

УДК 524.1

ИЗУЧЕНИЕ МАССОВОГО СОСТАВА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЕЙ 10^{15} – 10^{17} эВ В ПРОЕКТЕ PRISMA

© 2019 г. О. Б. Щеголев¹, В. В. Алексеенко¹, Ю. В. Стенькин^{1,2}, В. И. Степанов¹, Я. В. Янин¹,
Ж. Цай⁴, Ж. Цяо³, Ш. Цюи⁴, К. Гуо⁴, С. Гуо⁴, Х. Хе³, Е. Лиу⁴, С. Ма³, Дж. Жао³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

³Институт физики высоких энергий, Китайская академия наук, Пекин, КНР

⁴Хебэйский нормальный университет, Шидзяжуанг, КНР

*E-mail: shchegolevleg@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Массовый состав космических лучей в области энергий выше “излома” остается актуальным и нерешенным вопросом в физике космических лучей. Результаты разных экспериментов противоречат друг другу в оценках среднего массового числа и его изменения с ростом первичной энергии. Проект PRISMA предназначен для изучения энергетического спектра и массового состава космических лучей в области 10^{15} – 10^{17} эВ. В основе проекта лежит детектор, способный регистрировать одновременно электромагнитную и адронную компоненты ливня. В работе приведены результаты, полученные на прототипе проекта PRISMA-YBJ на высоте 4300 м над уровнем моря за 3.5 г. эксплуатации. В анализе применен новый метод оценки массового состава по соотношению числа зарегистрированных электронов и нейтронов.

DOI: 10.1134/S0367676519050326

ВВЕДЕНИЕ

Существование “излома” в наблюдаемом спектре космических лучей связывают главным образом с постепенным “вымиранием” протонов, ядер гелия и так далее, по мере роста энергии. Резкое изменение показателя спектра подразумевает увеличение среднего атомного номера первичных частиц, то есть утяжеление химического состава. Прямые измерения, хоть и с большой погрешностью, доходят до энергии в 1 ГэВ. Логарифм среднего массового числа ($\ln A$) в этой области очень мало меняется и равен ~ 1.5 – 2.0 . При более высоких энергиях изучение космических лучей сегодня возможно только через регистрацию широких атмосферных ливней (ШАЛ). Здесь результаты различных экспериментов заметно расходятся. Для энергии 10^{16} эВ эксперименты TUNKA и ЯкуШАЛ приводят оценку $\ln A = 2$, а эксперименты TibetASy и CASA-MIA – $\ln A = 3$. Другие крупные эксперименты, такие как KASCADE, IceTop и др., приводят результаты внутри указанных значений [1].

При этом важно отметить, что главным источником информации об “изломе” в спектре кос-

мических лучей является электромагнитная компонента (включая производимый ею черенковский свет в атмосфере). А главным источником информации об утяжелении массового состава является соотношение числа зарегистрированных электронов и мюонов. Ранее нами был предложен метод одновременной регистрации электромагнитной компоненты ШАЛ и вторичных тепловых нейтронов, производимых адронами ШАЛ при взаимодействии с грунтом под детекторами [2]. Число тепловых нейтронов, регистрируемых в течение 20 мс после прихода фронта ливня, прямо пропорционально числу адронов ливня, попавших на площадь установки. Таким образом, данный метод позволяет регистрировать адронную компоненту ливня по всей площади установки (~ 10000 кв. м) в отличие от сравнительно небольшого по площади адронного калориметра (~ 300 кв. м). Естественно, что число адронов, так же, как и число мюонов, зависит от атомного номера первичной частицы, и отношение числа нейтронов к числу электронов можно использовать для анализа массового состава так же, как и отношение числа мюонов к числу электронов.

