

УДК 537.591

## АДРОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ ПИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И КАСКАДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЕЩЕСТВЕ

Д. М. Подорожный, И. Д. Рапопорт, А. Н. Турундаевский  
(НИИЯФ)

E-mail: ant@eas.npi.msu.ru

**Исследовано влияние взаимодействий высокоэнергичных нейтральных пионов с веществом на характеристики адронных каскадов. Рассмотрены каскадные процессы в плотном веществе (в установках калориметрического типа) и в атмосфере.**

Изучение ядерной компоненты космических лучей высоких энергий часто связано с анализом каскадов, инициируемых этими частицами в веществе. На регистрации каскадов в веществе поглотителя основаны энергетические измерения с помощью ионизационных калориметров и толчковых установок [1–3]. При исследованиях космических лучей сверхвысоких энергий регистрируются каскадные процессы в атмосфере.

При анализе каскадных процессов следует обратить особое внимание на роль нейтральных пионов. Пионы (и заряженные, и нейтральные) составляют основную часть вторичных частиц, образующихся в ядерном каскаде. При этом электромагнитный каскад формируется преимущественно гамма-квантами, вылетающими после распада нейтральных пионов. Таким образом, для описания электромагнитной компоненты крайне важна информация о поведении нейтральных пионов.

Как известно, в силу изотопической инвариантности при адронных взаимодействиях высоких энергий рождается примерно равное число положительных, отрицательных и нейтральных пионов, однако время жизни нейтральных пионов существенно меньше, чем заряженных ( $0.87 \cdot 10^{-16}$  с и  $2.60 \cdot 10^{-8}$  с соответственно).

При моделировании широких атмосферных ливней адронные взаимодействия нейтральных пионов принимались во внимание в работе [4]. Однако при моделировании каскадных процессов пробег нейтральных пионов нередко принимается равным нулю: предполагается, что гамма-кванты вылетают из точки адронного взаимодействия.

Возникает вопрос о границах применимости такого приближения. Пробег частицы до распада в ультрарелятивистском случае пропорционален ее энергии. При этом пробег на адронном взаимодействии с ростом энергии слабо снижается. На рис. 1 показаны энергетические зависимости пробегов нейтральных пионов для распада, а также для неупругих взаимодействий в воздухе (при атмосферном давлении) и вольфраме. Сечения неупругих взаимодействий рассчитывались с использованием модели QGSJET [5, 6].

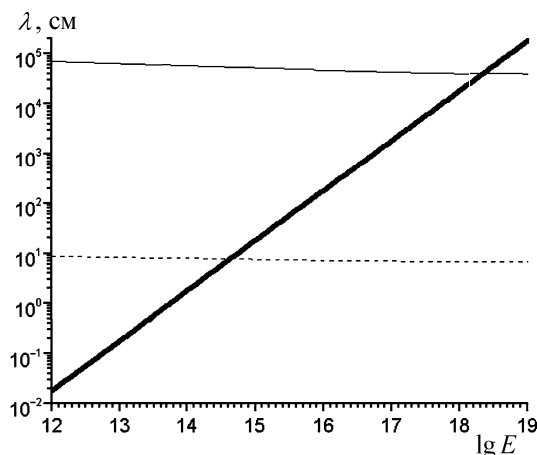


Рис. 1. Энергетическая зависимость пробегов распада и неупругого взаимодействия для нейтрального пиона (энергия в электронвольтах). Жирная сплошная линия — пробег распада, тонкая сплошная — пробег неупругого взаимодействия в воздухе, штриховая — пробег неупругого взаимодействия в вольфраме

Из рисунка видно, что при энергии  $4.3 \cdot 10^{14}$  эВ пробег для распада равен пробегу для взаимодействия в вольфраме (7.7 см), а при энергии  $2.2 \cdot 10^{18}$  эВ — пробегу для взаимодействия в воздухе на уровне моря (400 м).

