

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Спектр широких атмосферных ливней по числу мюонов в области за изломом в энергетическом спектре космических лучейН. Н. Калмыков^а, Г. В. Куликов^б, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ),
отдел частиц сверхвысоких энергий. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^а kalm@eas.sinp.msu.ru, ^б kulikov@eas.sinp.msu.ru*

Статья поступила 09.06.2010, подписана в печать 15.09.2010

С увеличенной статистикой получен спектр широких атмосферных ливней (ШАЛ) по числу мюонов с использованием центрального мюонного детектора, входящего в состав установки ШАЛ МГУ и регистрирующего мюоны с энергией более 10 ГэВ. Рассмотрено поведение массового состава первичных космических лучей в зависимости от энергии. Подтвержден полученный ранее вывод, что, начиная с энергии излома первичного энергетического спектра при $3 \cdot 10^{15}$ эВ и вплоть до 10^{17} эВ, происходит изменение состава, связанное с увеличением доли тяжелых ядер, однако после энергии 10^{17} эВ доля тяжелых ядер начинает убывать и состав становится более легким. Проведено сравнение с аналогичными данными других экспериментов. Подтверждено существование дополнительной компоненты космических лучей, указание на наличие которой было получено из данных о спектре ШАЛ по числу электронов.

Ключевые слова: космические лучи сверхвысоких энергий, широкие атмосферные ливни, массовый состав и энергетический спектр первичного космического излучения.

УДК: 537.591.15. PACS: 96.50.s–, 96.50.sd.

Введение

Исследование состава и энергетического спектра космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий в области излома энергетического спектра при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ и выше является одной из актуальных задач физики космических лучей, поскольку эти экспериментальные данные важны для выяснения природы происхождения космических лучей и характера их распространения в Галактике.

Исследование массового состава первичных КЛ в области энергии излома и до 10^{18} эВ давно проводится на установке ШАЛ МГУ [1]. Было обнаружено уменьшение доли протонов и увеличение доли тяжелых ядер после излома, что и следовало ожидать, если справедлива диффузионная модель распространения КЛ [2, 3].

Как показывают экспериментальные данные, излом в парциальных энергетических спектрах при энергии $\sim 10^{17}$ эВ достигается уже и для ядер железа [4], однако показатель энергетического спектра всех частиц и при энергиях выше 10^{17} эВ сохраняет примерно то же значение, что и при энергиях $10^{16} - 10^{17}$ эВ. Поэтому, начиная с энергии $\sim 10^{17}$ эВ, в потоке первичных КЛ должен все больше проявляться вклад КЛ от источников иного происхождения, например экстрагалактических. Указание на такую возможность было получено нами ранее при анализе спектра ШАЛ по числу частиц и исследования зависимости плотности потока мюонов на расстоянии 50 м от оси ШАЛ от числа электронов [5].

В настоящей работе с целью получения дополнительной информации исследуется спектр ШАЛ по числу мюонов, измеренный на установке ШАЛ МГУ.

1. Установка ШАЛ МГУ

В статье анализируются экспериментальные данные, полученные в серии измерений с 1984 по 1990 г. [1]. Установка занимала площадь 0.5 км^2 и включала в себя 77 наземных детекторов плотности потока заряженных частиц, состоящих из счетчиков Гейгера–Мюллера, регистрирующих электронно-фотонную компоненту ШАЛ. Их показания использовались для определения числа электронов в ливне на уровне наблюдения N_e . Зенитные и азимутальные углы направления прихода оси ШАЛ определялись с помощью 30 сцинтилляционных детекторов. Мюонный детектор площадью 36.4 м^2 , состоящий из 1104 счетчиков Гейгера–Мюллера, находился в центральной части установки под землей на глубине 40 м водного эквивалента. Пороговая энергия мюонов 10 ГэВ. За рассматриваемый период получена большая статистика ливней в интервале первичных энергий $10^{15} - 10^{18}$ эВ, содержащих данные как об электронно-фотонной, так и о мюонной компоненте. Накопленный большой статистический материал продолжает обрабатываться и в настоящее время, позволяя получать новые научные результаты.

