

О ПРИРОДЕ УЗКИХ ГРУПП МЮОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Ю.Н. Вавилов, Л.Г. Деденко

УДК 537.591.15

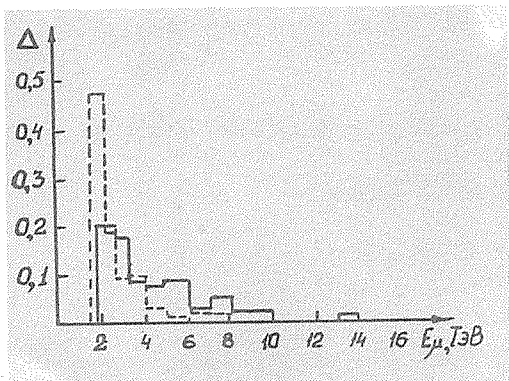
Методом Монте-Карло рассчитан ряд характеристик узких групп мюонов, возникающих из-за флуктуаций в ядерном каскаде. Учет кулоновского рассеяния мюонов в грунте "деформирует" группы в более широкие. Радиус круга, внутри которого уместается группа, возрастает с 0,5 до $1 \div 1,5$ м.

В течение многих лет не угасает интерес к исследованию узких мюонных групп, наблюдаемых при первичных энергиях космических лучей $\gtrsim 10^{15}$ эВ /1-7/. Это вызвано тем, что, исходя из имеющихся данных о генерации мюонов в ядерных каскадах в атмосфере и о первичном энергетическом спектре, трудно объяснить существование обнаруженных групп. Поэтому представляется актуальным сравнение экспериментальных данных по интенсивности и другим параметрам мюонных групп с расчетами, базирующимися на современных данных о сильных взаимодействиях и экспериментальной информации об энергетическом спектре и массовом составе первичного космического излучения /6/. Такие расчеты позволяют, в частности, сравнить различные характеристики мюонов как в группах, так и в целом по ливню.

Возможно, что изучение узких групп высокоэнергичных мюонов, наряду с другими экспериментами, прольет свет на новые процессы и частицы, появляющиеся при энергиях выше $\sim 10^{15}$ эВ.

В этой связи особенно интересны результаты, полученные в эксперименте индо-японской группы на глубине 3375 м.в.э. в шахте Колар Голд Филдс (КГФ), где наблюдались узкие, с диаметром ~ 1 м, группы из восьми и больше мюонов.

Целью нашего расчета было выяснение возможности самого факта образования узких мюонных групп за счет тривиального механизма. В связи с этим была использована упрощенная скейлинговая модель ядерного взаимодействия /8/. Основные параметры для сильных взаимодействий приведены в работе /6/. Энергетический спектр и химический состав принимались в соответствии с /9/.



Р и с. 1. Энергетические спектры мюонов (Δ — доля событий в интервале). Сплошная линия — спектр мюонов в "узких" группах из $n_{\mu} \geq 8$ при $R \leq 0,5$ м; $E_0 = 10^{16}$ эВ; $\vartheta = 0$; $\bar{E}_{\mu} = 4,3$ ТэВ; $E_{\mu}^{1/2} = 3$ ТэВ. Пунктирная линия — спектр для всех мюонов, $E_0 = 10^{16}$ эВ; $\vartheta = 0$; $\bar{E}_{\mu} = 2,6$ ТэВ; $E_{\mu}^{1/2} = 2$ ТэВ.

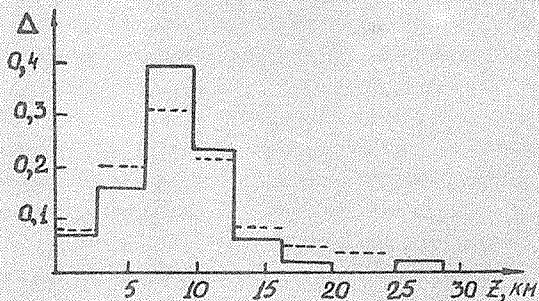
На рис. 1 представлены рассчитанные энергетические спектры мюонов в узких группах, а также в целом по ливню. Для установки КГФ пороговая энергия регистрации мюонов составляет на поверхности $E_{\mu}^{\text{пор}} = 1,5$ ТэВ. Группой мюонов мы называем совокупность из восьми или более мюонов в круге с $R \leq 0,5$ м на уровне расположения регистрирующих детекторов. Как видно из рис. 1, энергетический спектр мюонов из узких групп оказывается более жестким, чем для мюонов в целом по ливню. Энергия первичного протона для всех событий, включенных в гистограммы (рис. 1), составляет $E_0 = 10^{16}$ эВ. Для других значений энергии первичной частицы в диапазоне $3 \cdot 10^{15} \leq E_0 \leq 10^{16}$ эВ получены аналогичные результаты.*

На рис. 2 для тех же двух классов событий, что и на рис. 1, показаны распределения по высотам генерации мюонов с пороговой энергией 1,5 ТэВ. Как видно, распределения по высотам генерации в двух случаях практически совпадают. Средний радиус мюонов в узких группах оказался равным 0,3 м.

