

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ СЕЧЕНИЯ АДРОН-ЯДРО И МНОЖЕСТВЕННОСТИ В РАМКАХ МОДЕЛИ НАРУШЕНИЯ СКЕЙЛИНГА ПРИ $x \lesssim 0,1$

И.Л.Иваненко, Б.Л.Каневский, Т.М.Рогонова

Показано, что большой набор экспериментальных данных, полученных в космических лучах, не противоречит наличию скейлинга в области фрагментации налетающего адрона, нарушению скейлинга в пионизационной области с $\langle n_{\text{пион}} \rangle \sim E^{0,4 \pm 0,5}$ и связанному с этим нарушением росту сечения $\sigma(E) = \sigma_0 (1 + \alpha_h \ln E)$ вплоть до $E \sim 10^6$ ТэВ.

Исследования зависимости от энергии сечения неупругого взаимодействия адронов на ускорителях при энергиях $20 \div 300$ ГэВ и в космических лучах до $E \sim 50$ ТэВ показывают, что при взаимодействии адронов с ядрами воздуха его можно представить в форме

$$\sigma_{hA}^{in}(E) = \sigma_{hA}^{o,in}(E_0) [1 + \alpha_h \ln(E/E_0)],$$

где $h - N, \pi^\pm, E_0 \sim 0,1$ ТэВ, $\alpha_h = 0,02 \div 0,05, \sigma_{NA}^{o,in}(E_0) = 273$ мбн. Считаем, что $\sigma_{NA}^{ih}(E) \approx 1,2 \sigma_{\pi A}^{in}(E)$ при $E \sim 1$ ТэВ и $\alpha_\pi/\alpha_N = \sigma_{NA}^{in}/\sigma_{\pi A}^{\pm A}$.

Рост сечения свяжем с нарушением скейлинга в пионизационной области. Представим инклюзивную функцию распределения $F_c(x, E^*)$ в виде суммы скейлинговой $F_c^{СК}$ и нескейлинговой $F_c^{НСК}$ частей (E^* - энергия в системе центра инерции) $F_c(x, E^*) = F_c^{СК}(x) + F_c^{НСК}(x, E^*)$, где

$$F_c^{НСК}(x, E^*)/\sigma_{hA}^{o,in} = \begin{cases} \eta \{2 \ln E^*/E_0^*\} \delta(x^2 + 4 \langle m_\perp^2 \rangle / E^{*2}) - \beta & \text{при } x < x_0 \\ 0 & \text{при } x > x_0 \end{cases}$$

Здесь $\beta \leq 0,5$, $x_0 \approx 0,1$, $\langle n_\pi \rangle \approx 0,4$ ГэВ — поперечная масса пиона, $\delta = 0$ при $\beta = 0,5$ и $\delta = 1$ при $\beta < 0,5$, c — канал реакции $h + A \rightarrow c + X$. Используя инклюзивные правила сумм и считая, что в центральной области $F_{\pi^+}(x, E^*) = F_{\pi^0}(x, E^*)$ получим, что $\eta = 2\alpha_h/3$ при $\delta = 0$ и

равно $0,33 \alpha_h (1 - 2\beta) x_0^2 \beta^{-1}$ при $\delta = 1$. Множественность $\langle n_{\text{пион}} \rangle$ частиц в области пионизации в переднем конусе, связанная с ростом сечения, пропорциональна $E^{0,5}$ при $\delta = 0$ и $\beta = 0,5$ и $\sim \ln(E/E_0) E^\beta$ при $\delta = 1$ и $\beta < 0,5$. Вторичные мезоны, возникающие за счет нескейлинговых процессов, получают энергию $\Delta(E^*) = 2\alpha_h \ln(E^*/E_0^*) / (1 + 2\alpha_h \ln E^*/E_0^*)$. Структурные функции для нелидирующих частиц скейлингового процесса выбираем в форме $F_{N\pi}^{\text{CK}}(x) = A_{N\pi} (1-x) \exp(-B_{N\pi} x)$, где $A_{N\pi} = 1,2$; $B_N = 5,56$ и $B_\pi = 4,76$ для процессов $N(\pi^\pm) + A \rightarrow \pi^{\pm,0} + X$, соответственно. Предполагаем, что при столкновении адронов с ядрами структурная функция для лидирующих частиц не меняется. Это приводит к уменьшению доли энергии лидирующей частицы примерно на 50% при 10^6 ГэВ. Процесс перезарядки $\pi^\pm \rightarrow \pi^0$ отдельно не рассматриваем. Для описания взаимодействия ядер космических лучей принимаем модификацию модели независимых столкновений [1]. В [2–6] были рассчитаны характеристики одиночных мюонов, адронов и γ -квантов и их семейств по моделям с ростом сечения за счет нарушения скейлинга в области пионизации. Во всех этих работах было существенно поведение $f(x)$ только во фрагментационной области.

