

Изучение адронной компоненты ШАЛ на установке Ковёр-2

Д. Д. Джашпуев¹⁾, А. У. Куджаев, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, Ю. В. Стенькин

Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

Поступила в редакцию 3 апреля 2013 г.

Описана методика регистрации адронов с помощью мюонного детектора установки Ковёр-2 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Вызванные адронами космических лучей события имеют сигнатуру, позволяющую надежно отделить их от мюонов. Приводятся характеристики адронной компоненты широких атмосферных ливней в ливнях с $N_e \geq 10^5$.

DOI: 10.7868/S0370274X13100019

Введение. Адроны, идущие в составе широких атмосферных ливней (ШАЛ) космических лучей, могут быть зарегистрированы мюонными детекторами ливневых установок, особенно если толщина поглотителя невелика ($< 1000 \text{ г/см}^2$), а ось ливня находится достаточно близко к мюонному детектору. События, вызванные адронами, были обнаружены на мюонном детекторе (МД) установки Ковёр-2 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН [1, 2]. Изучение этих событий показывает, что мюонный детектор с тонким поглотителем также может быть использован и в качестве адронного детектора. Более того, в тех случаях, когда мюонный детектор имеет большую непрерывную площадь и состоит из большого количества индивидуальных детекторов, способных измерять энерговыделение, он может быть использован в качестве однослойного адронного калориметра.

В данной работе описана методика разделения мюонных и адронных событий на установке Ковёр-2.

Эксперимент. Комплексная ливневая установка Ковёр-2 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН расположена на высоте 1700 м над уровнем моря [3–5]. В данной работе используются две части установки: собственно установка Ковёр (для регистрации электромагнитной компоненты ШАЛ) и мюонный детектор. Установка Ковёр состоит из 400 жидкостных сцинтилляционных детекторов, непрерывно покрывающих квадрат площадью 200 м^2 . Шесть выносных пунктов, предназначенных для определения направления прихода ШАЛ, расположены на расстояниях 30 и 40 м от центра Ковра. Площадь каждого выносного пункта 9 м^2 . При попадании оси ШАЛ непосредственно в Ковёр ливневые параметры измеряются с высокой точностью

($\Delta X = \Delta Y = 0.35 \text{ м}$, $\Delta N_e/N_e = 0.1$, $\Delta s/s = 0.02$) для ШАЛ с полным числом частиц $10^5 - 5 \cdot 10^6$.

Мюонный детектор площадью 175 м^2 ($5 \times 35 \text{ м}^2$) расположен в подземном туннеле с толщиной поглотителя 500 г/см^2 . Он состоит из 175 индивидуальных пластических сцинтилляционных детекторов площадью 1 м^2 каждый, прикрепленных к потолку подземного туннеля. Толщина сцинтиллятора 5 см. Расстояние между центрами Ковра и МД 47 м. Каждый индивидуальный детектор измеряет энерговыделение в диапазоне 0.5–100 релятивистских частиц (р.ч.), где 1 р.ч. – наиболее вероятное энерговыделение в детекторе от одиночных мюонов (ϵ_μ). Для данного типа детектора $\epsilon_\mu = 10 \text{ МэВ}$. Большая площадь МД и большое количество индивидуальных детекторов дают возможность изучать структуру проникающей компоненты космических лучей.

Выделение адронов в МД. Толщина поглотителя над МД (~ 20 радиационных единиц) достаточно велика для того, чтобы поглотить электромагнитную компоненту. Однако данной толщины (всего лишь ~ 5 пробегов для взаимодействия) недостаточно для поглощения адронных каскадов. Поэтому каскады, рожденные идущими в составе ШАЛ адронами, развиваются в поглотителе над мюонным детектором и дают дополнительное энерговыделение ϵ в сцинтилляторе (рис. 1). Характеристики событий в МД от одиночных адронов (протонов и π -мезонов) получены с помощью моделирования методом Монте-Карло. Расчеты проведены для адронов с фиксированными энергиями в диапазоне 5–500 ГэВ для четырех значений зенитного угла θ : 0° , 15° , 30° и 45° . Как видно из рис. 2 и 3, с ростом энергии адрона наблюдается ожидаемый рост среднего дополнительного энерговыделения и среднего радиуса адронного каскада в слое сцинтиллятора. С увеличением зенитного угла средний радиус пятна ядерного кас-

