

УДК 520.34

Исследование космических лучей на астрофизическом комплексе TAIGA

Н.Р. Неволин

Научный руководитель: к.ф.-м.н. А.С. Гоголев
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: nrn5@tpu.ru

Cosmic ray research at the TAIGA Astrophysical Complex

N.R. Nevolin

Scientific Supervisor: Ph.D. A.S. Gogolev
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: nrn5@tpu.ru

Abstract. *Studies aimed at studying the energy spectrum and mass composition of cosmic rays forming broad atmospheric showers (BAS) have established anomalies in the region of 10^{15} - 10^{16} eV and 10^{18} - 10^{19} eV. Presumably, rays with particle energies above 10^{18} eV have an extragalactic origin. However, to date, only 100 ultra-high-energy particles have been observed, which, together with a significant spread of data in different experiments, does not allow us to reasonably believe about this kind of cosmic source. As part of the cooperation between TPU and the TAIGA astrophysical complex, work is underway to develop new scintillation detectors to increase the working area of the TAIGA-Muon experiment, which will increase the efficiency of the data set.*

Key words: *cosmic rays, TAIGA-Muon, scintillation detectors.*

Введение

Космические лучи – это природой данное явление, которое представляет огромный интерес в связи с актуальными проблемами ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики [1].

По своему происхождению космические лучи высоких энергий можно разделить на 2 группы: космические лучи галактического происхождения, их источником является наша Галактика, в которой происходит ускорение частиц до энергий порядка 10^{18} эВ; космические лучи внегалактического происхождения, которые образуются в астрофизических объектах вне нашей Галактики и имеют самые большие, ультрарелятивистские энергии (свыше 10^{18} эВ).

В составе космических лучей преобладают ядра атомов водорода и гелия – около 85 и 10 % соответственно. В меньшем количестве присутствуют более тяжёлые ядра, вплоть до ядер с зарядовым числом $Z \approx 30$, их доля не превышает примерно 5 %. Небольшую часть космических лучей составляют электроны и позитроны - менее 1 %.

В результате взаимодействия с ядрами атмосферы первичные космические лучи (ПКЛ) (в основном протоны) создают большое число вторичных частиц – пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов. Таким образом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется широким атмосферным ливнем (ШАЛ).

Основными источниками первичных космических лучей, по-видимому, являются взрывы сверхновых звезд (галактические космические лучи). Большие энергии (до 10^{16} эВ) галактических космических лучей объясняются ускорением частиц на ударных волнах, образующихся при взрывах сверхновых. Природа космических лучей сверхвысоких энергий пока не имеет однозначной интерпретации. На рис. 1 показан дифференциальный энергетический спектр всех частиц первичных галактических лучей [2].

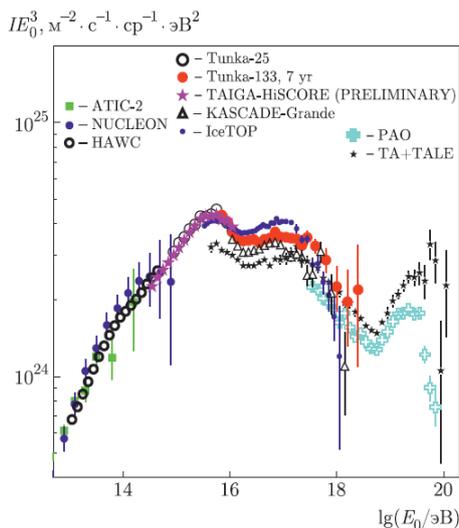


Рис. 1. Дифференциальный спектр космических лучей, масштабированный по E_0^3

В широком диапазоне энергий спектр аппроксимируется соотношением $dN/dE \sim E^{-2.7}$. Особый интерес представляют области энергий 10^{15} - 10^{16} эВ так называемое «колени» (knee) и 10^{18} - 10^{19} эВ – «лодыжка» (ankle), в которых наблюдаются аномалии. Частицы с энергией более 10^{11} ГэВ принято называть ультравысокоэнергичными космическими частицами (UHECR). К настоящему времени наблюдается порядка 100 таких частиц. По гипотезе Грайзена, Зацепина, Кузьмина (ГЗК) таких частиц вообще не должно быть, то есть спектр должен обрываться. Гипотеза ГЗК состоит в том, что первичные космические частицы высоких энергий сталкиваются с реликтовым γ -излучением, заполняющим Вселенную, открытым в середине 60-х годов. В результате такого столкновения космические частицы должны терять значительную долю энергии и выбывать из данного энергетического интервала. Наблюдение UHECR противоречит этой гипотезе и ставит новый вопрос: каково происхождение таких частиц?

