10^{17.75}$ эВ двумя независимыми методами на основе возраста ливней и на основе анализа мюонной компоненты,
- анализ данных мюонного детектора установки с целью показать отсутствия избытка наблюдаемого числа мюонов по сравнению с предсказанным из моделирования,
- получение ограничений сверху на потоки диффузного космического гамма-излучения с энергиями $E \gtrsim 10^{16}$ эВ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем работы составляет 103 страниц, включая 32 рисунка и 8 таблиц. Список литературы насчитывает 83 наименований.

Содержание работы

Во **введении** кратко представлены методы изучения космических лучей сверх высоких энергий. Также в введении говорится о проблемах в физике космических лучей, которые являются целью диссертации: изучение моделей адронных взаимодействий и поиск первичных фотонов сверхвысоких энергий.

В **первой главе** представлено описание установки ШАЛ-МГУ, ее моделирования, приведены оценки ее эффективности и продемонстрировано согласие между экспериментальными данными и резуль-

татами моделирования с точки зрения основных реконструированных параметров ШАЛ.

Эксперимент ШАЛ-МГУ занимал территорию площадью 0.5 км^2 и состоял из 76 регистрационных пунктов, в которых находились счетчики Гейгера-Мюллера. С использованием показаний счетчиков и эмпирических функций пространственного распределения восстанавливалось общее количество заряженных частиц в ливне N_e , а также другие параметры. Общее количество счетчиков Гейгера-Мюллера примерно равнялось 10 000, а их суммарная площадь составляла примерно 250 м^2 . Для измерения плотности мюонов с энергией более 10 ГэВ использовался мюонный детектор состоящий из счетчиков, расположенные под землей на глубине 40 м водного эквивалента. Мюонный детектор был расположен в центре установки и содержал 1104 счетчика с общей площадью 36.4 м^2 .

Установка ШАЛ-МГУ использует две независимых сцинтилляционных системы триггеров — центральную и периферийную. Пластиковый сцинтиллятор толщиной 5 см располагался в тех же регистрационных пунктах, что и счетчики Гейгера-Мюллера; всего эксперимент ШАЛ-МГУ насчитывал 29 сцинтилляционных детекторов. Сцинтилляционные детекторы использовались и для восстановления углов прихода ливней. Центральная система сцинтилляторов в первую очередь была предназначена для детектирования низкоэнергичных ливней с числом частиц $N_e \lesssim 2 \times 10^7$. Вторая периферийная сцинтилляционная система триггера была разработана так, чтобы эффективно использовать всю площадь установки для регистрации ШАЛ с числом частиц $N_e \gtrsim 2 \times 10^7$.

Для того чтобы изучить ливни, прошедшие реконструкцию и вызванные частицами с энергиями более $E \sim 10^{17}$ эВ, применяются следующие критерии отбора:

1. Процедура реконструкции выполнена и позволяет определить все параметры ливня.
2. Возраст ливня должен быть в пределах $0.3 < S < 1.8$.
3. Зенитный угол $\theta < 30^\circ$.

4. Расстояние между центром установки и осью ливня $R < 240$ м
5. Число частиц в ливне $N_e > 2 \times 10^7$.

Полное моделирование установки ШАЛ-МГУ методами Монте-Карло (МК) выполняется в несколько этапов.

(i) создание библиотеки искусственных ШАЛ со случайными направлениями прихода и энергиями;

(ii) генерация случайного месторасположения осей искусственных ливней в пределах установки;

(iii) моделирование отклика регистрационных пунктов и их запись в формате, аналогичном используемому для записи экспериментальных данных;

(iv) реконструкция параметров ливня стандартной процедурой.

На первом шаге используется пакет для моделирования широких атмосферных ливней CORSIKA 7.4001 [1] с моделью адронных взаимодействий при высоких энергиях QGSJET-II-04 [2]. Ливни были смоделированы без процедуры прореживания ("thinning"). На шаге (ii) каждый ливень из библиотеки может быть использован несколько раз. Первичная энергия ливней в библиотеке соответствует дифференциальному энергетическому спектру E^{-1} и определена в диапазоне $10^{7.5}$ ГэВ $< E < 10^{8.75}$ ГэВ. ШАЛ моделируются с зенитным углом в диапазоне от 0 до 35 градусов в предположении изотропности распределения направления прихода по небесной сфере.