2. Спектр ШАЛ по числу мюонов

Для построения спектра ШАЛ по числу мюонов были использованы ливни во всем регистрируемом диапазоне по $N_e = 10^5 - 10^8$.

Возможность изучения спектра ШАЛ по числу мюонов на установке ШАЛ МГУ обусловлена хорошей точностью в определении ориентации оси ливня (а следовательно, и расстояния до подземного мюонного детектора) при достаточной точности определения плотности

потока мюонов благодаря большой площади детектора. Плотность потока мюонов в ливне определялась как

$$\rho_\mu = n_\mu / S_0 \cdot \cos \theta,$$

где n_μ — число сработавших счетчиков, S_0 — площадь детектора и θ — зенитный угол ливня. Тогда полное число мюонов равно

$$N_\mu = \rho_\mu / \bar{I}_\mu(r, N_e),$$

где \bar{I}_μ — средняя функция пространственного распределения мюонов, слабо зависящая от числа электронов N_e . Экспериментальные данные удовлетворительно описываются функцией вида

$$\bar{I}_\mu \sim r^{-n} \cdot \exp\left(-\frac{r}{R}\right),$$

где $R = 80$ м, а показатель степени n меняется от 0.5 при $N_e = 10^5$ до 0.75 при $N_e = 5 \cdot 10^7$.

При построении спектра по N_μ особое внимание уделялось правильному учету эффективности регистрации ливней с различными N_e при заданном N_μ . При используемой управляющей системе, отбирающей ливни по потоку электронов, могут эффективно изучаться ливни с $N_e \geq 10^5$, что ограничивает возможность изучения спектра ливнями с $N_\mu \geq 10^4$, которые не наблюдаются в ливнях с $N_e < 10^5$.

Учитывая зависимость N_μ от N_e , имеющую вид

$$N_\mu = 3.24 \cdot 10^3 (N_e / 10^5)^{0.78},$$

находим, что значению $N_\mu = 10^4$ соответствует значение $N_e = 4 \cdot 10^5$. Таким образом, спектр по N_μ соответствует области за изломом в спектре по числу электронов [6].

Полученный дифференциальный спектр по N_μ представлен на рис. 1. В изученном диапазоне по N_μ он описывается степенным законом с показателем степени $\kappa_\mu + 1 = 3.14 \pm 0.03$, что находится в соответствии с показателем спектра ШАЛ по N_e . На рисунке для

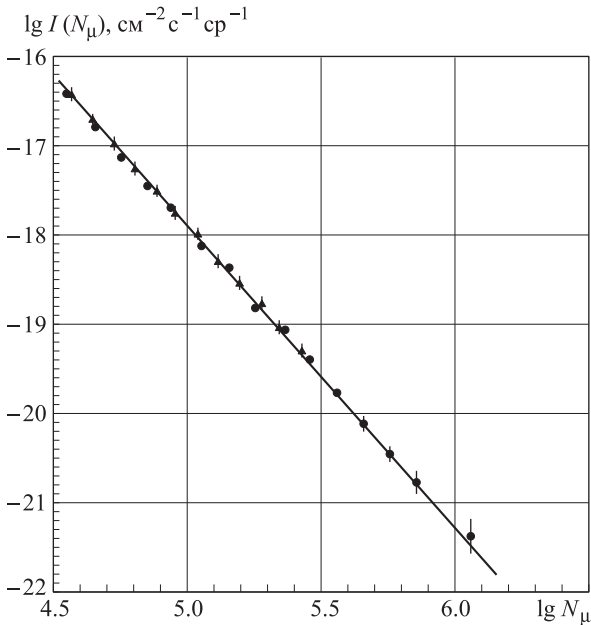


Рис. 1. Дифференциальный спектр ШАЛ по числу мюонов. Точки — экспериментальный спектр по числу мюонов. Треугольники — спектр по числу мюонов, полученный путем пересчета из спектра по числу электронов

сравнения приведен спектр ШАЛ по N_μ , полученный путем пересчета из спектра по N_e [6] с использованием указанной зависимости N_μ от N_e . Как видно из рисунка, оба спектра находятся в хорошем согласии.

