

УДК 539.171

ОЦЕНКА ВЫСОТЫ ГЕНЕРАЦИИ СЕМЕЙСТВА ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО РАСПАДУ π^0 -МЕЗОНОВ

В. И. Галкин, А. К. Манагадзе

(НИИЯФ)

E-mail: mng@decl.sinp.msu.ru

В работе изложен метод оценки высоты ядерного взаимодействия первичного протона с ядрами воздуха над детектором типа эмульсионной камеры. Реализация метода основана на модельных расчетах по коду CORSIKA.

Введение

Для изучения взаимодействий космических лучей (КЛ) особое значение имеет наблюдение семейств, т. е. генеалогически связанных групп частиц от одного или нескольких последовательных взаимодействий первичных частиц космических лучей. Каждое семейство можно подразделить на электромагнитную и адронную компоненты. Хотя электромагнитная компонента объединяет гамма-кванты (фотоны), электроны и позитроны, часто все частицы электромагнитной компоненты называют для простоты одним термином “гамма-кванты”.

Гамма-адронные воздушные семейства КЛ регистрируются в эмульсионных экспериментах на горах [1, 2] и в стратосфере [3, 4]. Интерес к определению высоты взаимодействия, породившего такое семейство, над установкой существует в обеих группах экспериментов. В случае экспериментов на горах эмульсионные камеры регистрируют результат развитого ядерно-электромагнитного каскада в атмосфере, включающего как ядерные, так и электромагнитные взаимодействия. В случае же размещения эмульсионных камер на борту стратосферного баллона-аэростата зарегистрированное семейство с высокой вероятностью является результатом одного ядерного взаимодействия, произошедшего в разреженном слое атмосферы (толщиной порядка 10 г/см^2) над камерой. Вероятность повторных электромагнитных взаимодействий для частиц семейства в этом случае также невелика. Таким образом, в качестве электромагнитной компоненты в случае одного ядерного взаимодействия камера регистрирует гамма-кванты от распада нейтральных мезонов (в основном, π^0 -мезонов). В связи с небольшим временем жизни π^0 -мезонов можно считать, что их распад произошел в точке самого ядерного взаимодействия. В этом случае, измерив энергии пары гамма-квантов E_i и E_j и расстояние на рентгеновской пленке в камере между ними L_{ij} , можно восстановить высоту взаимодействия H над установкой из известной формулы

$$m_{\pi^0} = \theta \sqrt{E_i E_j},$$

где $m_{\pi^0} = 135 \text{ МэВ}$ — масса π^0 -мезона, $\theta = L_{ij}/H$.

Проблема заключается в том, что в случае больших семейств с высокой множественностью трудно определить, какие именно гамма-кванты следует объединить в пары.

В настоящей статье разработана процедура такой оценки высоты взаимодействия над установкой на основе анализа искусственных семейств из модельных расчетов.

Расчеты

Для наигрывания искусственных семейств использовалась известная современная модель ядерного взаимодействия QGSJET [5, 6]. Эта модель базируется на теории кварк-глюонных струн и включает в себя генерацию полужестких струй. Ее предсказания хорошо согласуются с результатами экспериментов в КЛ при энергиях до 10^{20} эВ.

По программе CORSIKA/QGSJET наигрывались семейства от протона с первичной энергией $E_0 = 10^{16}$ эВ, которой соответствует образование событий с высокой множественностью при заданной пороговой энергии наблюдения для каждой вторичной частицы $E_{\text{thresh}} = 2 \text{ ТэВ}$.

Высота взаимодействия над установкой варьировалась от 50 м (или 0.09 г/см^2) до 1500 м (или 2.5 г/см^2). При падении на рентгеновскую эмульсию двух гамма-квантов на взаимном расстоянии меньше 0.2 мм они рассматривались как одна частица, так как столь близкие пятна потемнения не могут быть измерены в эксперименте отдельно. Но доля таких случаев невелика. Кроме того, задавался диапазон рассматриваемых взаимных расстояний между гамма-квантами (L_{ij}^{\min} , L_{ij}^{\max}).

В каждом искусственном семействе перебирались все возможные пары гамма-квантов, соответствующие вышеуказанным критериям, и для каждой пары определялась высота распада образовавшего их π^0 -мезона (т. е. возможная высота взаимодействия, образовавшего данное семейство). Далее строилось распределение по этим высотам, оно аппроксимировалось функцией лог-нормального распределения $p(x) = A \exp(-(\ln x - m)^2/\sigma^2)$, и оценка $\langle m \rangle$ параметра m принималась за H_{est} для рассматриваемого семейства.