Изучение энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в энергетическом диапазоне 10^{14} - 10^{18} эВ имеет решающее значение для понимания происхождения и распространения космических лучей в Галактике. Возрастающее преобладание тяжелых ядер от энергии «колени» до 10^{17} эВ указывает на энергетический предел ускорения космических лучей в стандартной модели ускорения частиц в остатках сверхновых [3]. Зависимость от энергии среднего значения $\ln A$, где A – атомный номер, хорошо экстраполируется на результаты PAO при энергии 3×10^{17} эВ и противоречит результатам существенно более сложного в интерпретации данных эксперимента TALE. При более высоких энергиях массовый состав снова становится легче при энергии 2×10^{18} эВ. Это может указывать на переход к внегалактическому происхождению космических лучей или на доминирование новых галактических источников неизвестной природы [3].

При этом наблюдается большой разброс в данных различных установок по абсолютной величине (рис. 1), что требует продолжения исследований в этой области энергий на новой расширенной установке, обеспечивающей более высокую точность в измерении энергетического спектра КЛ.

Экспериментальная часть

ТПУ в проекте «Астрофизический комплекс TAIGA». Для эффективного исследования энергетического спектра и массового состава ПКЛ и выделения гамма-квантов из фона первичных заряженных частиц суммарная площадь детекторов мюонов должна быть не менее 0,1 % от общей площади установки. В связи с этим для увеличения эффективной площади установки Tunka-Grande, а также, с целью понижения энергетического порога регистрации ПКЛ до 10^{14} эВ, в рамках развития астрофизического комплекса TAIGA были начаты работы по строительству сцинтилляционной установки TAIGA-Muon. Предполагаемая общая площадь новых детекторов электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ составит порядка 2000 м^2 . На данный момент развернуто всего 3 кластера установки, рис. 2.

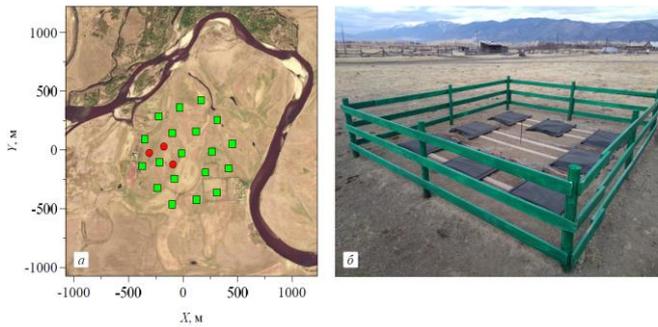


Рис. 2. Установка TAIGA-Muon: а) расположение кластеров относительно станций установки Tunka-Grande (зеленые квадраты – станции, красные круги – кластеры), б) внешний вид кластера



Рис. 3. Фото разработанных детекторов, размещенном на стенде

Для дальнейшего развития установки TAIGA-Muon необходимо разработать новую конструкцию сцинтилляционного детектора, с использованием спектросмещающих волокон (WLS) и кремниевых светоприемников (SiPM), обеспечивающую неоднородность амплитудной зависимости сигнала по площади детектора (1 м^2) не хуже 10 % и динамический диапазон линейности амплитуд сигналов не менее 100. Разработаны и исследованы 3 варианта сцинтилляционных детекторов, рис. 3.

Один, с пазами на одной фронтальной поверхности сцинтиллятора для волокон WLS, сочлененных со светоприемником SiPM. Данный детектор малогабаритный, площадью $0,25 \text{ м}^2$, с неоднородностью амплитудного отклика в 8,5 % (сигмовая оценка). Четыре таких детектора, помещенные в один корпус площадью один квадратный метр, дадут неоднородность амплитудного отклика в 8,5 % и обеспечат необходимый диапазон линейности амплитуды не менее 100. Второй – крупногабаритный, площадью 1 м^2 , с пазами на двух фронтальных поверхностях сцинтиллятора для волокон WLS, сочлененных с одним светоприемником SiPM

обеспечивает неоднородность амплитудного отклика в 9 %. Третий – также крупногабаритный, 1 м^2 , состоит из сцинтилляционных гранул, которые находятся вокруг спектросмещающих волокон, свет из которых выводится на один SiPM дает неоднородность амплитудного отклика в 17 %.

Заключение

Для участия Томского политехнического университета в работе над созданием сцинтилляционных детекторов для одной из установок мегасайенс-проекта гамма-обсерватории TAIGA – TAIGA-Muon, разработан прототип детектора, удовлетворяющий всем требованиям. Предполагается его мелко серийное производство.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Наука» (Проект № FSWW-2023-0003).

Список литературы

1. Workman R.L. *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022) (30. Cosmic rays (rev.)).
2. Астапов И.И., Безъязыков П.А., Бланк М. и др. Изучение космических лучей на астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы // ЖЭТФ. – 2022. – Т. 161, Вып. 4. – С. 548–559.
3. Zirakashivili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I. On the galactic origin of ultra high energy cosmic rays // arXiv:2312.13172v3 [astro-ph.HE] 23 Dec 2023.