39-ая Всероссийская конференция по космическим лучам

ВККЛ-2026

29.06 - 03.07/2026, Дубна

Выделение лёгкой компоненты космических лучей по данным установок TAIGA-IACT и TAIGA-HiSCORE

Самолига В.С.*[1,2] от коллаборации TAIGA

[1]*НИИПФ ИГУ, Иркутск, Россия,* [2]*НГУ, Новосибирск, Россия*

*e-mail: vladimir.samoliga@yandex.ru

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

TAIGA

Введение

В астрофизический комплекс TAIGA [1] входят широкоугольные оптические станции TAIGA-HiSCORE [2] (120 шт.) и атмосферные черенковские телескопы TAIGA-IACT [3] (рис. 1). Гибридный режим их работы позволяет использовать преимущества обоих типов детекторов: TAIGA-IACT предоставляет информацию о продольном развитии ШАЛ, а TAIGA-HiSCORE обеспечивает реконструкцию направления прихода первичной частицы (точность ~0.1°) и её энергии (точность ~15%).

Цель работы — на основе моделирования и экспериментальных данных оценить связь параметра глубины максимума ШАЛ с массой космических лучей (КЛ) и выделить лёгкую компоненту (протоны) в области энергий 0.2–4 ПэВ.

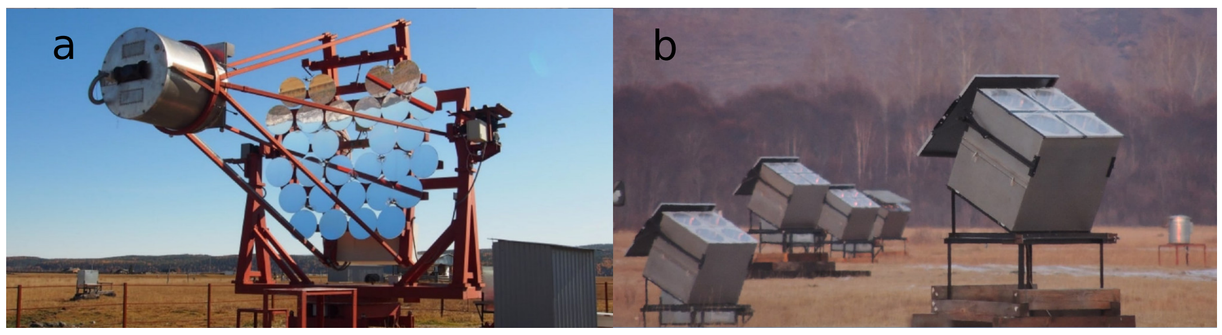

Рисунок 1. TAIGA-IACT (a) и TAIGA-HiSCORE (b).

Метод выделения лёгкой компоненты

В настоящей работе применяется метод, основанный на подходе в исследовании LHAASO [4]. Черенковский свет ШАЛ формирует в камере TAIGA-IACT изображение, т.н. имидж, который содержит информацию о продольном развитии ливня. Угловое расстояние θ_c между центром тяжести имиджа и направлением прихода первичной частицы ZE_H, AZ_H по данным TAIGA-HiSCORE (рис. 2) позволяет судить о глубине максимума ШАЛ *Xmax*. После нормировок на расстояние и энергию угол θ_c преобразуется в параметр, чувствительный к массовому составу первичного излучения. Это даёт возможность выделять лёгкую компоненту космических лучей, поскольку ливни от лёгких ядер (например, протонов) проникают глубже в атмосферу и имеют бо́льшие значения *Xmax* по сравнению с ливнями от тяжёлых ядер той же энергии.

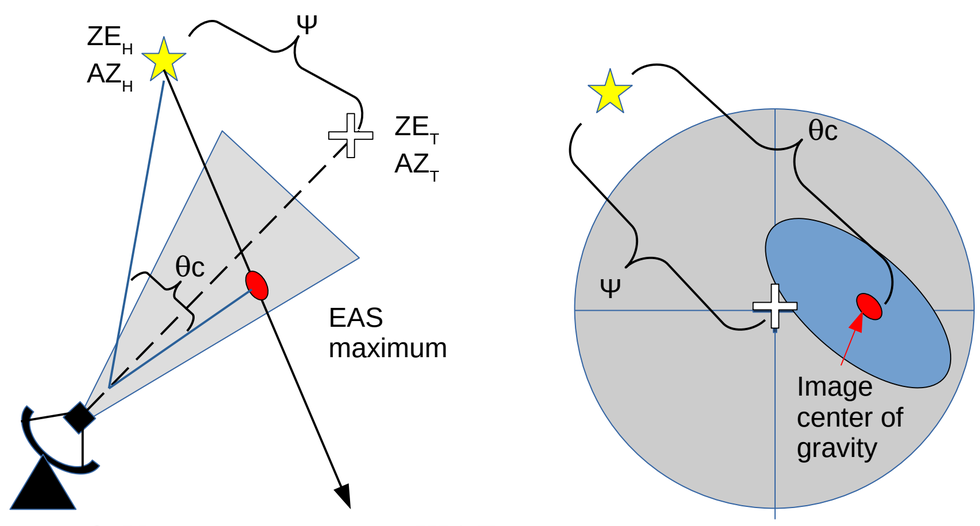

Рисунок 2. Угловые параметры ШАЛ пересчитываются из горизонтальной системы координат (слева) в систему координат камеры TAIGA-IACT (справа). Направление TAIGA-IACT - белый крест, - соответствует центру камеры. Предполагается соответствие максимума ШАЛ и центра тяжести его имиджа (красный овал). Искомая величина θ_c - угловое расстояние между центром тяжести и направлением прихода первичной частицы (звезда). Угол Ψ - расстояние между центром камеры и направлением прихода ПЧ.