Для дальнейшей обработки искусственных ливней используется модель установки ШАЛ-МГУ, реализованная в виде кода на C++. Каждый ШАЛ из библиотеки берется для моделирования работы установки несколько раз, в зависимости от его энергии, так чтобы в итоге ливни соответствовали дифференциальному спектру $dN/dE \sim E^{-3.1}$.

Учитывая координаты и импульсы всех частиц искусственного ливня, мы геометрически проверяем, какие из этих частиц попали в той или иной регистрационный пункт. После обработки кодом, написанным на C++, всех частиц искусственного ливня, полученные отклики детекторов записываются в файл с форматом, аналогичным

формату файлов с экспериментальными данными.

Для моделирования подземного детектора выбираются только мюоны / антимюоны (другие заряженные частицы поглощаются в почве). Энергетический порог для мюонов оценивается с помощью приближения непрерывного замедления:

$$(l_{\text{stop}}/\text{cm}) \simeq 229.69 + 412.14 (E_{\mu}/\text{GeV}) - 0.71819 (E_{\mu}/\text{GeV})^2, \quad (1)$$

где l_{stop} - расстояние на котором мюон теряет всю свою кинетическую энергию, и E_{μ} - энергия мюона. Для вертикальных мюонов энергетический порог составляет 10 ГэВ.

Важнейшая часть моделирования эксперимента ШАЛ-МГУ - это сравнение экспериментальных данных с результатами Монте-Карло моделирования. Это позволяет проверить точность восстановления параметров ливня и оценить эффективность процедуры отбора событий. Экспериментальные данные сравниваются с тремя моделями: только ливни, вызванные протонами; только ливни, вызванные ядрами железа, и ливни с двухкомпонентным составом p/Fe . Для модели двухкомпонентного первичного состава p/Fe можно определить наиболее вероятные доли протонов и ядер железа с помощью распределения ливней по возрасту S путем сравнения данных моделирования с экспериментальными данными. Полученные таким образом доли протонов и ядер железа составляют 43% и 57% соответственно. Сравнение распределений по возрасту ливней S в экспериментальных и модельных, с учетом полученного первичного состава, показано на рисунках 1 и 2. Этот первичный состав используется во всех сравнениях экспериментальных данных с Монте-Карло (N_e, R, θ). Хорошее соответствие между распределениями по S экспериментальных и искусственных ливней, с учетом найденной доли первичных ядер железа и протонов, дает дополнительную проверку работоспособности модели установки.

Вторая глава посвящена анализу данных мюонного детектора установки ШАЛ-МГУ с целью исследования адронных моделей. В данной главе представлена возможная проблема избытка наблюдаемого числа мюонов в ливнях по сравнению с ожидаемым. Было

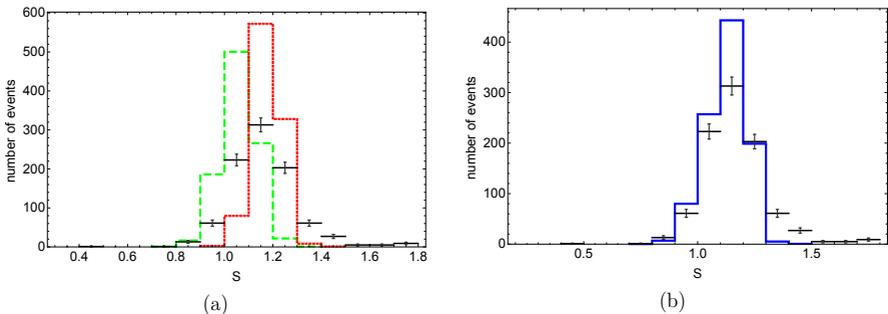


Рис. 1: Сравнение распределений по S в данных и МК. Точки с ошибками: данные. (a): зеленая пунктирная гистограмма: МК (протоны), красная штриховая гистограмма: МК (железо); (b): синяя гистограмма: МК (наилучшая подгонка первичного состава по возрасту ливня S : 43% p, 57% Fe).