Результаты

Для анализа средних зависимостей оцененной высоты взаимодействия от различных критериев отбора пар гамма-квантов были наиграны ансамбли из 100 искусственных событий от первичного протона для каждой истинной высоты взаимодействия над камерой. Параметр H_{est} получался здесь путем аппроксимации суммарного распределения по высотам всех возможных π^0 -мезонов и определения среднего в этом распределении. На рис. 1 представлена зависимость оцененной высоты взаимодействия H_{est} от минимального L_{ij}^{min} и максимального L_{ij}^{max} значений для диапазона взаимных расстояний между рассматриваемыми парами гамма-квантов в каждом ансамбле искусственных семейств. L_{ij}^{min} связан с разрешающей способностью детектора (рентгеновской пленки), и его конкретное значение выбиралось нами с запасом по разрешению, а L_{ij}^{max} не должно быть больше характерных размеров семейства, но должно лежать в такой области, где его небольшие изменения не приводили бы к большим ошибкам в оценке высоты H . Видно, что с увеличением верхнего значения рассматриваемого интервала расстояний оцененная высота вначале также растет и затем перестает изменяться. При этом "высота плато" на графиках сильно зависит не только от значения истинной высоты взаимодействия, но и от значения нижнего края рассматриваемого диапазона расстояний L_{ij}^{min} . В целом везде на рисунке значения H_{est}

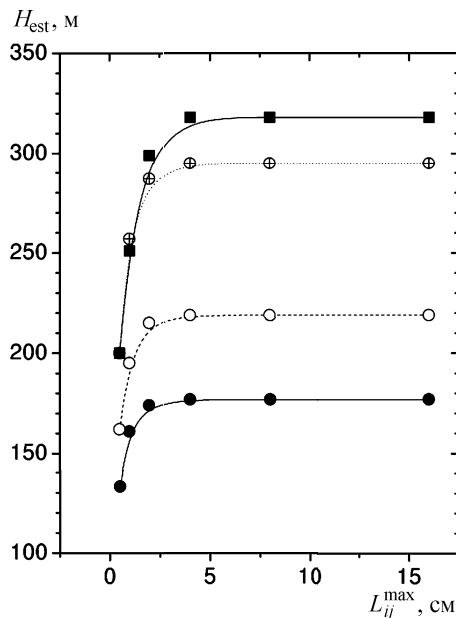


Рис. 1. Зависимость оцененной высоты взаимодействия H_{est} от минимального L_{ij}^{min} и максимального L_{ij}^{max} значений для диапазона взаимных расстояний между рассматриваемыми парами гамма-квантов в каждом ансамбле искусственных семейств. Семейства наиграны по модели QGSJET, по 100 событий для каждого набора параметров, первичная энергия $E_0 = 10^{16}$ эВ. Для $H_{\text{true}} = 100$ м: ● — $L_{ij}^{\text{min}} = 1$ мм, ○ — $L_{ij}^{\text{min}} = 2$ мм, ⊕ — $L_{ij}^{\text{min}} = 4$ мм, для $H_{\text{true}} = 200$ м: ■ — $L_{ij}^{\text{min}} = 1$ мм

отличаются от значений истинной высоты взаимодействия. Отсюда представляется разумным ввести коэффициент пересчета k , связывающий истинное и оцениваемое по распадам π^0 -мезонов значения высоты взаимодействия.

На рис. 2 представлена зависимость такого коэффициента $k = H_{\text{est}}/H_{\text{true}}$ от L_{ij}^{min} и L_{ij}^{max} (границ рассматриваемого диапазона расстояний) для разных высот взаимодействия. Из рис. 2 очевидно, что следует выбрать достаточно большой диапазон расстояний, где такая зависимость выходит на плато, определить из расчетов коэффициент пересчета k и применить его для определения истинной высоты взаимодействия. Такова идея предлагаемого нами метода установления высоты взаимодействия экспериментального суперсемейства.

