

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ЛЕГКОЙ КОМПОНЕНТЫ КЛ ПО ДАННЫМ ЧЕРЕНКОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ TAIGA

Л. Г. Свешникова^{1,*}, Э. А. Окунева¹, И. И. Астапов²,
П. А. Безъязыков³, А. В. Блинов⁴, А. Н. Бородин⁴,
Е. А. Бонвеч¹, Н. М. Буднев³, А. В. Булан¹, Н. В. Волков⁵,
П. А. Волчугов¹, Д. М. Воронин⁶, А. Р. Гафаров³,
Е. О. Гресь³, О. А. Гресь³, Т. И. Гресь³, О. Г. Гришин³,
А. Ю. Гармаш^{7,8}, В. М. Гребенюк^{4,9}, А. А. Гринюк⁴,
А. Н. Дячок³, Д. П. Журов³, А. В. Загородников³,
В. Н. Зиракашвили¹⁰, А. Л. Иванова³, А. Д. Иванова³,
М. А. Илюшин³, Н. Н. Калмыков¹, В. В. Киндин²,
С. Н. Кирюхин³, Р. П. Кокоулин², К. Г. Компаниец²,
Е. Е. Коростелева¹, В. А. Кожин¹, Е. А. Кравченко^{7,8},
А. П. Крюков¹, Л. А. Кузьмичев¹, А. Кьявасса¹¹,
М. В. Лаврова⁴, А. А. Лагутин⁵, Ю. Е. Лемешев³,
Б. К. Лубсандоржиев⁶, Н. Б. Лубсандоржиев¹,
А. Д. Луканов⁶, С. Д. Малахов³, Р. Р. Миргазов³,
Р. Д. Монхоев³, Э. А. Осипова¹, А. Л. Пахорук³, А. Пан⁴,
А. Д. Панов¹, Л. В. Паньков³, А. А. Петрухин²,
Д. А. Подгрудков¹, И. А. Поддубный³, Е. Г. Попова¹,
Е. Б. Постников¹, В. В. Просин¹, А. А. Пушкин³,
А. Ю. Разумов¹, Р. И. Райкин⁵, Г. И. Рубцов⁶, Е. В. Рябов³,
В. С. Самолига³, И. Сатышев⁴, А. А. Силаев¹,
А. А. Силаев, мл.¹, А. Ю. Сидоренков⁶, А. В. Скурихин¹,
А. В. Соколов^{7,8}, В. А. Таболенко³, А. Б. Танаев³,
М. Ю. Терновой³, Л. Г. Ткачев^{4,9}, Н. А. Ушаков⁶,
Д. В. Чернов¹, А. В. Шайковский⁴, И. И. Яшин²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

* E-mail: tfl10@mail.ru

- ³ Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия
- ⁴ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
- ⁵ Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
- ⁶ Институт ядерных исследований РАН, Москва
- ⁷ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
- ⁸ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
- ⁹ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия
- ¹⁰ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Троицк, Россия
- ¹¹ Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

Предлагается метод выделения легкой компоненты космических лучей в области энергий 200 ТэВ – 20 ПэВ (область колена в спектре ПКЛ) по гибридным событиям, зарегистрированным двумя черенковскими установками (IACT + HiSCORE) в эксперименте TAIGA. Возможность такого выделения продемонстрирована на расчетах методом Монте-Карло, и сделаны первые экспериментальные оценки.

A method is proposed for separation of the light component of cosmic rays (CR) in the energy range of 200 TeV – 20 PeV (knee region in the CR spectrum) from hybrid events recorded by two Cherenkov installations (IACT + HiSCORE) in the TAIGA experiment. The possibility of such a separation is demonstrated by Monte Carlo calculations, and the first experimental estimates are made.

PACS: 96.50.sd; 95.85.Ry; 95.55.Vj; 29.40.Ka

ВВЕДЕНИЕ

Исследование спектра и состава первичных космических лучей (ПКЛ) в области энергий 100 ТэВ – 10 ПэВ продолжает оставаться очень актуальной задачей, поскольку для окончательного решения проблемы происхождения излома («колена») в спектре ПКЛ при энергии несколько петаэлектронвольт необходимо знание спектра различных массовых компонент в области излома. При этом прямые эксперименты на спутниках, в которых определяется заряд частицы, дотягивают до нескольких сотен тераэлектронвольт, а в экспериментах с широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) определяют массу первичной частицы, начиная с ~ 1 ПэВ. Именно в области энергий колена возможно и предлагается использование новой методики выделения легкой компоненты ПКЛ в эксперименте TAIGA, основанной на применении гибридного метода регистрации ШАЛ. В статье описывается комплекс TAIGA, основы метода выделения легкой компоненты и первые тестовые результаты, полученные по небольшой выборке событий.

1. АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС TAIGA

Астрофизический комплекс TAIGA [1, 2] состоит из черенковской установки TAIGA-HiSCORE площадью 1 км^2 , покрытой 122 широкоугольными ($0\text{--}30^\circ$) детекторами и несколькими (в настоящее время тремя) атмосферными черенковскими телескопами (АЧТ или в английской коннотации IACT). Такая установка дает возможность регистрации ШАЛ от гамма-квантов с энергией более 50 ТэВ и заряженной компоненты космических лучей (КЛ) с порогом около 100–200 ТэВ методом HiSCORE [2]. Для части ливней, которые зарегистрированы и станциями HiSCORE, и хотя бы одним телескопом (рис. 1), введено понятие гибридного метода регистрации, который до сих пор использовался для выделения и анализа высокоэнергичных гамма-квантов [3, 4]. В настоящей работе мы анализируем возможность использования этих данных для выделения легкой компоненты КЛ.

В гибридном методе [3] восстановление энергии первичной частицы, направление и положение оси ШАЛ проводится по данным установки TAIGA-HiSCORE, а для определения типа первичной частицы, породившей ШАЛ, используются данные установки TAIGA-IACT [3, 4]. Изображение ливня (имидж), зарегистрированного в камере IACT и близкого по форме к эллипсу (рис. 1, а), отражает продольное и поперечное развитие ШАЛ в атмосфере, а направление эллипса — направление на точку положения источника в камере. Многолетний положительный опыт использования различных параметров имиджей (в том числе и в эксперименте TAIGA [5]) для отделения ШАЛ от гамма-квантов над фоном адронов (в тысячи раз превышающим фон заряженных КЛ) сти-

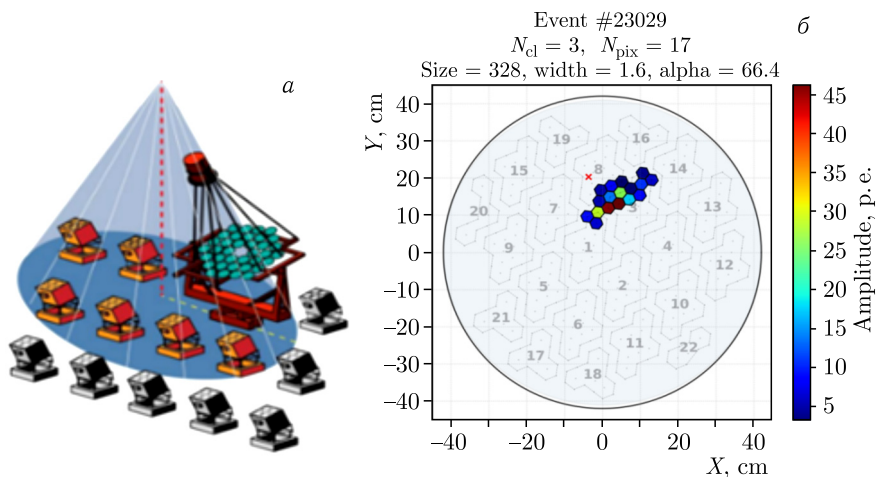


Рис. 1. а) Гибридная регистрация ШАЛ в эксперименте TAIGA (HiSCORE станции + АЧТ); б) изображение ШАЛ, регистрируемое телескопом (имидж)

мулировал развитие подобного метода для отделения ШАЛ от протонов и гелия от ливней, образованных тяжелыми и средними ядрами. Этот метод существенным образом основан на монте-карло (МК) расчетах. Мы будем опираться на МК-расчеты, развитые в эксперименте TAIGA, схема которых изложена в [6].

2. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ЛЕГКОЙ КОМПОНЕНТЫ

Для развития метода выделения легкой компоненты мы использовали алгоритм, хорошо зарекомендовавший себя в гамма-астрономии для восстановления спектра гамма-квантов. А именно: *1 этап* — проводится выявление параметров имиджей, чувствительных к массе первичного ядра, и нахождение оптимальных критериев выделения легкой компоненты по данным монте-карло-моделирования; *2 этап* — по данным МК рассчитываются спектры всех гибридных событий и спектры событий, отобранных как $\text{Pr} + \text{He}$, т.е. полученные после введения критериев отбора; *3 этап* — рассчитывается эффективная площадь всех гибридных событий S_{Hyb} и событий, отобранных по критериям легкой компоненты S_{PrHe} . Эффективная площадь включает в себя и эффективность регистрации ливней после отбора по заданным критериям. Она рассчитывается как отношение ливней, прошедших критерии отбора $N_{\text{PrHe}}(E)$, $N_{\text{Hyb}}(E)$, к ливням, брошенным на установку в монте-карло-расчетах, $N_{\text{primary}}(E)$, на площади $S_{\text{МК}}$, которая составляет 3 км^2 :

$$\begin{aligned} S_{\text{Hyb}}(E) &= N_{\text{Hyb}}(E)/N_{\text{primary}}(E)S_{\text{МК}}, \\ S_{\text{PrHe}}(E) &= N_{\text{PrHe}}(E)/N_{\text{primary}}(E)S_{\text{МК}}; \end{aligned} \quad (1)$$