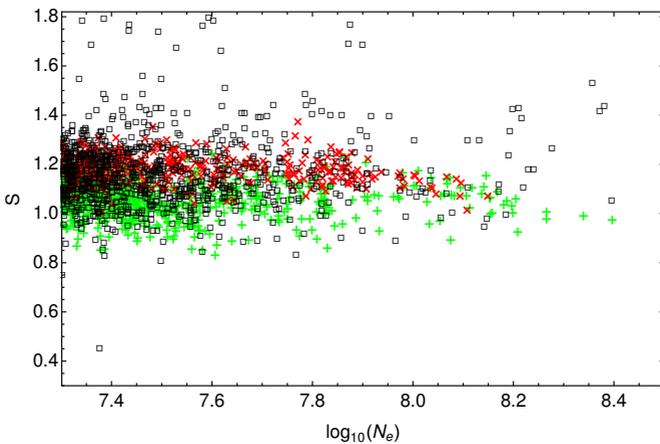


Рис. 2: Зависимость параметра возраста ливня S от N_e . Черные пустые квадратики: данные; зеленые плюсы: МК (протоны); красные кресты: МК (ядра железа).

отмечено, что число мюонов, полученное из экспериментальных данных HiRes-MIA, ЯКУШАЛ и Pierre Auger Observatory (PAO), больше, чем предсказывают все используемые модели развития ливня. С другой стороны, результаты эксперимента IceTop указывают на согласие экспериментальных данных с модельными предсказаниями.

Во второй главе подробно обсуждается анализ данных мюонного детектора установки ШАЛ-МГУ, а именно: функция пространственного распределения мюонов в ШАЛ; обоснованность применения для данной задачи модели установки, которая представлена в первой главе; используемый статистический метод для сравнения экспериментальных данных и данных моделирования мюонного детектора.

Для того, чтобы сравнить содержание мюонов в различных ливнях, обычно используют функцию пространственного распределения, с помощью которой плотность мюонов на наблюдаемом r может быть пересчитана к фиксированному значению r_0 . Мы используем следующую функцию пространственного распределения:

$$\rho_\mu(r) = N_\mu \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-a_\mu} \exp(-r/R_0), \quad (2)$$

где $R_0 = 80$ м, $a_\mu = 0.7$.

Используя первичный состава по возрасту ливня S (43% p, 57% Fe), получаем ожидаемое распределение $\rho_\mu(100)$, которое сравнивается с экспериментальными измерениями. Затем, чтобы дать количественную оценку возможного превышения мюонов в данных над моделированием, мы вводим коэффициент k , на который умножается мюонная плотность искусственных ливней. По определению, $k = 1$ соответствует числу мюонов, которое предсказано в модели установки, использующей генератор адронных взаимодействий QGSJET-II-04 с определенным выше первичным составом. Используя бинированный χ^2 -тест, мы сравниваем распределение $\rho_\mu(100)$ в МК, полученное для разных коэффициентов k , с экспериментальными данными, откуда получаем допустимый диапазон k . Тест заключается в том, что

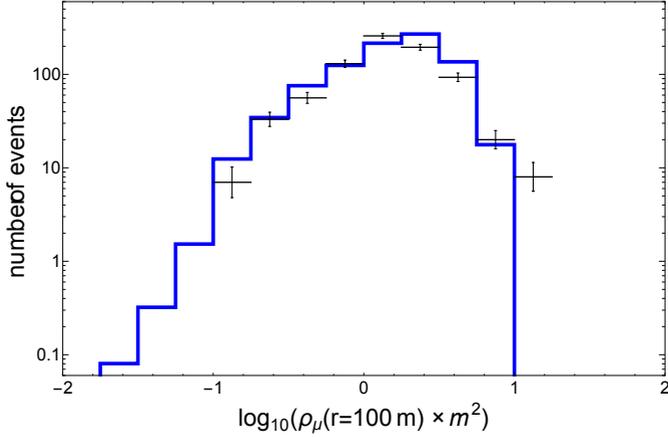


Рис. 3: Сравнение распределения $\rho_\mu(100)$ в данных и МК. Точки с ошибками: данные; синяя гистограмма: МК (наилучшая подгонка первичного состава по распределению S : 57% ядер железа, 43% протонов). Используется модель адронных взаимодействий при высоких энергиях QGSJET-II-04.