Во взаимодействиях адронов с веществом рождаются пионы с различными энергиями. Адронные взаимодействия наиболее высокоэнергичных пионов снижают долю энергии, передаваемую в электромагнитный каскад. Обычно для описания неупругих взаимодействий используется такой параметр, как парциальный коэффициент неупругости  $K_\gamma$ . При моделировании адрон-протонного или адрон-ядерного взаимодействия эта величина определяется как отношение суммарной полной энергии образовавшихся  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов к кинетической энергии налетающей частицы (вклад других каналов в электромагнитную компоненту незначителен). До распада  $\pi^0$ -мезона его энергия не может дать вклад в электромагнитный каскад. В случае взаимодействия  $\pi^0$ -мезона с ядром поглотителя значительная часть энергии уходит в адронную компоненту, т. е. с точки зрения развития каскада нейтральные пионы ведут себя как заряженные.

Можно говорить о снижении эффективного парциального коэффициента неупругости  $K_\gamma$  для каскадов, инициированных частицами с энергией  $\sim 10^{16}$  эВ в плотном веществе и  $\sim 10^{19}$  в воздухе. На рис. 2 показана зависимость эффективного парциального коэффициента неупругости  $K_\gamma$  от расстояния до точки взаимодействия протона. Высокоэнергичный протон передает в электромагнитный каскад только часть энергии рожденных нейтральных пионов. При этом спектр гамма-квантов вблизи точки адронного взаимодействия более крутой. На рис. 3 приведены рассчитанные спектры гамма-квантов на расстоянии 1 мм от взаимодействия протона с энергией  $10^{17}$  эВ с вольфрамом и на большом расстоянии (после распада всех нейтральных пионов). Соответственно от расстояния до точки взаимодействия зависит и распределение по эффективному парциальному коэффициенту неупругости. Его пример приведен на рис. 4.

Суммарная величина эффекта сравнительно невелика. Но его влияние систематически возрастает при продвижении в область более высоких энергий. При продвижении толковых установок в область энергий  $\sim 10^{17}$  эВ необходимо учитывать реальное распределение точек образования квантов. В противном случае возможно систематическое занижение энергии на 10–15%, что ведет к кажущемуся уменьшению показателя спектра.

Еще одна область, где учет конечности времени жизни нейтрального пиона и его адронных взаимодействий может иметь значение, — горные эксперименты. При взаимодействии высокоэнергичной частицы в атмосфере могут рождаться лидирующие нейтральные пионы [7]. Если взаимодействие произошло на небольшой высоте над установкой, то такие частицы могут достигать аппаратуры, не распадаясь на гамма-кванты. Если в эксперименте одновременно регистрируются электромагнитная компонента (гамма-семейства) и заряженные адроны, то такое событие будет отличаться аномально низкой долей энергии, переданной в электромагнитную компоненту.

При энергии нейтрального пиона  $\sim 10^{20}$  эВ его пробег до распада составит  $\sim 20$  км. В этом случае необходимо учитывать влияние лидирующих нейтральных пионов на развитие широких атмосферных ливней. В широких атмосферных ливнях с лидирующими нейтральными пионами будет снижено отношение числа электронов к числу пионов.

Проведенный анализ позволяет определить круг задач, при решении которых необходим учет ненулевого пробега нейтральных пионов высоких энергий. Данный фактор следует принимать во внимание при выборе программ моделирования экспериментов. Программа-генератор адронных взаимодействий должна адекватно отражать выход лидирующих нейтральных пионов.