Данные о спектре ШАЛ по числу мюонов коррелируют с результатами выполненного нами ранее анализа спектра ШАЛ по числу электронов [5]. Так, было показано, что расчетный спектр, полученный с использованием массового состава, дающего оптимальное согласие с экспериментом в области энергий меньше 10^{17} эВ ($N_e \leq 10^7$), идет существенно ниже экспериментального при $N_e > 10^7$. Поскольку при энергиях выше 10^{17} эВ парциальные энергетические спектры всех групп ядер, включая железо, уже изменили свой показатель (по нашим данным, с 2.7 на 3.7), то следует считать, что в области первичных энергий более 10^{17} эВ должна существовать дополнительная компонента, роль которой при меньших энергиях мала. Наличие такой компоненты и ее возможная природа уже обсуждались в ряде работ (см., например, обзор [8]).

3. Результаты

Спектр по числу частиц, обусловленный дополнительной компонентой, если его определить как разность между экспериментальным спектром и расчетным спектром, меняющим свой показатель, как описано выше, можно представить соотношением

$$I_d(N_e) = 1.55_{-0.30}^{+0.42} \cdot 10^{-21} \cdot (N_e / 10^7)^{-2.36 \pm 0.08} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$$

при $10^7 \leq N_e \leq 10^8$. В предположении, что дополнительная компонента состоит из протонов, и используя модель QGSJET 01, находим

$$I_{d(e)}(E_0) = 0.82_{-0.16}^{+0.23} \cdot 10^{-31} \times (E_0 / 10^{17} \text{ эВ})^{-2.55 \pm 0.09} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$$

при $10^{17} \leq E_0 \leq 10^{18}$ эВ. Как показано в [5], предположение о чисто протонном составе дополнительной компоненты подтверждается полученной нами зависимостью плотности мюонов $\rho_\mu(50 \text{ м})$ от N_e и не противоречит результатам других экспериментов, выполненных при энергиях $10^{17} - 10^{18}$ эВ.

Осуществляя с экспериментальным спектром по N_μ ту же процедуру, что и со спектром по N_e , т.е. вычитая из него расчетный спектр по N_μ , который при $N_\mu \geq 10^5$ убывает с ростом N_μ , как $N_\mu^{-4.10}$, находим спектр по N_μ , обусловленный дополнительной компонентой. Этот спектр (рис. 2) может быть аппроксимирован формулой

$$I_d(N_\mu) = 3.54_{-0.62}^{+0.88} \cdot 10^{-19} (N_\mu / 10^5)^{-2.87 \pm 0.10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$$

при $10^5 \leq N_\mu \leq 10^6$, откуда следует, что энергетический спектр дополнительной компоненты в предположении протонного состава может быть описан соотношением

$$I_{d(\mu)}(E_0) = 1.07_{-0.19}^{+0.27} \cdot 10^{-31} \times (E_0 / 10^{17} \text{ эВ})^{-2.63 \pm 0.09} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$$

при $10^{17} \leq E_0 \leq 10^{18}$ эВ.