определяется функция $\chi^2(k)$:

$$\chi^2(k) = \sum_{i=1}^n \frac{(H_i^{data} - H_i^{MC}(k))^2}{H_i^{data}}, \quad (3)$$

где n - число бинов в распределении $\rho_\mu(100)$, i - номер столбца, H_i^{data} - число событий в i -м бине распределения экспериментальных данных, $H_i^{MC}(k)$ - число событий в i -м бине распределения $k \times \rho_\mu(100)$ в Монте-Карло. Рисунок 3 показывает сравнение распределений по $\rho_\mu(100)$ в экспериментальных данных и данных Монте-Карло, описанных выше ($k = 1$). Из этого рисунка видно, что модель установки хорошо согласуется с экспериментальными данными мюонного детектора.

Из минимизации выражения (3) находим значение параметра k , при котором распределение плотности мюонов $\rho_\mu(100)$ в Монте-Карло наилучшим образом согласуется с экспериментальными значениями, с учетом первичного состава определенного из распределения по S . Сравнение данных и моделирования продемонстрировано на рисунке 4. Аналогичный тест проведен для первичного состав из

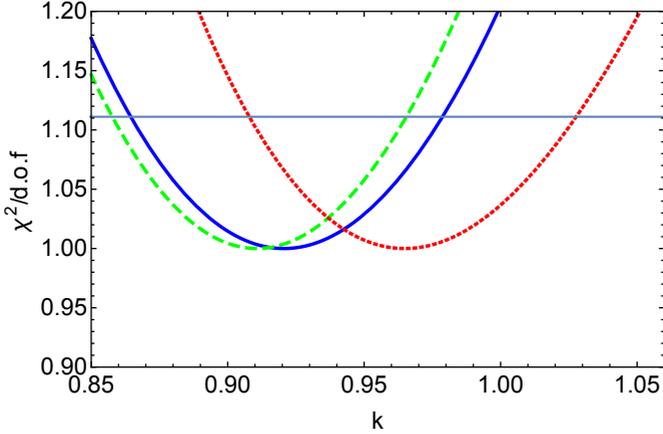


Рис. 4: Нормированная на число степеней свободы функция $\chi^2(k)$. Синяя сплошная линия: первичный состав из наземной части эксперимента ШАЛ-МГУ (43% p, 57% Fe); зеленая пунктирная линия: первичный состав из эксперимента KASCADE-Grande [17] (41% p, 59% Fe); красная линия точками: первичный состав из эксперимента Tunka-133 [18] (49% p, 51% Fe). Горизонтальная линия соответствует 68% CL.

результатов экспериментов KASCADE-Grande [17] (41% p, 59% Fe) и Tunka-133 [18] (49% p, 51% Fe).

Аналогично тому, как с помощью распределения по возрасту ливней S находились доли протонов и ядер железа, мы определяем первичный состав подгонкой распределения искусственных ливней по $\rho_\mu(100)$ к экспериментальным данным. Полученная таким образом доля первичных ядер железа равна $54 \pm 6\%$, см. рис 5(b).

Для того чтобы оценить зависимость от изменения адронной модели взаимодействия, мы провели упрощенную симуляцию с тремя другими моделями, а именно: EPOS-LHC, SIBYLL 2.3 и QGSJET-01. Несмотря на то, что восстановленный состав первичных частиц зависит от выбора используемой модели адронных взаимодействий, избыток мюонов не наблюдается ни в одном случае. Это проявляется, в частности, в отсутствии необходимости привлечения частиц тяжелее ядер железа для описания состава первичных частиц, полученного с помощью мюонных данных.