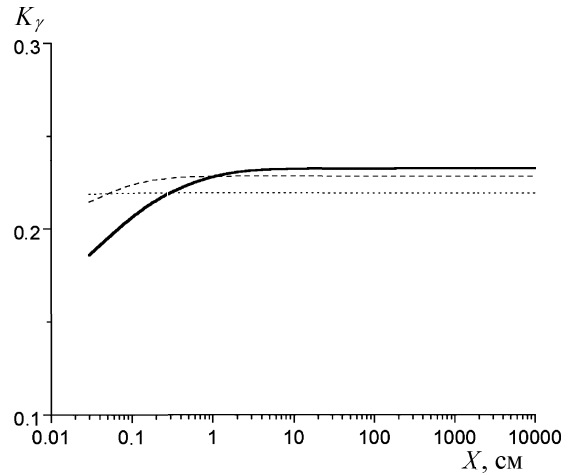


Рис. 2. Зависимость эффективного среднего парциального коэффициента неупругости  $K_\gamma$  от расстояния до точки адронного взаимодействия (pW). Точечная линия —  $10^{15}$  эВ, штриховая —  $10^{16}$  эВ, сплошная —  $10^{17}$  эВ

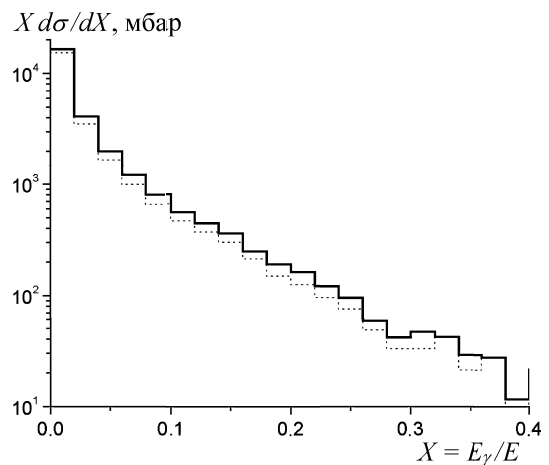


Рис. 3. Спектр  $\gamma$ -квантов вблизи точки взаимодействия pW (1 мм, точечная линия) и на удалении (сплошная)

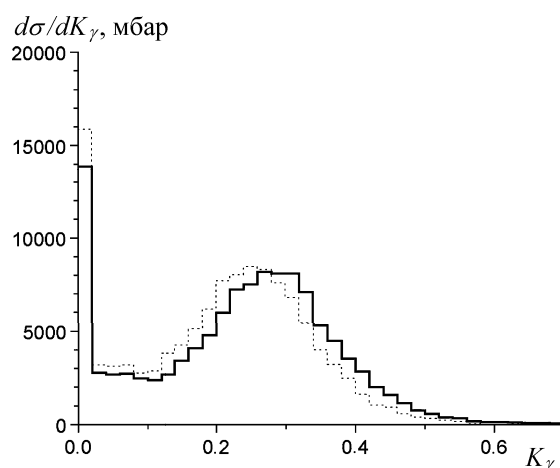


Рис. 4. Распределение по эффективному парциальному коэффициенту неупругости  $K_\gamma$  вблизи точки адронного взаимодействия и на удалении (обозначения см. на рис. 3)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-02-16781-а и 05-02-16783-а).

**Литература**

1. Григоров Н.Л., Мурзин В.С., Рапопорт И.Д. // ЖЭТФ. 1958. **34**, № 2. С. 506.
2. Иваненко И.П., Подорожный Д.М., Рапопорт И.Д. и др. Каскадная теория ливней. М., 1996. С. 102.
3. Guzik T.G., Adams J., Ampe J. et al. // Proc. 26 ICRC. **5**. P. 9. Salt Lake City, Utah, 1999.
4. Анохина А.М., Галкин В.И., Деденко Л.Г. и др. // Ядерная физика. 1998. **61**, № 2. С. 269.
5. Калмыков Н.Н., Остапченко С.С. // Препринт НИИЯФ МГУ № 98-36/537. 1998.
6. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B. 1997. **52**. P. 17.
7. Варданян И.Н., Лохтин И.П., Сарычева Л.И. и др. // Ядерная физика. 2005. **68**, № 2. С. 357.

Поступила в редакцию  
16.06.05