С использованием аналитического метода решений уравнений, описанного в [5], были рассчитаны абсолютные интенсивности и энергетические спектры γ -квантов и адронов в интервале глубин $20 \lesssim z \lesssim 750$ г/см² и энергий $1 \lesssim E \lesssim 10^2$ ТэВ. Результаты расчетов при $\alpha_N = 0,03$ совпадают с экспериментальными данными [7, 8] в пределах ошибок. Пробеги поглощения $\lambda_{\gamma, \text{эксп}} = 95 \pm 5$ г/см² и $\lambda_{h, \text{эксп}} = 100 \pm 10$ г/см² для частиц энергий $\sim 3 \div 10$ ТэВ при $\alpha_N = 0,03$ совпадают с расчетами. Рассчитанные спектры мюонов на уровне моря в интервале энергий $1 \div 70$ ТэВ при $\alpha_N = 0,93$ совпадают с экспериментом [9].

Спектры γ -семейств по ΣE_γ при $200 \lesssim z \lesssim 700$ г/см² и энергетические спектры γ -квантов в семействах с заданным ΣE_γ на уровне гор, рассчитанные при $\alpha_N = 0,03$, согласуются с экспериментом [10]. Распределение γ -семейств по числу частиц в них с энергиями больше 2 ТэВ на глубине $z = 550$ г/см² также согласуется с экспериментом при $\alpha_N = 0,03$. Пробег поглощения γ -семейств с энергией $\Sigma E_\gamma \sim 50$ ТэВ на глубине $z \sim 500$ г/см² $\lambda_{\text{эксп}} = 90 \div 100$ г/см² и в интервале глубин $225 \lesssim z \lesssim 700$ г/см² $\lambda_{\text{эксп}} = 103 \pm 15$ г/см², рассчитанные значения $\lambda_{\text{расч}}$ при $\alpha_N = 0,03$ равны 96 и 105 г/см², соответственно, тогда как при $\alpha_N = 0$ они равны 155 и 160 г/см². В [3] и [11], выполненных методом Монте-Карло с учетом флуктуаций, при $225 \lesssim z \lesssim 700$ г/см² $\lambda_{\text{расч}}$ при $\alpha \approx 0,03$ и $\alpha = 0$ равны, соответственно, 104 и 155 г/см².

Каскадные кривые для полного числа электронов N_e широкого атмосферного ливня, с энергией E до $\sim 10^6$ ТэВ в интервале глубин z $500 \div 1000$ г/см² [12] и $200 \div 500$ г/см² [13] согласуются с расчетом при $\alpha_N = 0,03$ и $\langle n_{\text{пион}} \rangle \sim E^{0,5}$. При этом же выборе параметров согласуются с расчетами и экспериментальные данные $\lg J(N_e \lg J(N_e > 10^6))$

[13]. Экспериментальные зависимости числа мюонов с энергией свыше 10 ГэВ от числа электронов N_e на уровне моря [14] и зависимости числа адронов N_H с энергией свыше $1 + 8$ ТэВ от числа электронов на высоте гор [14] согласуются с расчетами при $\alpha_N = 0,03 \div 0,05$ и $\langle n_{\text{пион}} \rangle \sim E^{0,4 \pm 0,5}$. При тех же значениях параметров согласуются с расчетами вплоть до $E \sim 4 \cdot 10^6$ ТэВ измеренные по черенковскому свету для ливней на уровне моря отношения E/N_e и $Q_{\text{чер}}/N_e$ ($Q_{\text{чер}}$ — интеграл черенковского света) [15].