Тем не менее, хорошее согласие предсказанной и наблюдаемой

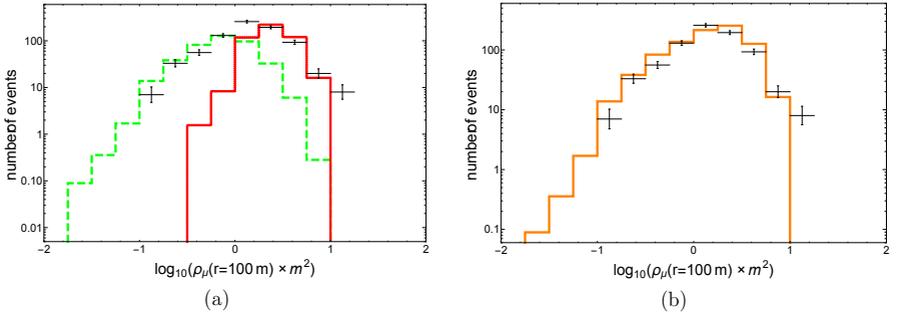


Рис. 5: Распределение $\rho_\mu(100)$ в данных и в Монте-Карло. Точки с ошибками: данные. (а): зеленая пунктирная гистограмма: МК (протоны), красная штриховая гистограмма: МК (железо); (б): оранжевая гистограмма: МК (наилучшая подгонка, 46% протонов и 54% ядер железа).

мюонной плотности в эксперименте ШАЛ-МГУ не означает, что в любом случае модели адронного взаимодействия дают правильное описание рождения мюонов в ШАЛ. В данном случае согласие между экспериментальными данными и моделированием наблюдается при первичных энергиях $E \sim 10^{17}$ эВ, энергиях мюонов в ШАЛ $E_\mu > 10$ ГэВ, глубине атмосферы 990 г/см^2 , расстояниях от оси ливня $R < 240$ м.

Третья глава работы показывает результаты поиска первичных фотонов сверхвысоких энергий. В начале главы говорится о мотивации и формулировке задачи: в нем обсуждаются возможные механизмы возникновения гамма лучей сверхвысоких энергий.

Экспериментальная задача поиска первичных фотонов заключается в отделении фотонных событий от ливней, вызванных первичными адронами. Один из лучших параметров, позволяющий определить тип первичной частицы - это число мюонов в ШАЛ. Как правило, фотонное событие содержит значительно меньше мюонов чем вызванный адроном ливень. Ливни, индуцированные первичными адронами, содержат большое количество мюонов за счет распадов заряженных пионов, возникающих в ходе адронных взаимодействий. Для того чтобы отделить фотонные ливни от адронных, применяется следующее определение фотоноподобного события: мюонный детектор не срабатывает во время регистрации ШАЛ установкой. Осталь-

ные критерии отбора кандидатов на роль фотонных ливней такие же, за исключением более низкого порога отбора по числу частиц $N_e > 10^7$, что позволяет расширить исследуемый диапазон энергий. Низкоэнергетические протоны не всегда создают в ливне достаточное количество мюонов для активации мюонного детектора, особенно если ось ШАЛ находится на большом расстоянии от центра установки. Для оценки фоновых безмюонных событий от первичных атомных ядер мы используем полное моделирование установки методами Монте-Карло.

Общее количество безмюонных событий с $N_e > 10^7$ в экспериментальных данных равняется 86, в то время как ожидаемое число безмюонных фоновых событий, вызванных первичными адронами, равно 83.5. Распределение по расстоянию от центра до оси этих безмюонных ливней R показано на рисунке 6(a).

Для оценки полного потока гамма-излучения в эксперименте ШАЛ-МГУ важно также определить число пропущенных при отборе фотонных событий, то есть необходимо оценить эффективность регистрации первичных фотонов. Также требуется знать зависимость числа частиц N_e в фотонном ШАЛ от первичной энергии E_γ , $N_e(E_\gamma)$, для того чтобы определить число фотоподобных событий в определенном диапазоне энергий:

$$N_e(E_\gamma) = 4.1 \times 10^{-10} \frac{E_\gamma}{\text{эВ}}. \quad (4)$$

Условие, используемое при отборе данных для поиска фотонов с энергией $E_\gamma > E_\gamma^{\min}$:

$$N_e > \max \{ 10^7, a N_e(E_\gamma^{\min}) \}, \quad (5)$$

где коэффициент $a = 0.56$ выбирается из условия того, чтобы 90% смоделированных фотонных событий удовлетворяло бы этому условию.