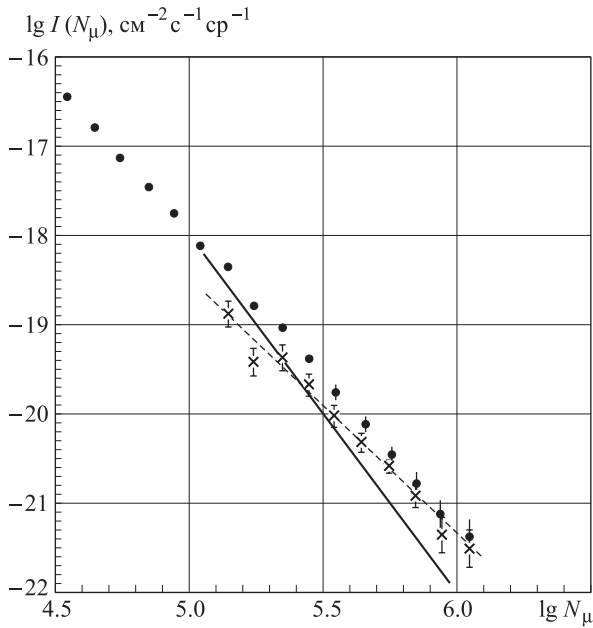


Рис. 2. Дифференциальный спектр ШАЛ по числу мюонов. Точки — экспериментальные данные. Сплошная линия — расчет. Крестики и штриховая линия — спектр дополнительной компоненты

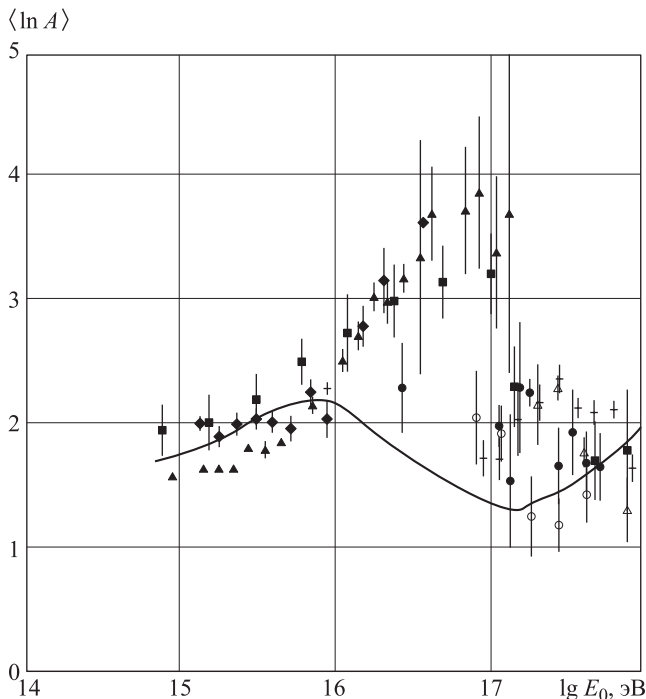


Рис. 3. Зависимость $\langle \ln A \rangle$ от первичной энергии по данным различных работ: ■ — МГУ [9], ◇ — Тунка [10], ▲ — KASCADE [11], ○ — CASABLANCA [12], ● — Якутск [13], △ — Haverah Park [14], ++ — Fly's Eye [15], сплошная линия — расчет из работы [16]

Таким образом, использование спектра по N_μ приводит к результату, в пределах ошибок согласующемуся с полученным ранее с использованием спектра всех частиц. Это можно рассматривать как подтверждение принятых предположений.

Наличие дополнительной компоненты отражается на величине $\langle \ln A \rangle$ — характеристики обычно используемой для описания массового состава.

По данным о спектрах по числу электронов и по числу мюонов, а также по зависимости от числа электронов плотности потока мюонов на расстоянии 50 м от оси ШАЛ получено, что при энергии в области 10^{17} эВ и выше наблюдается обогащение первичных космических лучей легкими ядрами. Наши данные по массовому составу первичного излучения наряду с результатами других работ представлены на рис. 3. На рисунке также приведена расчетная кривая из работы [16], полученная с учетом усиления магнитного поля в области фронта ударной волны и вклада различных типов сверхновых в процессе их эволюции. По-видимому, следует отметить, что теория, хорошо воспроизводящая энергетический спектр всех частиц [17], испытывает определенные затруднения с количественным воспроизведением резкого максимума $\langle \ln A \rangle$, наблюдаемого при энергии порядка 10^{17} эВ.

