

НОВЫЙ МЕТОД ДЛЯ ПОИСКА АНОМАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ МЮОНОВ В ШИРОКИХ
АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Н. Н. Калмыков, Г. Б. Христиансен *)

УДК 537.591.15

Предлагается метод исследования аномальной генерации мюонов, основанный на изучении энергетических спектров мюонов в ливнях разного возраста в сочетании с измерениями задержки мюонов относительно ливневого фронта.

Вопрос о поисках аномальной (не связанной с π - μ и K - μ распадами) генерации мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) имеет свою историю. В целом ряде работ /1,2,3/ были предприняты попытки изучения и анализа так называемых групп или пучков мюонов высоких энергий в составе ШАЛ, происходящих от частиц с первичной энергией 10^{15} - 10^{17} эВ. Хотя до сих пор не существует ясности в интерпретации этого явления, все же последние исследования указывают на важную роль фоновых событий, связанных с флуктуациями пространственного распределения мюонов ШАЛ вблизи оси /1/. Другой путь поиска аномальной генерации - изучение энергетического спектра мюонов ШАЛ в области энергий более нескольких десятков ГэВ - связан с необходимостью знания энергетического спектра адронов в ШАЛ на тех высотах в атмосфере, которые вносят определяющий вклад в генерацию мюонов (за счет π - μ распада) рассматриваемых энергий. Изучение энергетического спектра адронов, тем более в верхней половине атмосферы - сложная задача.

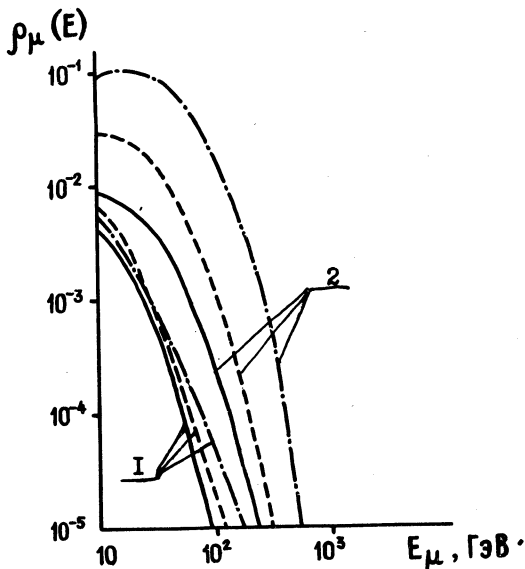
Метод, излагаемый в настоящей работе, заключается в следующем. Предлагается провести сравнительное статистическое изучение энергетического спектра мюонов в так называемых "старых" и "молодых" ШАЛ. Как известно, (см., например, /4/) флуктуации в развитии ядерно-каскадного процесса приводят к флуктуациям в положении максимума лавины ШАЛ от частицы заданной первичной энергии. Ливни с вы-

*) НИИЯФ МГУ

соким положением максимума на уровне моря наблюдаются далеко за максимумом и называются "старыми". Ливни с относительно низким положением максимума в атмосфере являются "молодыми". Условия генерации мюонов в двух категориях ливней совершенно различны. В "старых" ливнях мюоны возникают от распада пионов и каонов в верхних слоях атмосферы, в "молодых" ливнях генерация мюонов происходит в нижней части атмосферы. Энергия пионов $E_{\text{кр}}$, при которой вероятность неупругого взаимодействия пиона в воздухе равна вероятности его распада, пропорциональна геометрической длине ядерного пробега и, следовательно, обратно пропорциональна давлению. Поэтому значение $E_{\text{кр}}$ для "старых" ливней в несколько раз больше, чем для "молодых". Вблизи уровня моря $E_{\text{кр}} \approx 10^{10}$ эВ, в связи с чем зависимости энергетического спектра мюонов от возраста ливня, состоящей в укрупнении спектра в "молодых" ливнях, следует ожидать в интервале энергий 10 - 100 ГэВ, вполне доступных современным магнитным спектрометрам /5,6/.