Проведенный анализ показывает, что одиночная компонента космических лучей и семейства γ -квантов на глубинах свыше 200 г/см² чувствительны к интегральным характеристикам структурной функции во фрагментационной области в зависимости сечения от энергии, тогда как форма каскадной кривой широких атмосферных ливней, их высотная зависимость, число адронов и мюонов в ливне, данные по черенковскому свету, кроме того, чувствительны к поведению структурной функции в пионизационной области. Экспериментальные данные вплоть до энергий $E \sim 4 \cdot 10^6$ ТэВ не противоречат предсказанию, полученному в [16] Логуновым с сотрудниками о росте множественности в пионизационной области $\langle n_{\text{пион}} \rangle \sim E^{0,4 \pm 0,5}$.

Авторы благодарны Н.Л.Григорову, С.Н.Вернову, Г.Т.Зацепину, Е.Л.Фейнбергу за стимулирующие дискуссии, С.С.Герштейну, С.А.Славятинскому и Г.Б.Христиансену за обсуждение результатов работы, Р.А.Антонову и В.В.Макарову за помощь в обработке и обсуждении данных по широким атмосферным ливням.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
20 сентября 1978 г.

Литература

- [1] Г.Б.Христиансен и др. Космическое излучение при сверхвысоких энергиях. М., Атомиздат, 1975.
- [2] А.М.Дунаевский. Препринт ФИАН, №150, 1975; A.M.Dunaevski et al. Proc. 14 ICRC, 7, 2562, 1975; Proc. 15 ICRC, 7, 337, 1977; Zeszyty Naukowe Univ. lodzkiego, 199, 1977; J.Wrotnijak et al. Zeszyty Naukowe Univ. lodzkiego, 165, 1977.
- [3] V.A.Astafiev et al. Proc. 15 ICRC, 7, 304, 1977; Zeszyty Naukowe Univ. lodzkiego, 289, 1977.
- [4] Н.Л.Григоров. ЯФ, 25, 788, 1977.
- [5] I.P.Ivanenko et al. Proc. 15 ICRC, 7, 441, 1977.
- [6] K.Kasahara. CRL-Report-62-78-6, Cosmic Ray Laboratory Univ. Tokio, 1978.

- [7] M.Akashi et al. Proc. 14 ICRC, 7, 549, 1975; Proc. 15 ICRC, 7, 430, 1977.
- [8] Н.Л.Григоров и др. Частицы высоких энергий в космических лучах. М., изд. Наука, 1973.
- [9] K.Kasahara, Y.Takahashi. Prog. Theor. Phys., 55, 1896, 1976.
- [10] Experiment "PAMIR-1", Proc. 15 ICRC, 7, 226, 1977; E.A.Kanevskaya. Proc. 15 ICRC, 7, 436, 1977; E.Konishi et al. Prog. Theor. Phys., 56, 1845, 1976.
- [11] В.К.Будилов. Диссертация ФИАН, 1977.
- [12] Japan-Brasil Emuls. Collab. Can. J. of Phys., 46, 5660, 1968; T.K.Gaisser. Prospects for Strong Interaction Phys. at ISABELLE, 107, 108, 1977.
- [13] Р.А.Антонов, И.П.Иваненко. ЯФ, 19, 869, 1974.
- [14] G.B.Khristiansen et al. Zeszyty Naukowe Univ. Iodzkiego, 226, 1977.
- [15] Характеристики ШАЛ космических лучей сверхвысоких энергий, Изд. Якутского филиала СО АН СССР, 1976.
- [16] V.V.Ezela, A.A.Logunov et al. Preprint IHEP-72-1, Serphukov, 1971; M.Cheng, T.T.Wu. Phys. Lett., B45, 367, 1973.
-