

УДК 524.1

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОЙ РЕШЕТКИ ЭКСПЕРИМЕНТА TELESCOPE ARRAY

© 2019 г. Я. В. Жежер^{1, 2, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: zhezher.yana@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Представлены результаты исследования химического состава космических лучей ультравысоких энергий по данным 9 лет работы наземной решетки эксперимента Telescope Array. Анализ основан на методе усиленных деревьев решений (Boosted Decision Trees), в котором используются 14 наблюдаемых, чувствительных к составу космических лучей.

DOI: 10.1134/S0367676519080404

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи ультравысоких энергий (КЛУВЭ) – частицы и ядра с энергиями более 10^{18} эВ, приходящие в атмосферу Земли. Несмотря на то, что

космические лучи ультравысоких энергий регистрируются уже многие годы, их происхождение по-прежнему остается неизвестным. Изучение массового состава КЛУВЭ необходимо для понимания механизмов рождения космических лучей в источниках и их распространения.

Эксперимент Telescope Array [1], расположенный в штате Юта, США, разработан для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), рождаемых при взаимодействии высокоэнергетичных частиц с атмосферой Земли. Он работает в гибридном режиме: детекторы наземной решетки измеряют поток частиц на земле, а флюоресцентное излучение от ШАЛ измеряется при помощи флюоресцентных телескопов. Наземная решетка состоит из 507 детекторов, распределенных по квадратной решетке с шагом 1.2 км и полной площадью покрытия 700 км². Каждый детектор состоит из двух слоев пластикового сцинтиллятора толщиной 1.2 см площадью 3 м².

МЕТОД

Для изучения химического состава космических лучей был применен один из методов анализа

данных, описываемых многими переменными – усиленные деревья решений (Boosted Decision Trees). Данный метод использует набор переменных, получаемых при реконструкции данных, и трансформирует его в одну переменную ξ , которая в дальнейшем применяется для получения средней атомной массы первичной частицы $\langle \ln A \rangle$ как функции энергии.

В методе использовались следующие переменные:

1. Параметр кривизны фронта Линсли, a [2].
2. Отношение площади сигнала к максимальному значению (AoP) на расстоянии 1200 м.
3. Его наклон β [3].
4. Количество сработавших детекторов.
5. Количество детекторов, исключенных из фитирования фронта ливня в процедуре реконструкции [4].
6. $\chi^2/d. o. f.$ (d. o. f. – degrees of freedom, число степеней свободы)
7. Параметр $S_b = \sum S_i^b$, для $b = 3.0$ и $b = 4.5$ [5].
8. Сумма сигналов всех детекторов данного события.
9. Асимметрия сигнала между верхними и нижними слоями детектора.
10. Полное количество пиков во всех аналогово-цифровых преобразователях.
11. Количество пиков в детекторе с наибольшим сигналом.

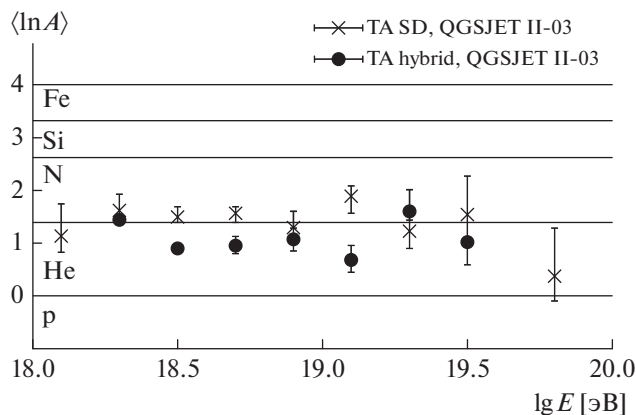


Рис. 1. Средняя атомная масса $\langle \ln A \rangle$, полученная в данной работе (показана крестиками) в сравнении с результатами гибридных измерений эксперимента Telescope Array (показана кружками) [7].

12. Количество пиков, зарегистрированных только в верхнем слое детекторов.

13. Количество пиков, зарегистрированных только в нижнем слое детекторов.

Дополнительно в данные включены зенитный угол θ и величина S_{800} .

ДАННЫЕ

В работе использовались данные наземной решетки эксперимента Telescope Array за девять лет работы установки (2008-05-11–2017-05-10). На данные накладывались следующие критерии:

1. Для данного события сработали семь или более детекторов;
2. Зенитный угол менее 45° ;
3. Восстановленное положение центра ливня находится на расстоянии не менее 1200 м от края решетки;
4. $\chi^2/d. o. f.$ не более 4 для аппроксимации геометрической формы ливня и функции продольного распределения;
5. $\chi^2/d. o. f.$ не более 5 для одновременной аппроксимации геометрической формы ливня и функции продольного распределения;
6. Направление прихода восстановлено с точностью не менее 5° ;
7. Ошибка в определении S_{800} менее 25%.

После наложения критериев итоговый набор содержит 18077 событий.

Монте-Карло моделирования ШАЛ, инициированных первичными протонами и ядрами железа, были выполнены с использованием пакета CORSIKA и адронной модели QGSJETII-03 [6].

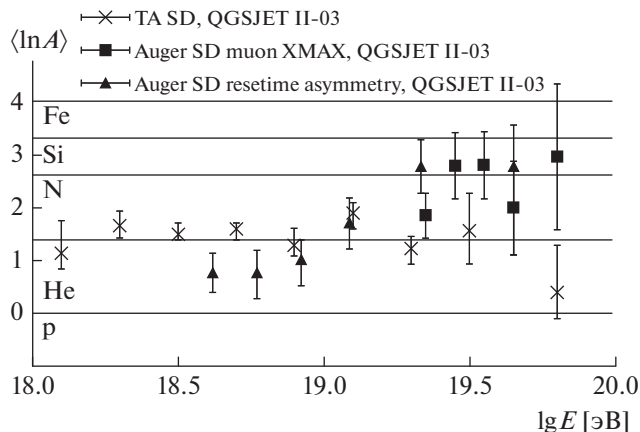


Рис. 2. Средняя атомная масса $\langle \ln A \rangle$, полученная в данной работе (показана крестиками) в сравнении с данным Обсерватории Пьера Оже, основанными на измерениях X_{max} мюонов и асимметрии времени прихода (показаны квадратами и треугольниками, соответственно) [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученный химический состав КЛУВЭ качественно совпадает с результатами измерений флюоресцентных детекторов эксперимента Telescope Array (рис. 1) и данным Обсерватории Пьера Оже (рис. 2).

В рамках чувствительности метода не наблюдается зависимости химического состава от энергии. Средний логарифм атомной массы первичных частиц составляет $\langle \ln A \rangle = 1.52 \pm 0.08_{(stat)} \pm 0.36_{(syst)}$.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-72-20291 (ИЯИ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Telescope Array Collaboration* // Prog. Theor. Phys. Suppl. 2003. V. 151. P. 206.
2. *Telescope Array Collaboration* // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. № 11. Art. № 112005.
3. *Pierre Auger Collaboration* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. Art. № 211101.
4. *Telescope Array Collaboration* // Astrophys. J. Lett. 2013. V. 768. L1.
5. *Ros G., Supanitsky A. D., Medina-Tanco G. A. et al.* // Astropart. Phys. 2013. V. 47. P. 10.
6. *Stokes B. T., Cady R., Ivanov D. et al.* // Astropart. Phys. 2012. V. 35. P. 759.
7. *Hanlon W. for the Telescope Array Collaboration* // UHECR'16.
8. *Pierre Auger Collaboration* // Contributions to the 32nd ICRC. Beijing, 2011.