4 этап — из экспериментальных данных $F_{\text{Hyb}}(E)$, $F_{\text{Pr+He}}(E)$ восстанавливается абсолютная интенсивность полного первичного потока всех частиц и легкой компоненты с учетом эффективной площади, телесного угла и времени наблюдения. Критерием правильности используемой методики является корректное восстановление полного потока частиц из данных гибридных событий.

Исследование показало, что наиболее эффективным параметром, как и в гамма-астрономии оказалась ширина эллипса изображения имиджа в зависимости от size — полного числа фотоэлектронов в камере — $\text{size: width}(\text{size})$, а также куртосис, характеризующий остроту вершины имиджа, так как события от ядер более плоские $\text{kurt}(\text{size})$. На рис. 2 приведены примеры таких зависимостей для интервала 200–4000 ТэВ. Надо отметить, что эти зависимости имеют линейный по $\log(\text{size})$ характер и тип зависимости не меняется при высоких энергиях, что позволяет выбирать в качестве критериев отбора зависимости типа: $\text{width} < \text{widthCut} = a + b \log(\text{size})$. События, удовлетворяющие этому условию, относятся к группе $\text{Pr} + \text{He}$ -подобных событий. Выбор крите-

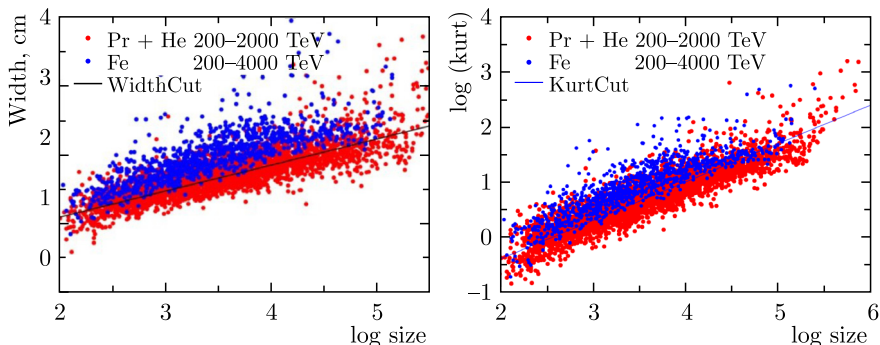


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Зависимость width (size) и kurtosis (size) для ядер Pr + He (красные точки) и от ядер железа (синие точки)

риев оптимизируется по условию максимума доли (Pr + He) и минимума примеси тяжелых и средних ядер.

Полученные по данным МК-расчетов спектры всех гибридных событий и спектры событий, отобранных как Pr + He, имеют степенной характер, и не наблюдается резкого изменения показателя наклона спектров при высоких энергиях вплоть до 20 ПэВ. Эффективные площади выше 100 ТэВ изменяются от 0,2 км² при 200 ТэВ и растут до 0,6 км² для всех гибридных событий, а для Pr + He-компоненты — от 0,1 до 0,3 км².

3. ТЕСТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ СПЕКТРА ЛЕГКОЙ КОМПОНЕНТЫ

Для проверки предложенного метода были использованы данные по гибридным событиям, отобранные при слежении IAST01 за источником «Бумеранг» в интервале зенитных углов 0–25° в сезоне наблюдения 2022–2023 гг. Общее время наблюдения составило 40 ч. От измеренных спектров $F_{\text{meas}}(E)$ к восстановленным спектрам над атмосферой $F_{\text{reco}}(E)$ мы переходили по формуле $F_{\text{meas}}(E)/S_{\text{eff}}(E)/d\text{Om}/d\text{Time}$ (см. разд. 1). Спектр $F_{\text{reco}}(E)$ всех частиц, восстановленный из гибридных событий, приведен на рис.3. Для сравнения приведены спектры всех частиц, полученные по данным HiSCORE в работе [2], и спектры, полученные в эксперименте LHAASO [7]. Так как доля гибридных событий, зарегистрированных одним IACT, составляет не более 5% от событий, зарегистрированных на установке HiSCORE, то правильно восстановленный спектр всех частиц свидетельствует об адекватности симуляций Монте-Карло эксперименту, что необходимо при исследовании легкой компоненты (Pr + He).