Если, с другой стороны, существует аномальная (быстрая) генерация мюонов в рассматриваемом энергетическом интервале, то разница в спектрах мюонов в "старых" и "молодых" ливнях может исчезнуть, если сечение аномальной генерации достаточно велико. На рис. 1,2 приведены результаты расчетов дифференциальных энергетических спектров мюонов в "старых" и "молодых" ШАЛ для различных моделей развития ШАЛ и различных расстояний от оси ливня. На рис. 1 приведены спектры в интервале энергий 10 - 100 ГэВ для расстояний от оси 64 - 128 м и для следующих моделей развития ШАЛ: скейлинг (см. /7/), СКР и МВМ (см. /8/). На рис. 2а те же спектры приведены для $R = 16 - 32$ м, а на рис. 2б для $R = 2 - 4$ м. Расчет выполнен для полного числа частиц $N_0 = 2 \cdot 10^5$. Определение "старого" и "молодого" ливня производилось следующим образом. Из всей совокупности разыгранных ливней выбирались 10% ливней с минимальными и 10% с максимальными отношениями $\rho_{\mu}(>10 \text{ ГэВ}, R)/N_0$. Ливни с минимальными $\rho_{\mu}(R)/N_0$ использовались для построения энергетического спектра в "молодых" ливнях, а ливни с максимальными $\rho_{\mu}(R)/N_0$ - для построения спектров в "старых" ливнях. На рис. 2а видно, что энергетические спектры в области $E_{\mu} = 10 \div 100$ ГэВ в "старых" ливнях по всем моделям сильно отличаются от спектров в "молодых" ливнях; при этом отличие растет при

переходе от модели скейлинга к модели высокой множественности. Наклон спектров в рассматриваемом диапазоне E_μ и R в "старых" ливнях для всех моделей близок. Различие в наклоне спектров в "старых" ливнях для больших расстояний (см. рис. 1) связано с

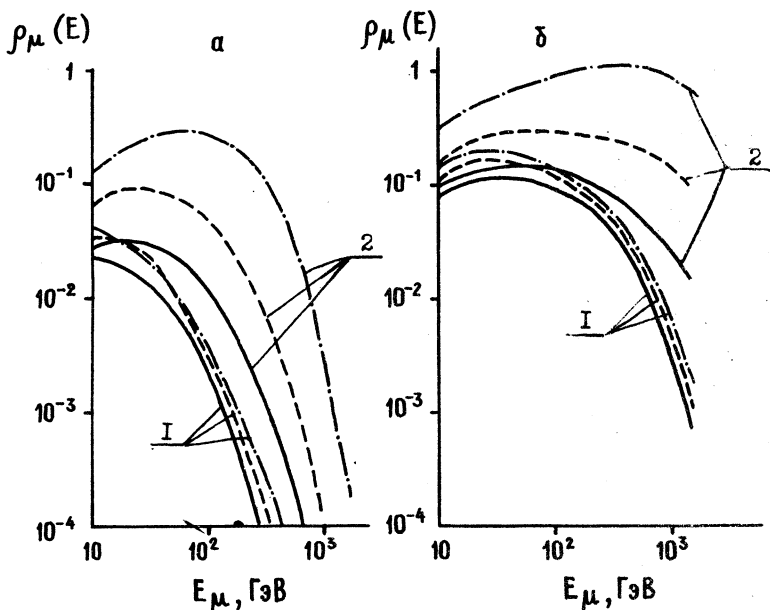


Р и с. 1. Дифференциальный энергетический спектр мюонов в ШАЛ на расстояниях 64 - 128 м от оси ливня: — скейлинг, - - - модель СКР, -.- модель высокой множественности; 1 - "молодые" ливни, 2 - "старые" ливни

проявлением различия пространственного распределения мюонов в разных моделях при выходе за пределы тех расстояний от оси, которые приблизительно соответствуют среднему расхождению мюонов рассматриваемого диапазона энергий. Из рис. 2б видно, что различные модели дают одинаковый наклон спектров в "старых" ливнях в интервале $E_\mu = 100 \div 1000$ ГэВ при $R = 2 - 4$ м и также сильно отличаются от наклона спектров в "молодых" ливнях.