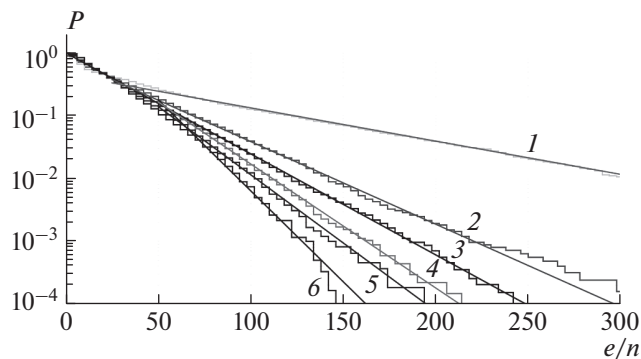


Рис. 1. Нормированные интегральные распределения ливней, отобранных с $\lg N_e > 6.5$ и числом зарегистрированных нейтронов больше 2, по отношению e/n . Средняя энергия отобранных ливней примерно равна 2 ПэВ. 1 – моделирование для гамма-квантов, 2 – моделирование для протонов, 3 – экспериментальные данные, 4 – моделирование для ядер азота, 5 – моделирование для ядер кремния, 6 – моделирование для ядер железа. “Хвосты” распределений аппроксимированы экспонентами. Параметры экспонент показаны на рис. 2.

УСТАНОВКА

Установка PRISMA-YBJ, состоящая из 4 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов), работала в экспериментальном зале проекта ARGO-YBJ в Тибете на высоте 4300 м над уровнем моря с 02.2013 по 02.2017 [3]. За это время было зарегистрировано порядка $2 \cdot 10^6$ событий с энергией в диапазоне от 10^{13} до 10^{17} эВ. Средняя энергия зарегистрированных ливней – порядка 500 ТэВ. 3 детектора были расположены в углах равностороннего треугольника и 4-й детектор – в центре, на расстоянии 5 м от остальных. Площадь установки составляла около 75 кв. м.

В основе эн-детектора лежит неорганический сцинтиллятор ZnS(Ag) с добавкой ${}^6\text{LiF}$. При прохождении заряженных частиц фронта ливня через площадь сцинтиллятора мы получаем сигнал, пропорциональный числу частиц в ШАЛ на уровне наблюдения. Вместе с тем адроны ливня, сосредоточенные главным образом в стволе ливня, взаимодействуя с грунтом, рожают испарительные нейтроны, которые термализуются и захватываются на ${}^6\text{Li}$. Импульсы от захвата нейтронов задержаны относительно момента прихода ливня на 0.1–10 мс. При получении совпадений выше порога (порядка пяти частиц на детектор) с 4 детекторов, усиленный и интегрированный сигнал с фотоумножителя оцифровывается в течение 20 мс. Записываются амплитуда первого импульса (от фронта ливня) и число задержанных импульсов (от нейтронов). Подробнее об устройстве и работе эн-детектора можно прочитать в работах [3, 4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение химического состава космических лучей на установке PRISMA-YBJ возможно благодаря регистрации одновременно электромагнитной и адронной компонент ливня [2]. Из результатов моделирования получено, что при одних и тех же размерах ливня по электромагнитной компоненте (N_e) ливни от легких ядер содержат меньше адронов, чем ливни от тяжелых ядер. Следовательно, можно предположить, что распределение ливней по отношению количества зарегистрированных нейтронов и электронов будет различаться для разных ядер и позволит сделать выводы о массовом составе в ПэВ-ной области на основе экспериментальных данных.

Для анализа было проведено моделирование эксперимента с использованием пакетов CORSIKA7.56 и GEANT4 для ливней от первичных протонов, ядер N, Si, Fe и γ -квантов в диапазоне энергий от 10^{13} до 10^{18} эВ. Выяснилось, что при энергиях меньше 700 ТэВ даже в протонных ливнях адроны не доходят до уровня наблюдения. Для более тяжелых ядер требуется еще большая энергия. Таким образом, “бесствольные” ливни, о которых писалось ранее в работе [5], становятся практически неотличимы с точки зрения массового состава по соотношению e/n . В результате для определения массового состава мы использовали ливни с более чем 7 нейтронами, зарегистрированными в установке. Это соответствует средней энергии ливней порядка нескольких ПэВ. На рис. 1 показано нормированное на единицу интегральное распределение экспериментально зарегистрированных ливней и полученных в ходе моделирования по отношению e/n (числа электронов к числу нейтронов). Видно, что распределения сильно различаются по наклону для разных ядер, что позволяет оценить среднее массовое число первичных частиц, ливни от которых зарегистрированы в эксперименте. Видно, что экспериментальная кривая лежит между гелием и азотом. Хвосты распределений хорошо аппроксимируются экспонентами. На рис. 2 показано, как меняется параметр экспонент с увеличением атомного номера. За исключением протонов это изменение пропорционально $A^{-0.25}$. Это можно объяснить из следующих соображений (учитывая принцип суперпозиции):