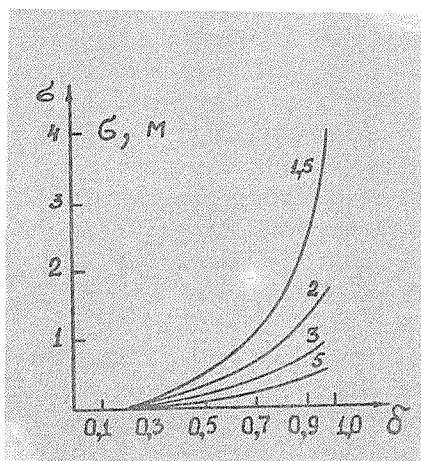
Результаты расчетов показывают, что, во-первых, флуктуационный механизм в принципе обеспечивает появление узких групп мюонов на поверхности шахты; во-вторых, характеристики мюонов в группах, возникших из-за флуктуаций, мало отличаются от соответствующих характеристик мюонов в целом по ливню.

Однако для тривиального объяснения возникновения узких групп мюонов необходимо также проследить как кулоновское рассеяние мюонов в грунте деформирует структуру групп.

* Как показывают наши расчеты, эффективная область первичных энергий протонов, ответственных за наблюдаемые в /5/ узкие мюонные группы, составляет $3 \cdot 10^{15} \div 10^{16}$ эВ.



Р и с. 2. Распределение по высоте генерации мюонов. Сплошная линия – для "узких" группы мюонов с $n_{\mu} \geq 8$; $R \leq 0,5$ м; $E_0 = 10^{16}$ эВ; $\bar{Z} = 9,1$ км; $Z_{1/2} = 9,5$ км. Пунктирная линия – распределение для всех мюонов, $\bar{Z} = 9,4$ км; $Z_{1/2} = 9,5$ км.



Р и с. 3. Зависимость среднеквадратичного отклонения мюонов $\sigma_T = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ за счет кулоновского многократного рассеяния в грунте от пройденной мюоном толщины грунта, выраженной в долях δ от полной толщины грунта шахты Колар Голд Филд, 3375 м.в.э. Значения начальной энергии мюона (в ТэВ) на поверхности шахты обозначены у каждой кривой.

Моделирование многократного кулоновского рассеяния производилось методом, предложенным в /10/. Энергетические потери мюонов рассчитывались по формулам, приведенным в /11/, с учетом состава грунта шахты КГФ.

При моделировании путь от поверхности шахты до детектора разбивался на 100 интервалов. Потери энергии мюонов в каждом интервале рассчитывались по средним потерям. По значениям энергии мюона на входе и выходе из каждого интервала и длине интервала по стандартной формуле определялась

корреляционная матрица, описывающая многократное кулоновское рассеяние. Затем эти матрицы суммировались по всем интервалам с учетом расстояния каждого интервала до детектора, и таким образом рассчитывалась окончательная матрица рассеяния. Она определяла стандартные отклонения для смещения x и угла ϑ_x и их корреляционный момент для плоскости X (и аналогичные величины для плоскости Y) при распространении мюона заданной энергии от поверхности грунта до детектора. Затем по стандартной подпрограмме вычислялись два случайных числа, распределенных по двумерному нормальному закону с найденной корреляционной матрицей. Эта пара чисел определяла смещение x и угол ϑ_x в плоскости X. Аналогично рассчитывались смещение y и угол ϑ_y в плоскости Y.

На рис. 3 показана зависимость среднеквадратичного отклонения $\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ мюонов от толщины грунта, пройденной мюонами, и выраженной в долях полной толщины грунта КГФ для разных начальных энергий мюонов. Поскольку ожидаемое медианное значение энергии мюонов в узких группах на поверхности шахты, имеющих флуктуационную природу, составляет около 3 ТэВ (рис. 1), то кулоновское рассеяние таких мюонов в грунте дает $\sigma_r \approx 1$ м, что должно привести к размыванию групп на уровне наблюдения. Это отразится на интенсивности групп. Чтобы группы сохранялись, энергия мюонов должна быть $\gtrsim 10$ ТэВ, что требует увеличения энергии первичного протона, а это, в свою очередь, уменьшит интенсивность узких групп.

Из проведенных расчетов можно сделать следующий вывод: либо энергетический спектр мюонов в зарегистрированных на опыте многочастичных узких группах значительно жестче, чем спектр, рассчитанный в принятых предположениях об особенностях сильных взаимодействий и механизме генерации высокоэнергичных мюонов в ядерном каскаде, либо наблюдаемые на установке КГФ пучки мюонов связаны с взаимодействиями и распадами новой тяжелой сильно проникающей частицы. Такая гипотетическая частица должна пройти до взаимодействия значительную часть всей толщи грунта над установкой КГФ.

Поступила в редакцию 17 сентября 1984 г.

После переработки 21 ноября 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miyake S. et al. Phys. Soc. Japan, 18, 464 (1963).
2. Ильина Н. П. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 36, 1744 (1972).

3. Totsuka Y., Koshiha M. J. Phys. Soc. Japan, 36, 341 (1974).
4. Chudakov A. E. 16th Int. Cosmic Ray Conf., Kyoto, v. 10, 192 (1979).
5. Krishnaswami M. R. et al. 16 ICRC, Kyoto, v. 13, 378 (1979).
6. Vavilov Yu. N., Dedenko L. G. 17 ICRC, Paris, v. 7, 38 (1981).
7. Muraki Y. 17 ICRC, Paris, v. 10, 346 (1981).
8. Шляпников П. Б., Лиходед А. К. УФН, 124, № 1, 3 (1978).
9. Nikolsky S. I. Proc. of the Workshops on Cosmic Ray Interactions and High Energy Results. La Paz-Rio de Janeiro, 336, 1982.
10. Альбрехт К. Ф. и др. Препринт ОИЯИ 1-7549, Дубна, 1973.
11. Мохов Н. В., Семенова Г. И., Узунян А. В. Препринт ИФВЭ 79-101, Серпухов, 1979.