Введенная выше классификация ливней по возрасту с использованием плотности мюонов на заданном расстоянии от оси $\rho_\mu(R)$ вмес-

то полного числа мюонов N_μ соответствует возможностям существования установок, в которых N_μ определяется по плотности мюонов $\rho_\mu(R)$ на заданном расстоянии от оси с использованием усредненной



Р и с. 2. Дифференциальный энергетический спектр мюонов в ШАЛ на расстояниях 16 - 32 м (а) и 2 - 4 м (б) от оси ШАЛ. Обозначения те же, что на рис. 1

функции пространственного распределения мюонов. Ввиду наличия корреляции между долей ρ_μ/N_e и функцией пространственного распределения мюонов, отбор больших и малых ρ_μ/N_e на рассматриваемых расстояниях от оси ливня в принципе не означает такого резкого разделения "старых" и "молодых" ливней, как в случае отбора по N_μ/N_e . Однако, как видно из рисунков, несмотря на это обстоятельство, спектры в "старых" и "молодых" ливнях (определяемые через ρ_μ/N_e) все равно сильно отличаются. Если аномальная генерация мюонов наступает в районе энергии унитарного предела $\sim 10^{14}$ эВ,

то рассматриваемый метод должен быть нацелен на изучение энергетического спектра в ШАЛ относительно большой первичной энергии ($E \approx 10^{16}$ эВ), так как только в таких ШАЛ можно ожидать проявления новых процессов при энергиях адронов более 10^{14} эВ в выборке из "молодых" атмосферных ливней. Отметим, что практическая возможность исследования ШАЛ с числом частиц на уровне моря до $N_e \approx 10^6$ ($E_0 \approx 10^{16}$ эВ) с использованием магнитного спектрометра обычной светосилы была продемонстрирована в работе /5/.

Чувствительность метода может быть улучшена, если дополнить его определением высоты H генерации мюонов с энергией $10 - 100$ ГэВ. Для этой цели можно использовать измерение времени задержки мюона τ относительно ливневого фронта. Для мюонов рассматриваемых энергий задержка в основном определяется геометрией проходимого мюонами пути. Поэтому при $H \gg R$ $\tau = R^2/2hc$, что при $R = 30$ м и $H = 10R$ составляет 5 нс. При $H < R$ $\tau \approx R/c$, что составляет 100 нс.

Таким образом, имеется возможность определять высоту генерации мюонов независимо от их энергии, если эта высота соответствует прилежащим слоям атмосферы, то есть $H = R(1 \pm 10)$. Если измерения задержки комбинировать с измерением направления траектории мюона, для которой угол с осью $\sim 1/10$, то это позволит надежно фиксировать диапазон H , в котором происходит рождение мюона. С помощью магнитного спектрометра далее можно измерить энергетический спектр мюонов, рожденных в слоях атмосферы, прилежащих к уровню наблюдения.

Поступила в редакцию
11 ноября 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. Н. П. Ильина, Н. Н. Калмыков, Я. Олейничак и др., Ядерная физика, 18, 118 (1973).
2. P. R. Blake, H. Ferguson, W. F. Nash, J. Phys. A, 5, 125 (1972).
3. H. Shibata, T. Kaneko, S. Kishimoto, J. Phys. Soc. Japan, 29, 1427 (1970).

4. Г. Б. Христиансен, Г. В. Куликов, Ю. А. Фомин. Космическое излучение сверхвысокой энергии. Атомиздат, М., 1975 г.
5. S. M. Rozhdestvenskiy, V. A. Khrenov, G. B. Khristiansen et al. Proc. 14th Int. Conf. Cosmic Rays, Munchen, vol. 8, 2790 (1975).
6. J. Burger, E. Böhm, M. Suling, Proc. 14th Int. Conf. Cosmic Rays, Munchen, vol. 8, 2784 (1975).
7. Н. Н. Калмыков, Г. Б. Христиансен, Письма в ЖЭТФ, 21, 66 (1975).
8. N. N. Kalmykov, Yu. A. Fomin, G. B. Khristiansen, Proc. 13th Int. Conf. Cosmic Rays, Denver, vol. 4, 2633 (1973).