$$e \sim A \left(\frac{E_0}{A} \right)^\alpha, \quad \alpha \approx 1.2, \quad (1)$$

$$n \sim A \left(\frac{E_0}{A} \right)^\beta, \quad \beta \approx 0.95, \quad (2)$$

$$\frac{e}{n} \sim A^{0.95-1.2} = A^{-0.25}. \quad (3)$$

Множественность электронов в каскаде растет с первичной энергией на нуклон как степень с по-

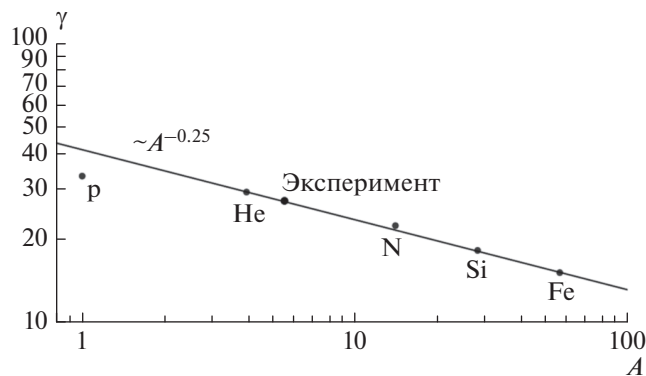


Рис. 2. Зависимость параметров экспонент, аппроксимирующих “хвосты” интегральных распределений ливней по отношению e/n от атомного номера элемента. Результаты моделирования и экспериментальные данные.

казателем 1.2 (см. (1)). Число адронов растет с первичной энергией на нуклон как степень с показателем 0.95 (2). Это было показано в работе [6] и подтверждается результатами нашего моделирования. Следовательно, отношение e/n должно меняться с атомной массой как $A^{-0.25}$ (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам измерений на установке PRISMA-УВJ в ходе совместного анализа с результатами моделирования было показано, что соотношение e/n позволяет оценить среднее мас-

совое число зарегистрированных ливней. Для энергии порядка нескольких ПэВ среднее значение $\ln A$ равно 1.6 ± 0.1 (немного тяжелее гелия). Это согласуется с результатами других экспериментов в пределах погрешностей. К сожалению, маленький размер установки не позволил получить результат для больших энергий, в то время как эта область представляет наибольший интерес.

В настоящее время мы работаем над проектом PRISMA-LHAASO из 64 (а потом 400) эн-детекторов на Тибете в составе обсерватории LHAASO, строительство которой сейчас идет. Одной из задач установки PRISMA-LHAASO будет оценка массового состава космических лучей в области энергий $10^{15} - 10^{17}$ эВ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 16-29-13067_офи_м, № 18-02-00339) и Программы Президиума РАН “Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gaisser T.K.* for the Ice Cube Collaboration // arXiv: 1601.06670. 2016.
2. *Stenkin Yu.V.* // Nucl. Phys. B. 2009. V. 196. P. 293.
3. *Bartoli B., Bernardini P., Bi X.J. et al.* // Astropart. Phys. 2016. V. 81. P. 49.
4. *Stenkin Yu.V.* // Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications. Eds.: Sidorov M., Ivanov O. 2010. Nova Sci. Publish. Ch. 10. P. 253.
5. *Stenkin Yu.V.* // Mod. Phys. Lett. A. 2003. V. 18. № 18. P. 1225.
6. *Hoerandel J.R. & KASCADE Collaboration* // Proc. of the 27th ICRC. 2001. P. 137.