Заключение

По данным о мюонной компоненте ШАЛ получен энергетический спектр дополнительной компоненты в области энергий 10^{17} – 10^{18} эВ. Следует отметить, что спектр, определенный из экспериментального спектра мюонов, в пределах ошибок хорошо согласуется с результатом, полученным ранее на основании анализа спектра всех частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00544).

Список литературы

1. Вернов С.Н., Христиансен Г.Б., Атрашкевич В.Б. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. **44**, № 3. С. 537.
2. Вишневская Е.А., Калмыков Н.Н., Куликов Г.В. и др. // ЯФ. 1999. **62**. С. 300.
3. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П., Калмыков В.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 6. С. 29.
4. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. // Astropart. Phys. 2005. **24**. P. 1.
5. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 5. С. 60.
6. Fomin Yu.A., Khristiansen G.B., Kulikov G.V. et al. // Proc. 22nd ICRC. Dublin, 1991. **2**. P. 85.
7. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl). 1997. **52B**. P. 17.
8. Hillas A.V. // J. Phys. G. 2005. **31**. P. R95.
9. Вишневская Е.А., Калмыков В.Н., Калмыков Н.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 1. С. 28.
10. Буднев Н.М., Вишневски Р., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. **69**, № 3. С. 347.
11. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. // Astropart. Phys. 2005. **24**. P. 1.
12. Fowler J.W., Fortson L.F., Jui C.C. et al. // Astropart. Phys. 2001. **15**. P. 49.
13. Knurenko S., Kolosov V., Petrov Z. et al. // Proc. 27 ICRC. Hamburg, 2001. **1**. P. 177.
14. Watson A.A. // Phys. Rep. 2000. **333-334**. P. 309.
15. Bird D.J., Boyer J., Chi C.Y. et al. // Astrophys. J. 1994. **424**. P. 491.
16. Ptuskin V., Eun-Suk Seo, Zirakashvili V. // arXiv: 0912.5173v1 [astro-ph.HE] 28 Dec. 2009.
17. Калмыков Н.Н., Кузьмичев Л.А., Куликов Г.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 39.

The EAS muon number spectrum beyond the knee in the primary cosmic ray energy spectrum**N. N. Kalmykov^a, G. V. Kulikov^b, V. P. Sulakov, Yu. A. Fomin***Department of Super-High Energy Particles, D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^a kalm@eas.sinp.msu.ru, ^b kulikov@eas.sinp.msu.ru.*

The EAS muon number spectrum is obtained with the increased statistics using data of the central muon detector (the muon threshold energy is 10 GeV) of the MSU EAS array. The conclusion about dependence of the cosmic ray mass composition on primary energy have been done. The obtained earlier conclusion is confirmed that for energies beginning from the knee energy $3 \cdot 10^{15}$ eV the abundance of heavy nuclei at first increases with energy but at energies above 10^{17} eV the portion of light nuclei starts to grow. The comparison with other experimental data is presented. The existence of the additional component of cosmic rays which was found in studies of the EAS electron number spectrum, is confirmed.

Keywords: super-high energy cosmic rays, cosmic ray mass composition, energy spectrum of primary cosmic rays, extensive air showers.

PACS: 96.50.s-, 96.50.sd.

Received 9 June 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2011).

Сведения об авторах

1. Калмыков Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр.; тел: (495) 939-23-69, e-mail: kalm@eas.sinp.msu.ru.
2. Куликов Герман Викторович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр.; тел: (495) 939-57-30, e-mail: kulikov@eas.sinp.msu.ru.
3. Сулаков Владимир Петрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел: (495) 939-44-96, e-mail: sulakov@eas.sinp.msu.ru.
4. Фомин Юрий Анатольевич — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр.; тел: (495) 939-57-30, e-mail: fomin@eas.sinp.msu.ru.