¹⁾e-mail: dzhappuev@mail.ru

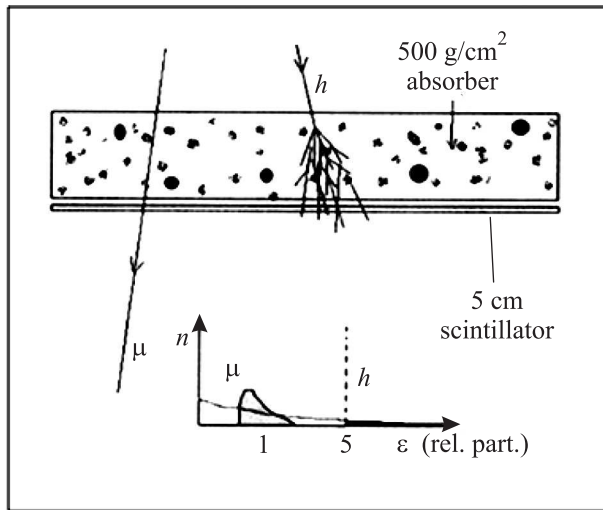


Рис. 1. Схема прохождения мюонов и адронов через мюонный детектор

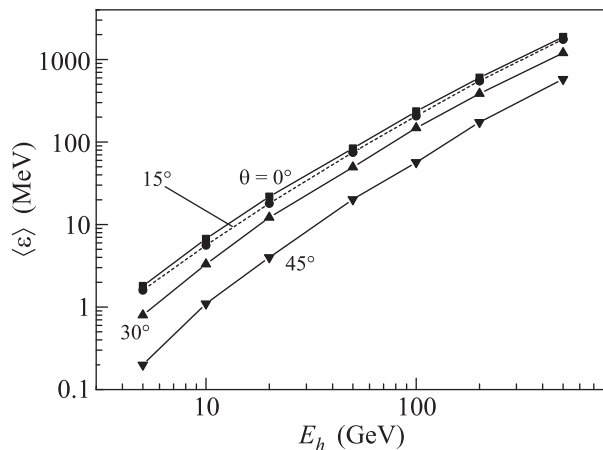


Рис. 2. Зависимость среднего энергосодержания в сцинтилляторе от энергии адрона для различных зенитных углов

када уменьшается, т.к. при этом увеличивается его путь в поглотителе МД и, следовательно, уменьшается дополнительное энергосодержание в слое сцинтиллятора.

Рассмотрим величину

$$k = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_\mu \sec \theta},$$

которая представляет собой отношение среднего дополнительного энергосодержания от одиночного адрона $\bar{\varepsilon}$ к наиболее вероятному энергосодержанию от одиночного мюона. Для мюонов здесь учитывается увеличение пробега в слое сцинтиллятора с ростом зенитного угла. На рис. 4 приведены зависимости величины k от энергии адрона для четырех значений зенитного угла. Как видно из рисунка, для событий, близких к вертикали ($\theta \leq 30^\circ$), и при энергиях ад-

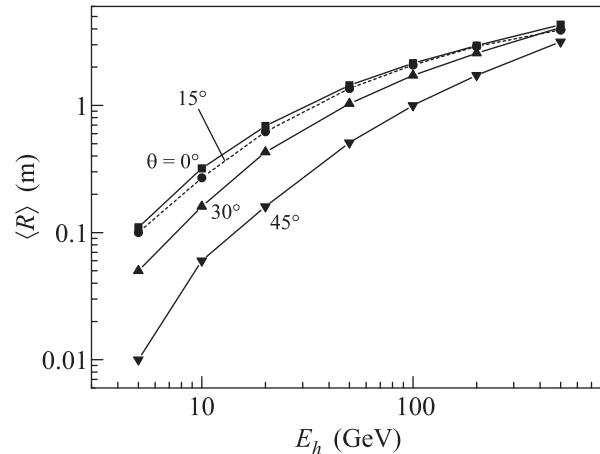


Рис. 3. Зависимость среднего размера адронного каскада в сцинтилляторе от энергии адрона для различных зенитных углов