Для вычисления эффективности регистрации безмюонных ливней от первичных фотонов и $N_e(E_\gamma)$ выполняется моделирование фотонных ШАЛ тем же способом, как были смоделированы адронные

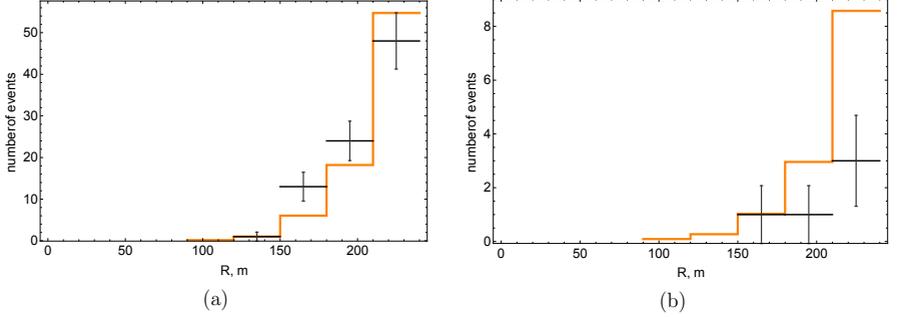


Рис. 6: Сравнение распределений по R безмюонных событий в данных и в Монте-Карло. Точки с ошибками: данные; оранжевая гистограмма: МК. Первичный состав определен из анализа данных мюонного детектора: 46% протонов и 54% ядер железа. (а): $E_\gamma > 2 \times 10^{16}$ эВ; (б): $E_\gamma > 10^{17}$ эВ.

ливни. Первичная энергия ливней в библиотеке соответствует дифференциальному энергетическому спектру E^{-1} и определена в диапазоне 10^{16} эВ $< E_\gamma < 10^{17.5}$ эВ. Смоделированные события набрасываются на установку с дифференциальным спектром $dN/dE \sim E_\gamma^{-2}$.

Для каждой минимальной энергии E_γ^{\min} мы определяем число наблюдаемых безмюонных событий в данных n_{obs} , а также ожидаемое количество фоновых безмюонных событий, вызванных первичными адронами n_b . Избытка безмюонных событий по сравнению с предсказанным числом фоновых событий не наблюдается. Мы оценили максимальное количество событий, вызванных первичными фотонами, n_γ^{FC} , используя стандартный метод Фельдмана-Казинса для уровней достоверности 90% и 95%. Для того чтобы вычислить верхний предел на поток фотонов, нужно разделить n_γ^{FC} на эффективную экспозицию установки в данном диапазоне энергий. Эффективная экспозиция учитывает долю фотонов, не прошедших реконструкцию и критерии отбора, а также тот факт, что фотонный ливень может активировать мюонный детектор.

Полученные ограничения на интегральный поток гамма-излучения, которые представляют собой основной результат этой главы, представлены в таблице 1. На рисунке 7 показано сравнение этих результатов с другими экспериментами.

E_{γ}^{\min} , eV	N_e^{\min} , 10^7	n_{obs}	n_b	$I_{\gamma} \times 10^{-16}/(\text{с}\cdot\text{см}^2\cdot\text{ср})$ (90% CL)	$I_{\gamma} \times 10^{-16}/(\text{с}\cdot\text{см}^2\cdot\text{ср})$ (95% CL)
2×10^{16}	1	86	80.1	4.34	4.98
4×10^{16}	1	86	80.1	5.09	5.85
6×10^{16}	1.38	29	42.6	0.68	1.05
8×10^{16}	1.84	9	21.7	0.36	0.6
10^{17}	2.3	5	12.9	0.39	0.58
1.2×10^{17}	2.76	4	8.6	0.51	0.74
1.4×10^{17}	3.22	2	5.6	0.47	0.71
2×10^{17}	4.6	1	2.8	0.65	0.89

Таблица 1: Ограничения сверху на интегральный поток гамма-излучения I_{γ} при первичных энергиях $E_{\gamma} > E_{\gamma}^{\min}$. Значение N_e^{\min} определяется выражением (5); n_{obs} - число наблюдаемых безмюонных событий с $N_e > N_e^{\min}$; n_b - ожидаемое число фоновых безмюонных событий.