Спектр легкой компоненты событий, выбранных при отборе по критерию $\text{width} < \text{widthCut}(\text{size})$ (см. рис.2), и восстановленный с учетом эффективной площади, телесного угла и времени наблюдения, приведен

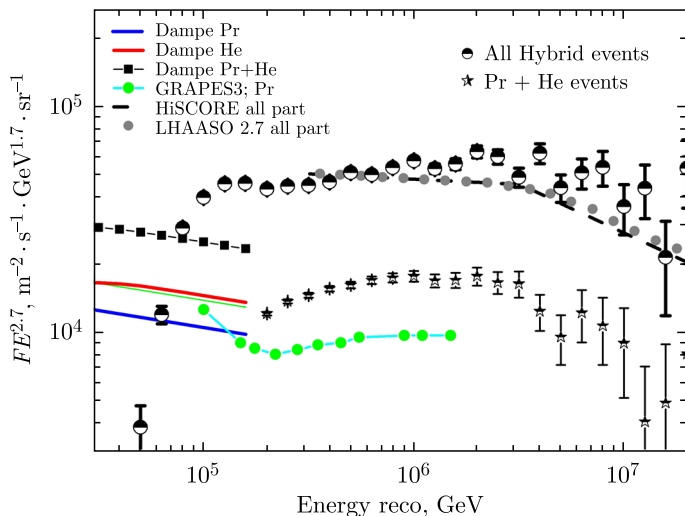


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Темные кружки — восстановленный спектр всех частиц из гибридных событий; темные звездочки (условно Pr + He) — спектр легкой компоненты, восстановленный из событий с $\text{width} < \text{widthCut}(\text{size})$; красные и синие линии — прямые измерения спутникового эксперимента Dampe протонов и гелия [8]; черная штриховая линия — спектр всех частиц, полученный только по данным в работе в HiSCORE [2]; серые точки — в эксперименте LHAASO [7]; зеленые точки — оценка спектра протонов в эксперименте GRAPES3 [9]

также на рис. 3. Для сравнения приведены данные прямого эксперимента DAMPE по спектрам Pr, He, Pr + He из работы [8] и данные эксперимента Grapes3 [9].

4. ВЫВОДЫ

1. Полученный спектр всех частиц, восстановленный из данных по гибридным событиям, зарегистрированным установками HiSCORE + IACT, демонстрирует классический излом при энергии ~ 3 ПэВ в спектре КЛ и не сильно отличается от данных HiSCORE [2]. Это свидетельствует об адекватности используемых симуляций Монте-Карло.

2. Предварительная оценка спектра Pr + He не противоречит по интенсивности экстраполяции данных прямого эксперимента DAMPE [8]. Наблюдается ярко выраженный излом при 3 ПэВ, что подтверждает старую гипотезу, что излом различных компонент КЛ происходит по жесткости частиц и определяется именно легкой компонентой, как наиболее представленной в спектре до энергии излома. Пока не оценен вклад средних ядер в полученный спектр, МК-симуляции в этом направлении

продолжаются, поэтому полученная оценка должна рассматриваться как верхняя оценка.

3. Оценочные данные получены по гибридным событиям с одним телескопом за 40 ч наблюдения. В эксперименте TAIGA суммарная накопленная статистика на порядок больше, что позволит значительно уточнить результат.

4. Предложенный метод выделения спектра легкой компоненты КЛ по данным гибридных событий имеет смысл развивать дальше.

Благодарности. Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», исследование поддержано Российским научным фондом (проекты: 23-72-00016 (разд. 2), 23-72-00019 (разд. 3, 4)) и госзаданиями Минобрнауки России (FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005).

Конфликт интересов. Конфликта интересов нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuzmichev L. A., Astapov I. I., Bezyazeekov P. A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81, No. 4. P. 497.
2. *Prosin V. V., Astapov L. A., Bezyazeekov I. I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. P. 1043.
3. *Blank M., Tluczykont M., Awad A. (TAIGA Collab.)* // Proc. Science. Sissa Medialab. Italy, 2021. P. 395.
4. *Elshoukrofy A. Sh., Okuneva M., Sveshnikova E. (TAIGA Collab.)* // Proc. Science. ICRC2023. Sissa Medialab. Italy, 2023. V. 444. P. 1–9.
5. *Свешникова Л. Г., Волчугов П. А., Постников Е. Б. (колл. TAIGA)* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87, № 7. С. 966.
6. *Grinyuk A., Postnikov E., Sveshnikova L.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83, No. 2. P. 262–267.
7. *Cao Z., Aharonian F., Axikegu et al. (LHAASO Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2024. V. 13. P. 131002.
8. *Parenti A. (DAMPE Collab.)* // Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2023. V. 51. P. 2361001.
9. *Balakrishnan Hariharan, Ahmad S., Chakraborty M. et al.* Highlights of the Results from the GRAPES-3 Experiment // Sci. Post. Phys. Proc. 2023. V. 13. P. 021.