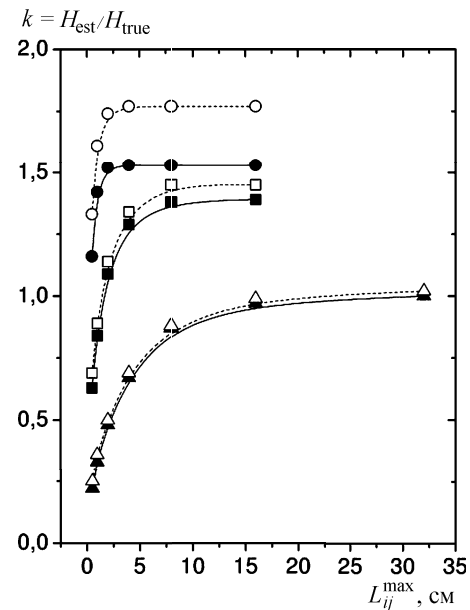


Рис. 2. Зависимость коэффициента $k = H_{\text{est}}/H_{\text{true}}$ от L_{ij}^{min} и L_{ij}^{max} (границ рассматриваемого диапазона расстояний) для разных высот взаимодействия H_{true} . Для $H_{\text{true}} = 100$ м: ● — $L_{ij}^{\text{min}} = 0.5$ мм, ○ — $L_{ij}^{\text{min}} = 1$ мм; для $H_{\text{true}} = 400$ м: ■ — $L_{ij}^{\text{min}} = 0.5$ мм, □ — $L_{ij}^{\text{min}} = 2$ мм; $H_{\text{true}} = 1500$ м: ▲ — $L_{ij}^{\text{min}} = 0.5$ мм, △ — $L_{ij}^{\text{min}} = 1$ мм. Семейства наиграны по модели QGSJET, по 100 событий для каждого набора параметров, первичная энергия $E_0 = 10^{16}$ эВ

В реальности распределения по высотам для индивидуальных семейств могут отличаться от средних. Следует рассмотреть, насколько в индивидуальных событиях могут быть сильны отклонения от средних расчетных зависимостей k .

На рис. 3 представлены распределения по оцененным высотам H_{est} для групп из 500 искусственных событий, наигранных каждая для фиксированной истинной высоты взаимодействия над установкой. Из рисунка видны возможные величины отклонений от средней $\langle H_{\text{est}} \rangle$, в целом эти распределения можно признать достаточно узкими.

На рис. 4, а дана зависимость коэффициента пересчета $\langle k \rangle = \langle H_{\text{est}} \rangle / H_{\text{true}}$ от истинной высоты

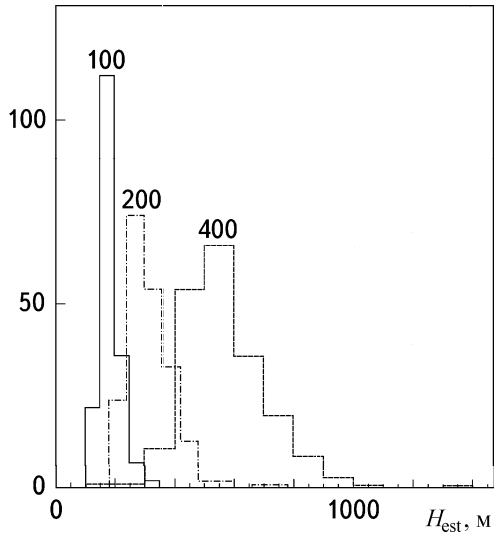


Рис. 3. Распределения по оцененным высотам H_{est} для трех групп из 500 искусственных событий каждая, наигранных для фиксированной истинной высоты взаимодействия над установкой (цифры у гистограмм — H_{true} в метрах)

взаимодействия, на рис. 4, б представлены средне-квадратичные отклонения этого коэффициента σ в таких же группах по 500 искусственных событий. Величины $\langle k \rangle$ и $\sigma(k)$ представлены для трех вариантов отбора семейств со множественностью гамма-квантов $n_\gamma > 20, 30$ и 50 . (При этом электромагнитные частицы, упавшие на пленку на расстоянии менее 200 мкм, считаются одним гамма-квантом.) Введение порога по числу гамма-квантов вызвано необходимостью получать достаточно хорошую аппроксимацию распределения по высоте взаимодействия. При малом числе гамма-квантов в индивидуальном событии получить такую аппроксимацию невозможно. Реально зарегистрированные суперсемейства имеют множественность гамма-квантов вы-

ше указанных пороговых значений. Из рис. 4 видно, что ход зависимости $\langle k \rangle$ от H_{true} не меняется для разных критериев n_γ^{thresh} , но величина $\sigma(k)$ гораздо меньше для $n_\gamma > 50$, поэтому такой критерий отбора и следует рекомендовать при оценке высоты образования суперсемейств нашим методом.

Заключение

Модельные расчеты по CORSIKA/QGSJET позволяют предложить метод оценки высоты ядерного взаимодействия в атмосфере над детектором, экспонированном на большой высоте (около 30 км, т. е. реально в стратосферных исследованиях):

- а) рассматриваются различные пары зарегистрированных гамма-квантов; каждой паре ставится в соответствие высота H в предположении, что оба гамма-кванта являются продуктами распада одного π^0 -мезона;
- б) строится распределение (гистограмма) по H в достаточно широком диапазоне высот;
- в) распределение аппроксимируется лог-нормальным законом, что дает значение H_{est} описанным выше способом;
- д) от H_{est} переходят к $H_{true} = H_{est}/k$, где k берется из модельных расчетов для условий, близких к экспериментальным.

Метод разработан практически для суперсемейств, каждое такое редкое событие в стратосфере представляет неоценимый источник информации о взаимодействии сверхвысокой энергии.