Анализ данных

Проведено моделирование совместной работы TAIGA-IACT и TAIGA-HiSCORE с розыгрышем ШАЛ от протонов, ядер кислорода и железа в диапазоне энергий 0.2–4 ПэВ при зенитных углах 30–40°. Экспериментальные данные взяты за период 2021–2024 гг. Применены следующие критерии отбора событий:

- положение оси ШАЛ внутри периметра TAIGA-HiSCORE;
- углы прихода ПЧ внутри поля зрения TAIGA-HiSCORE радиусом 25°;
- угловое расстояние между центром камеры TAIGA-IACT и углами прихода ПЧ $\Psi \leq 10°$;
- расстояние от центра камеры до центра тяжести имиджа не более 4°;
- доля от Size имиджа в краевых пикселях не более 10%;
- расстояние от TAIGA-IACT до оси ШАЛ в плоскости ливня *Rp*=300-450м.

Нормировка на расстояние проведена по формуле:

$$\theta_c^{375} = \theta_c/\cos(ZE_H) - k(Rp - 375) \quad (1)$$

где k=0.0085 - коэффициент наклона прямой при линейной аппроксимации М-К протонов (рис. 3a). Нормировка по энергии:

$$P_{\theta c} = \frac{\theta_c^{375} - \langle \theta_c^{375} \rangle}{\langle \theta_c^{375} | 1\,PeV \rangle}, \text{ где } \langle \theta_c^{375} \rangle = p_0 + p_1 \cdot lg(E) + p_2 \cdot lg\,2(E) \quad (2)$$

$$p_0 = -2.325,\ p_1 = 3.821,\ p_2 = -0.529$$

Полученные нормировки применены ко всем отобранным данным. По распределениям на рис. 3b определён порог разделения компонент $P_{\theta c}$=0. Количество экспериментальных событий с $P_{\theta c}$>0 составляет 1867, или 29% отобранных событий.

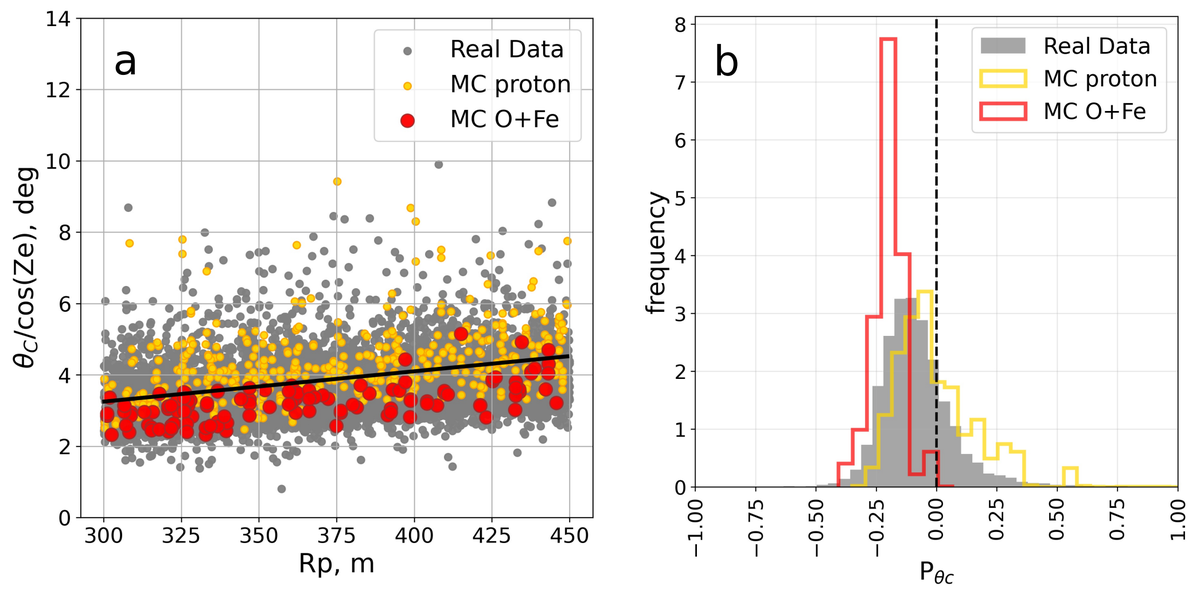

Рисунок 3. Нормировка по расстоянию (a) и порог разделения компонент по параметру $P_{\theta c}$ (b).

Заключение

Определён критерий, позволяющий выделять события от протонов с контролируемым уровнем примеси от более тяжёлых ядер.

Разработанный метод применён для обработки экспериментальных данных TAIGA за период 2021–2024 гг. Результаты демонстрируют возможность идентификации лёгкой компоненты КЛ в ПэВ-диапазоне с использованием гибридной конфигурации TAIGA. Работа подтверждает эффективность совместного анализа данных от TAIGA-IACT и TAIGA-HiSCORE для исследования массового состава космических лучей.

Список литературы:

[1] I. Astapov et al. (TAIGA collaboration), *Phys.Atom.Nucl.*, **86** (4), 471 (2023).

[2] L. Kuzmichev et al. (TAIGA collaboration), *Nucl.Instrum.Meth.A*, **952**, 161830 (2020).

[3] P. Volchugov et al. (TAIGA collaboration), *Phys.Atom.Nucl.*, **88** (5), 871 (2025).

[4] Zhen Cao et al. (LHAASO collaboration), *Science Bulletin*, **70** (24), 4173 (2025).

Финансирование работы

Работа выполнена на базе УНУ "Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ".

Исследование поддержано Российским научным фондом

(проект 23-72-00016 (раздел 3), 23-72-00019 (раздел 4))

и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации

(проекты FZZE-2024-0005, FZZE-2023-0004).