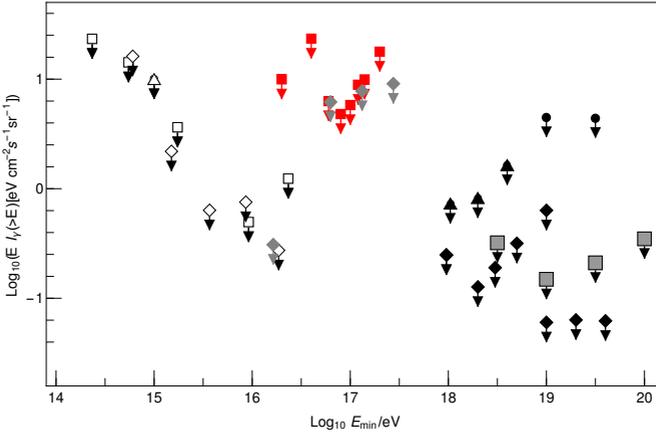


Рис. 7: Ограничения сверху на интегральный поток диффузного космического гамма-излучения от ПэВ до ЗэВ. Красные сплошные квадраты: настоящая работа; пустые треугольники: EASTOP [19], пустые квадраты: CASA-MIA [20], пустые ромбы: KASCADE [21], серые ромбы: KASCADE-Grande [22], сплошные треугольники: Yakutsk [23], сплошные ромбы Pierre Auger [24, 25], сплошные кружочки: AGASA [26], сплошные большие квадраты: Telescope Array [27]. Все пределы ниже 10^{18} эВ имеют уровень достоверности 90%, все пределы выше 10^{18} эВ имеют уровень достоверности 95%.

Пределы, полученные в данной работе, могут быть использованы для усовершенствования различных астрофизических моделей и для установления ограничений на модели "новой физики".

В **заключении** проводятся основные результаты и выводы работы, а также выражается благодарность, тем кто оказывал помощь в исследовании.

Список литературы

- [1] D. Heck et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers // Tech. Rep. -1998. -FZKA. -6019
- [2] S. Ostapchenko. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model // Phys. Rev. D -2011. -83. -014018. [arXiv:1010.1869 [hep-ph]].
- [3] A. Aab et al. (Pierre Auger Collaboration). Muons in air showers at the Pierre Auger Observatory: Mean number in highly inclined events. // Phys. Rev. D. -2015. -91. -032003. [arXiv:1408.1421 [astro-ph.HE]].
- [4] A. V. Glushkov et al. Muon content of ultrahigh-energy air showers: Yakutsk data versus simulations // JETP Lett. -2008. -87. -p.190. [arXiv:0710.5508 [astro-ph]].
- [5] T. Abu-Zayyad et al. (HiRes and MIA Collaborations). Evidence for Changing of Cosmic Ray Composition between 10^{17} eV and 10^{18} eV from Multicomponent Measurements // Phys. Rev. Lett. -2000. -84. -4276. [astro-ph/9911144].
- [6] J. G. Gonzalez (IceCube Collaboration). Measurement of the Muon Content of Air Showers with IceTop. // J. Phys. Conf. Ser. -2016. -718 -p.052017.
- [7] S. N. Vernov et al. New Installation Of Moscow State University For Studying Extensive Air Showers With Energies To 10^{18} eV // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. -1980. -44. -p.80. // Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. -1980. -44. -p.537.
- [8] G. V. Kulikov, G. B. Khristiansen. On the Size Spectrum of Extensive Air Showers // Sov. Phys. JETP. -1959. -8. -p.441. // Zh. Exp. Teor. Fiz. -1958. -35. -p.635.
- [9] Yu.A. Fomin et al. Energy spectrum of cosmic rays at energies $5 \times 10^{15} - 5 \times 10^{17}$ eV // Proc. 22nd Int. Cosmic Ray Conf., Dublin **2** (1991) 85.