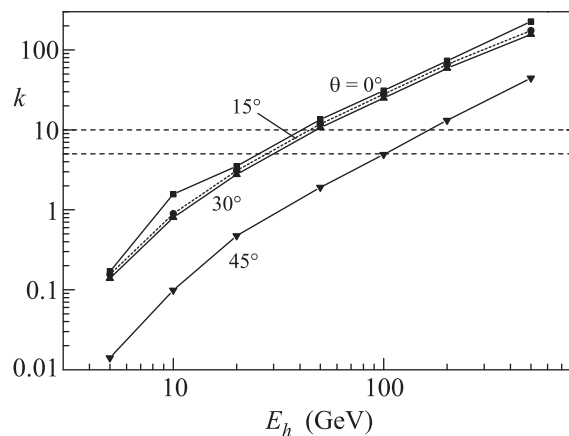


Рис. 4. Зависимость отношения среднего дополнительного энергосодержания к наиболее вероятному энергосодержанию одиночного мюона в слое сцинтиллятора МД от энергии адрона для различных зенитных углов

ронов $\gtrsim 25$ ГэВ среднее энергосодержание от адронов в пять раз превышает энергосодержание от мюонов. В то же время для событий с большими зенитными углами отделить адроны от мюонов можно лишь при энергиях адронов $\gtrsim 100$ ГэВ.

Доказательство надежности разделения мюонов и адронов в МД можно получить, измерив пробег для поглощения компонент космических лучей, порождающих в МД события с различными энергосодержаниями. Это было сделано посредством измерения барометрического коэффициента для событий с различными порогами по энергосодержанию в МД. Если барометрический коэффициент β выражен в процентах/мб, то пробег для поглощения (в г/см²) может быть получен как $L = -100\%/\beta$ [6]. На рис. 5 приведена зависимость пробега для поглощения от локальной плотности энергосодержания в МД.

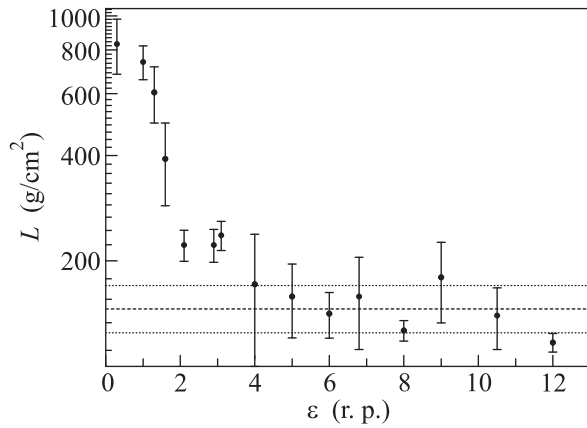


Рис. 5. Зависимость длины поглощения от плотности энерговыделения в мюонном детекторе

Для событий с локальным энерговыделением в МД $\gtrsim 5$ р.ч. пробег для поглощения равен 146.8 ± 21.2 , что практически совпадает с пробегом для поглощения адронов [7].

Таким образом, результаты проведенного анализа показывают, что порожденные в МД адронами из состава ШАЛ события представляют собой пятна детекторов с большим (но зависящим от зенитного угла) локальным энерговыделением. Для событий, близких к вертикали, отбор пятен детекторов с локальным энерговыделением $\gtrsim 5$ р.ч. позволяет надежно отделить адроны с энергией $\gtrsim 25$ ГэВ от мюонов.