Статистическая ошибка оценки H_{true} оказывается при этом небольшой: 30–40% для диапазона высот 50–2000 м, ошибка существенно возрастает для высот менее 50 м, особенно для семейств с невысокой множественностью гамма-квантов.

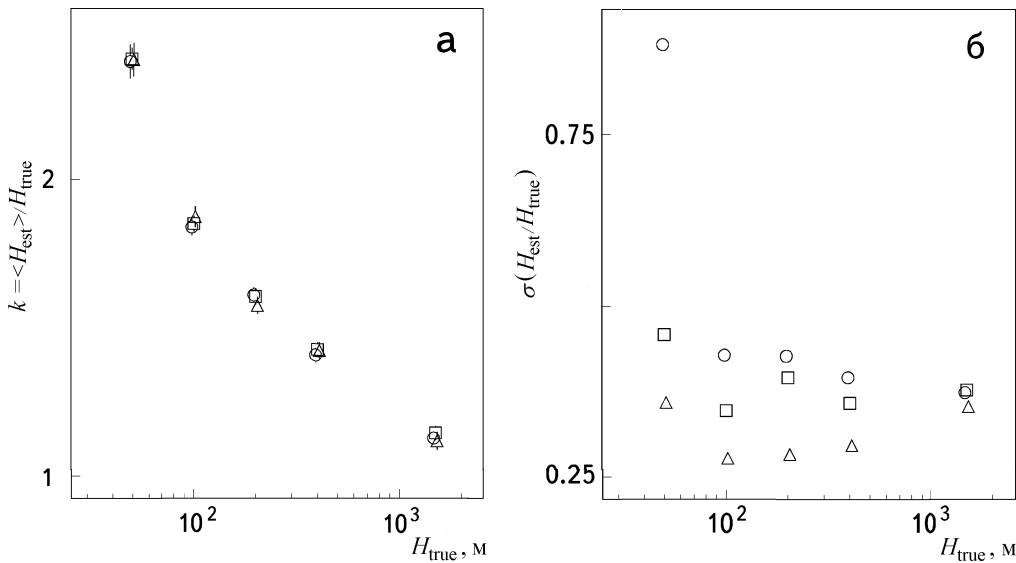


Рис. 4. Зависимость коэффициента пересчета $\langle k \rangle = H_{est}/H_{true}$ от истинной высоты взаимодействия (а) и средне-квадратичные отклонения этого коэффициента σ (б) при трех различных критериях отбора семейств: Δ — множественность $n_\gamma > 50$, \square — $n_\gamma > 30$, \circ — $n_\gamma > 20$

Для выяснения диапазона применимости данного метода нами были проведены расчеты для различных первичных ядер (от протона до железа) и разных E_0 (от 1 до 100 ПэВ) при высоте $H_0 = 1500$ м и количестве гамма-квантов в семействе не менее 30. Для малых энергий точности оценки N хуже, так как не столь много гамма-квантов остается над порогом регистрации в семействах малых энергий. Для суперсемейств доля событий, где определенная данным методом высота не отклоняется более чем на 30% (или 50%) от заложенной в расчет, составляет 0.67 (0.88) при $E_0 = 10$ ПэВ и 0.77 (0.94) при $E_0 = 100$ ПэВ для первичного протона, 0.62 (0.85) при $E_0 = 10$ ПэВ и 0.79 (0.94) при $E_0 = 100$ ПэВ для первичного углерода, 0.59 (0.83) при $E_0 = 10$ ПэВ и 0.76 (0.93) при $E_0 = 100$ ПэВ для первичного железа. Таким образом, видно, что точности не зависят сильно от типа ядра и немного растут с энергией, что вполне объяснимо количеством надпороговых частиц.

Для каждого конкретного эксперимента с другой геометрией или условиями регистрации следует провести свою соответствующую серию расчетов, для

сходных условий можно пользоваться результатами данной публикации.

Данная работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 03-02-16272 и НШ 1782.2003.2.

Литература

1. Pamir Collaboration, Japan-Brasil Collaboration, Fuji Collaboration, Japan Chinese Collaboration // Nucl. Phys. B. 1981. **191**. P. 1.
2. Ren J.R., Huo A.X., Lu L. et al. // Phys. Rev. D. 1988. **38**, N 5. P. 1404.
3. Osedlo V.I., Galkin V.I., Kopenkin V.V., Managadze A.K. et al. // Proc. 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg. 2001. **4**. P. 1426.
4. Galkin V.I., Kopenkin V.V., Managadze A.K. et al. // Ibid. P. 1407.
5. Калмыков Н.Н., Остапченко С.С. // Ядерная физика. 1993. **56**. С. 105.
6. Калмыков Н.Н., Остапченко С.С., Павлов А.И. // Изв. РАН. Сер. Физ. 1994. **58**, № 12. С. 21.

Поступила в редакцию
19.09.03