

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ МЮОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ TUNKA-GRANDE

М.Ю. Терновой, коллаборация Тунка

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
psychorative@gmail.com

²Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск, Россия

EXAMINING THE DETECTION EFFICIENCY OF EAS MUON COMPONENT BY THE TUNKA-GRANDE SCINTILLATOR ARRAY

M.Yu. Ternovoy, Tunka Collaboration

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
psychorative@gmail.com

²Applied Physics Institute of Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. В работе было проведено исследование эффективности регистрации мюонного потока ШАЛ сцинтиляционной установкой Tunka-Grande посредством компьютерного моделирования и сравнения полученных результатов симуляции с экспериментальными данными. Была дана оценка мюонной компоненты космического излучения при первичных энергиях $10^{16.75} \leq E \leq 10^{17.5}$ эВ, показана относительная согласованность результатов эксперимента с симуляциями протонных и железных первичных составов для трёх моделей адронных взаимодействий.

Ключевые слова:

Abstract. In this work was provided a research of the detection efficiency for muon flux of EAS by the Tunka-Grande scintillator array using computer simulation. Obtained simulation results were compared with experimental data. The muon component of cosmic radiation was estimated at primary energies with range $10^{16.75} \leq E \leq 10^{17.5}$ eV. Relative consistency of the experimental data with simulations of proton and iron primary compositions with three models of hadron interactions was shown.

Keywords:

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день самым эффективным способом регистрации высокоэнергетического космического излучения основан на регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) — потоков вторичных частиц, инициированных взаимодействием первичных космических лучей с атмосферой Земли. Эти ливни состоят из нескольких составляющих компонент. До уровня наблюдения на земле входят электронно-фотонная, адронная и мюонная компоненты, и сопутствующие им черенковское, ионизационное и радиоизлучение. Все эти компоненты используются для определения свойств первичного излучения.

Однако в ходе проведения некоторых экспериментов были обнаружены систематические отклонения в полученных данных касательно потока атмосферных мюонов по сравнению с теоретическим предсказанием. Эта проблема ставит вопрос как о необходимости усовершенствования установок детекторов, применяемых в экспериментах, так и о необходимости уточнения теоретических моделей, либо их пересмотра, если эти отклонения окажутся признаком «новой физики».

ПРОБЛЕМА МЮОННОГО ДЕФИЦИТА

При анализе результатов теоретических моделей адронных взаимодействий с данными некоторых экспериментов по изучению ШАЛ возникла проблема «мюонного дефицита», когда количество мюонов в наблюдаемых ливнях явно превышает число этих частиц, предсказываемое теоретическими моделями. В числе таких экспериментов обсерватория

им. Пьера Оже (PAO) [Aab, 2015] и Якутская комплексная установка ШАЛ (ЯКУШАЛ) [Glushkov, 2008], обнаруживших расхождения при энергии первичных частиц $E \geq 10^{19}$ эВ и энергиях мюонов $E_\mu \geq 1$ ГэВ. Также отклонение от теории продемонстрировали проект HiRes-MIA [Abu-Zayyad, 2000] в диапазоне первичной энергии $10^{17} \leq E \leq 10^{18}$ эВ ($E_\mu \geq 0.85$ ГэВ) и эксперимент KASCADE-Grande [Arteaga-Velazquez, 2015] при диапазоне энергий $10^{16.3} \leq E \leq 10^{17.3}$ эВ ($E_\mu \geq 0.23$ ГэВ). Впрочем, эксперимент IceTop ($10^{15} \leq E \leq 10^{17}$ эВ, $E_\mu \geq 1$ ГэВ) [Gonzalez, 2016] и эксперимент ШАЛ-МГУ ($10^{17} \leq E \leq 10^{17.75}$ эВ, $E_\mu \geq 10$ ГэВ) [Fomin, 2017] не зафиксировали подобных расхождений. Очевидно, что для понимания реальной причины возникновения «дефицита мюонов» в теоретических моделях и улучшения этих моделей необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования. В данной работе будет исследоваться возможность зафиксировать тот или иной результат для установки Tunka-Grande.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННАЯ УСТАНОВКА TUNKA-GRANDE