Возможности изучения адронной компоненты ШАЛ на установке Ковёр-2. Предложенный выше метод отбора адронов может быть использован для измерения характеристик потока адронов в ШАЛ. В данной работе была получена зависимость среднего числа адронов с энергией $E_h \gtrsim 50$ ГэВ от полного числа частиц в ШАЛ для диапазона $N_e = 10^5 - 10^6$. Для этого были отобраны ливни с $\theta \leq 30^\circ$ и осью в Ковре. Пятна детекторов в МД со средним радиусом не более 5 м и энерговыделением хотя бы в одном детекторе пятна $\varepsilon \geq 100$ МэВ интерпретировались как каскады от адронов с энергией $E_h \gtrsim 50$ ГэВ. Для отобранных ШАЛ была получена зависимость числа адронов на ливень \bar{N}_h от полного числа частиц N_e , которая описывается степенным законом $\bar{N}_h \sim N_e^\alpha$, где $\alpha = 0.89 \pm 0.08$ (рис. 6). На этом же рисунке приводятся результаты расчёта зависимости $\bar{N}_h(N_e)$ для первичных протонов (нижняя кривая) и ядер железа (верхняя кривая). Расчет проведен по программе CORSIKA с использованием модели адронных взаимодействий QGSJET01 при высоких энергиях и модели GHEISHA при низких.

Заключение. Итак, на мюонном детекторе установки Ковёр-2 были обнаружены события, вызван-

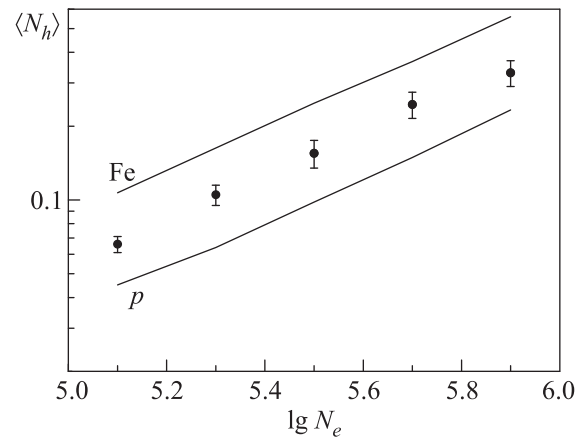


Рис. 6. Зависимость среднего числа адронов с $E_h \gtrsim 50$ ГэВ от полного числа частиц в ШАЛ. Символы – эксперимент, верхняя и нижняя кривые – результаты расчета для первичных ядер железа и протонов соответственно

ные адронами из состава ШАЛ. Изучение таких событий показало, что мюонный детектор подобного типа (с большой непрерывной площадью, с достаточно тонким поглотителем, состоящий из большого числа измеряющих энерговыделение индивидуальных детекторов) может быть также использован и в качестве детектора адронов. Это позволяет одновременно изучать адронную и мюонную компоненты ШАЛ. Следует заметить, что для мюонных детекторов подобного типа неучет вклада адронов приводит к завышению числа событий с большой множественностью мюонов.

Работа была выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН “Фундаментальные свойства материи и астрофизика”, а также Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 11-02-12043-офи-м-2011 и 10-02-00735-а).

1. D. D. Dzhappuev, A. U. Kudzhaev, A. S. Lidvansky et al., *Proc. 29th ICRC*, Pune, 2005, v. 6, p. 233.
2. D. D. Dzhappuev, V. V. Alekseenko, A. S. Lidvansky et al., *Proc. 30th ICRC*, Merida, 2007.
3. Е. Н. Алексеев, В. В. Алексеев, А. В. Воеводский и др., *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **38**, 1097 (1974).
4. Е. Н. Алексеев, П. Я. Глемба, А. С. Лидванский и др., *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **40**, 994 (1976).
5. Д. Д. Джашпуев, В. В. Алексеев, В. И. Волченко и др., *Изв. РАН. Сер. физ.* **71**, 542 (2007).
6. Л. И. Дорман, *Метеорологические эффекты космических лучей*, М.: Наука, 1972.
7. С. Хаякава, *Физика космических лучей*, М.: Наука, 1973 [S. Hayakawa, *Cosmic Ray Physics: Nuclear and Astrophysical Aspects*, N.Y., Wiley, 1969].