- [10] G. B. Khristiansen et al. Primary cosmic ray mass composition at energies 10^{15} eV to 10^{17} eV as measured by the MSU EAS array // *Astropart. Phys.* -1994. -2. -p.127.
- [11] Yu. A. Fomin et al. Nuclear composition of primary cosmic rays in the 'knee' region according MSU EAS array data // *J. Phys. G.* -1996. -22. -p.1839.
- [12] Y. A. Fomin et al. Estimates of the cosmic gamma-ray flux at PeV to EeV energies from the EAS-MSU experiment data // *JETP Lett.* -2015. -100. -p.699. [arXiv:1410.2599 [astro-ph.HE]]
- [13] T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array Collaboration). CORSIKA Simulation of the Telescope Array Surface Detector // arXiv:1403.0644 [astro-ph.IM].
- [14] Y. A. Fomin et al. Full Monte-Carlo description of the Moscow State University Extensive Air Shower experiment. // *JINST* -2016. -11. -T08005. [arXiv:1607.00309 [astro-ph.HE]].
- [15] Yu. A. Fomin et al. No muon excess in extensive air showers at 100-500 PeV primary energy: EAS-MSU results // *Astropart. Phys.* -2017. -92. -p.1-6. [arXiv:1609.05764[astro-ph.HE]].
- [16] Y. A. Fomin et al. Constraints on the flux of $\sim (10^{16} - 10^{17.5})$ eV cosmic photons from the EAS-MSU muon data. // arXiv:1702.08024[astro-ph.HE]
- [17] J. C. Arteaga-Velazquez et al. The KASCADE-Grande observatory and the composition of very high-energy cosmic rays // *J. Phys. Conf. Ser.* -2015. -651. -012001
- [18] S. F. Berezhnev et al. Tunka-133: Primary Cosmic Ray Energy Spectrum in the energy range $6 \cdot 10^{15} - 10^{18}$ eV // *Proc. 32nd ICRC, Beijing* -2011. -1. -p.209.
- [19] M. Aglietta, B. Alessandro, P. Antoni et al. (EAS-TOP Collaboration). A Limit to the rate of ultrahigh-energy gamma-rays in the primary cosmic radiation. // *Astropart. Phys.* -1996. -6. -p.71.

- [20] M. C. Chantell, C.E. Covault, J.W. Cronin et al. (CASA-MIA Collaboration). Limits on the isotropic diffuse flux of ultrahigh-energy gamma radiation. // Phys. Rev. Lett. -1997. -79. -p.1805. [astro-ph/9705246].
- [21] Z. Feng et al. (KASCADE-Grande Collaboration). Limits on the isotropic diffuse γ -rays at ultra high energies measured with KASCADE. // PoS. ICRC, -2015. -p.823.
- [22] D. Kang et al. (KASCADE-Grande collaboration). A limit on the diffuse gamma-rays measured with KASCADE-Grande. // J. Phys. Conf. Ser. -2015. -632. -p.012013.
- [23] A. V. Glushkov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin et al. Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies $E > 10^{18}$ eV from Yakutsk muon data. // Phys. Rev. D. -2010. -82. -p.041101. [arXiv:0907.0374 [astro-ph.HE]].
- [24] A. Aab et al. (Pierre Auger Collaboration). The Pierre Auger Observatory: Contributions to the // 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015). [arXiv:1509.03732 [astro-ph.HE]].
- [25] P. Abreu, M. Aglietta, E.J. Ahn et al. (Pierre Auger Collaboration). The Pierre Auger Observatory III: Other Astrophysical Observations // arXiv:1107.4805 [astro-ph.HE].
- [26] K. Shinozaki, M. Chikawa, M. Fukushima et al. (AGASA Collaboration). Upper limit on gamma-ray flux above 10^{19} eV estimated by the Akeno Giant Air Shower Array experiment. // Astrophys. J. -2002. -571. -L117.
- [27] G. I. Rubtsov et al. (Telescope Array Collaboration). Telescope Array search for photons and neutrinos with the surface detector data. // PoS. ICRC, -2015. -p.331.

Научное издание

Карпиков Иван Сергеевич

Моделирование и анализ данных мюонного детектора
эксперимента по исследованию космических лучей ШАЛ-МГУ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 22415 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