Установка Tunka-Grande расположена в Тункинской долине ($\varphi = 51^\circ 48' 47.5''$ N, $\lambda = 103^\circ 04' 16.3''$ E, $h = 675$ м над уровнем моря), в 50 км от оз. Байкал, и входит в состав гамма-обсерватории TAIGA [Budnev, 2017]. Задачей установки является исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей в диапазоне первичных энергий $10^{16} \leq E \leq 10^{18}$ эВ совместно с действующими установками Тунка-133 и Tunka-Rex, а также поиск

диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$ эВ [Monkhoev, 2017].

Установка представляет собой массив из 380 сцинтилляционных счетчиков с площадью 0.64 м^2 каждый, объединенных в 19 станций, каждая из которых разделена на наземную и подземную часть, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Каждая наземная часть станции состоит из 12 счетчиков общей площадью $\sim 8 \text{ м}^2$ и регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне установки. Подземная часть находится в непосредственной близости от наземной, расположена в бетонном контейнере под слоем грунта в 1.5 м и состоит из 8 счетчиков общей площадью $\sim 5 \text{ м}^2$. Эта часть выделяет мюонную компоненту. Общая площадь установки составляет 0.8 км^2 . Ранее все эти счетчики использовались в экспериментах KASCADE-Grande и EAS-TOP.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE

Первой задачей работы по исследованию эффективности регистрации мюонного потока сцинтилляционной установкой Tunka-Grande было компьютерное моделирование ШАЛ методом Монте-Карло. Оно проводилось с помощью программного пакета CORSIKA v7.6300 [Heck, 1998] с использованием трех моделей адронных взаимодействий при высоких энергиях — EPOS LHC v4300 [Pierog, 2015], QGSJET-II-04 [Ostapchenko, 2011], SIBYLL 2.3 c [Riehn, 2015].

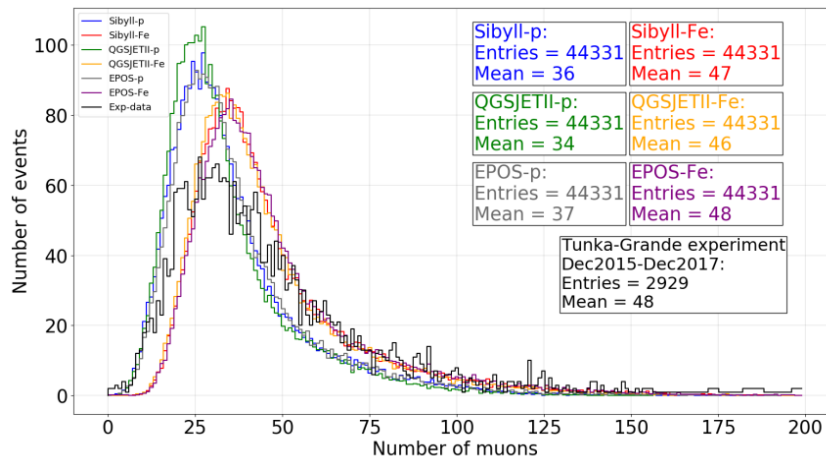
В ходе работы всего было смоделировано 6480 искусственных ливней, разбитых на 6 библиотек по 1080 ливней. Каждая библиотека моделировалась для одной из трех моделей при двух типах первичных частиц (p^+ , Fe^{56}). Энергия первичной частицы разыгрывалась по степенному спектру, с наклоном $\gamma \approx 3$ при

энергии $10^{16.75} \leq E \leq 10^{17.5}$ эВ. Углы прихода разыгрывались по азимуту в диапазоне от $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ градусов, зенитный угол определен в диапазоне $0 \leq \theta \leq 45$. Для моделирования был выставлен порог энергии в 0.1 ГэВ для электронов, позитронов и гамма-частиц. Для мюонов порог $E_\mu \geq 0.5$ ГэВ. Все расчёты выполнялось на оборудовании центра коллективного пользования «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН» [<http://hpc.icc.ru>].

СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Вторая часть работы — сопоставление полученных результатов симуляций с данными установки Tunka-Grande, накопленными ею в период работы с декабря 2015 г. по декабрь 2017 г. Все станции (наземные и подземные части) в этот период были активны. Принцип выборки данных включал в себя следующие условия: 1) реконструированный зенитный угол меньше 45° , 2) расстояние между реконструированной осью ливня и центром установки меньше 400 м, 3) реконструированная энергия первичной частицы $E \geq 10^{16.75}$ эВ, 4) относительно каждой станции исключались все оси ШАЛ в пределах радиуса 80 м, чтобы исключить вклад в общую статистику адронной компоненты и высокоэнергичных гамма-квантов вблизи оси ливня.

Были получены распределения числа событий по числу мюонов для каждой теоретической модели и данных с эксперимента (рисунок). Теоретические распределения были нормированы по реальному числу событий в эксперименте, для них был использован такой же принцип выборки, описанный выше. При данной фильтрации явное отклонение моделей от эксперимента отсутствует, хотя по полученным результатам нельзя сделать однозначный вывод о полном отсутствии расхождения.



Распределения числа событий по числу мюонов для каждой теоретической модели (цветные) и данных эксперимента (черное)

Возможно, установка действительно зафиксировала незначительное превышение числа мюонов при высоких энергиях (превышение на уровне $\sim 5-8\%$), что можно считать вероятным намеком на «мюонный дефицит». Вторая возможная причина — вклад высокоэнергичных гамма-квантов при более высо-

ких энергиях, когда размеры ствола ливня заведомо больше зон фильтрации радиусом 80 м относительно каждой станции. И третья возможная причина — недостаточное число полученных искусственных ливней при высоких энергиях ($E > 10^{17}$ эВ), что требует дополнительных симуляций, чтобы исключить

случайные флуктуации и установить достоверность результатов моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным эксперимента Tunka-Grande дана оценка мюонной компоненты космического излучения при энергиях в диапазоне энергий $10^{16.75} \leq E \leq 10^{17.5}$ эВ, $E_\mu \geq 0.5$ ГэВ. Показано, что экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями, однако существуют определенные отклонения, для которых нельзя сделать однозначной интерпретации. Данный факт требует дальнейшего исследования и более глубокого анализа, и выходит за рамки данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Aab A., et al. (Pierre Auger Collaboration). Muons in air showers at the Pierre Auger Observatory: Mean number in highly inclined events // *Phys. Rev. D*. 2015. V. 91. P. 032003.

Abu-Zayyad T., 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. V. 84. P. 4276.

Arteaga-Velazquez J.C., et al. The KASCADE-Grande observatory and the composition of very high-energy cosmic rays // *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. V. 651. P. 012001.

Budnev N., et al. (TAIGA Collaboration), The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley // *Nucl. Instrum. Meth.* 2017. A845. P. 330.

Fomin Yu.A., et al. No muon excess in extensive air showers at 100–500 PeV primary energy: EAS-MSU results // *Astropart. Phys.* 2017. V. 92. P. 1–6.

Glushkov A.V., et al. Muon content of ultrahigh-energy air showers: Yakutsk data versus simulations // *JETP Lett.* 2008. V. 87. P. 190.

Gonzalez J.G. (IceCube Collaboration). Measurement of the Muon Content of Air Showers with IceTop // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 718. P. 052017.

Heck D., et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers // *Tech. Rep.* 1998. FZKA. 6019.

Monkhoev R., et al. (Tunka Collaboration). The Tunka-Grande Experiment: Status and Prospects // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2017. V. 81. P. 468.

Ostapchenko S. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model // *Phys. Rev.* 2011. D83. P. 014018.

Pierog T., et al. EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider // *Phys. Rev.* 2015. V. 92. P. 034906.

Riehn F., et al. A new version of the event generator Sibyll // *PoS(ICRC)*. 2015. P. 558.

Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 25.05.2019).