

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ЭНЕРГИИ СРЕДНЕЙ МНОЖЕСТВЕННОСТИ ЧАСТИЦ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АДРОН-АДРОН ДО ЭНЕРГИЙ $\sim 10^{16}$ ЭВ

Р.А.Антонов, И.П.Иваненко, Т.М.Роганова

Приводится зависимость от энергии множественности заряженных частиц, генерируемых во взаимодействиях адрон-адрон в области энергий до $\sim 10^{16}$ эВ, полученная на основании анализа большой совокупности экспериментальных данных о космическом излучении в атмосфере.

Расчеты поведения многих компонент космических лучей на разных глубинах атмосферы — интенсивности и спектров одиночных γ -квантов и адронов, характеристик их семейств, высотного хода широких атмосферных ливней (ШАЛ) и характеристик их электронной, адронной, мюонной компонент и черенковского света с учетом имеющихся ускорительных данных об инклюзивных сечениях $^{1-5}$ показали возможность с единой точки зрения описать характеристики широкого набора экспериментальных данных при обычных характеристиках спек-

тра первичных космических лучей ⁶ или спектра с допустимым обогащением тяжелыми ядрами ⁷. Зависимость сечения неупругого взаимодействия от энергии принималась в форме

$$\sigma_{NA}^{in} (E) = \sigma_{NA}^{0,in} (E_0) [1 + a_h \cdot \ln (E/E_0)] , \quad (1)$$

где

$$h - N, \pi^\pm; E \cong 0,1 \text{ ТэВ}; a_N \cong 0,03 \div 0,05; a_{\pi^\pm} / a_N = \sigma_{NA}^{0,in} / \sigma_{\pi^\pm A}^{0,in}$$

$a_h = 0$ — соответствует скейлингу с постоянным сечением взаимодействия. Зависимость множественности частиц, генерируемых в пионизационной области от квадрата полной энергии в СЦИ (S) варьировалась в пределах от $\ln^2 S$ до S^β , где $\beta \leq 0,5$. Принималось $n = n^{sc} + n^{Nsc}$ где

$$n_{\pi^\pm}^{sc} (S) = 2,4 \ln (S/S_1) / (1 + a_h \ln (S/S_0)), S_1 \cong 10 \text{ ГэВ}^2, S_0 \cong 160 \text{ ГэВ}^2, \quad (2)$$

$$n_{\pi^\pm}^{Nsc} (S) = 4\eta \frac{\pi}{2} \frac{S^\beta}{2 < m_\perp >} \left/ (1 + a_h \ln (S/S_0)) \right., < m_\perp > = 0,4 \text{ ГэВ}; \eta = \frac{2}{3} a_h \quad (3)$$

при $\beta = 0,5$

или

$$n_{\pi^\pm}^{Nsc} (S) = 4\eta \frac{\ln (S/S_0)}{1 + a_h \ln (S/S_0)} \frac{S^\beta}{(2 < m_\perp >)^{2\beta}} \frac{1}{2} \frac{\Gamma (1/2) \Gamma (\beta)}{\Gamma (1/2 + \beta)}, \quad (4)$$

где $\eta \cong \frac{a_h (1 - 2\beta)}{3x_0^{1-2\beta}}$, $x_0 \cong 0,1$, Γ — гамма-функция, при $\beta \lesssim 0,4$.

Анализ экспериментальных данных показал, что наиболее чувствительны к закону изменения множественности с энергией (степени дробления энергии) характеристики ШАЛ в начальной стадии их развития. В серии экспериментов, выполненных на уникальных установках поднимавшихся на самолете ⁸ и высотных аэростатах ⁹⁻¹¹ получены подробные данные вплоть до высот ~ 12 км о высотном ходе ливней, положении максимума их развития в атмосфере, форме функции пространственного распределения (ФПР) частиц и форме спектров ШАЛ по числу частиц.

Для анализа ФПР частиц и более корректного учета влияния флуктуаций были проведены расчеты трехмерного развития ШАЛ в атмосфере методом Монте-Карло ¹².

Сформулируем основные выводы полученные в результате сопоставления этих расчетов с экспериментом.

1) Измеренная на глубинах $210 \div 230 \text{ гсм}^{-2}$ интенсивность потока ШАЛ с числом частиц свыше 10^6 ~ на шесть порядков превышает рассчитанную в предположении справедливости скейлинга с постоянным сечением и первичного излучения ⁶; ~ в десять раз превышает рассчитанную при скейлинге с постоянным сечением, в предположении, что первичное излучение состоит из одних ядер железа; совпадает с рассчитанной в предположении $a_N \cong 0,05$ и $\beta \cong 0,4 \div 0,5$ при первичном излучении ⁶.

2) Измеренная разными методами с помощью нескольких установок величина показателя интегрального спектра ШАЛ по числу частиц (κ), практически, не изменяется с высотой уровня наблюдения и равна $\kappa \cong 1,6 \pm 0,1$ вплоть до глубин $\sim 200 \text{ гсм}^2$. Эта величина κ согласуется с расчетом для $a_N \cong 0,05$ и $\beta \cong 0,4 \div 0,5$ для первичных протонов. Расчетная величина κ при $a = 0$ равна $\kappa = 4,0$ для первичных протонов и равна $\kappa = 3,0$ для первичных ядер железа.

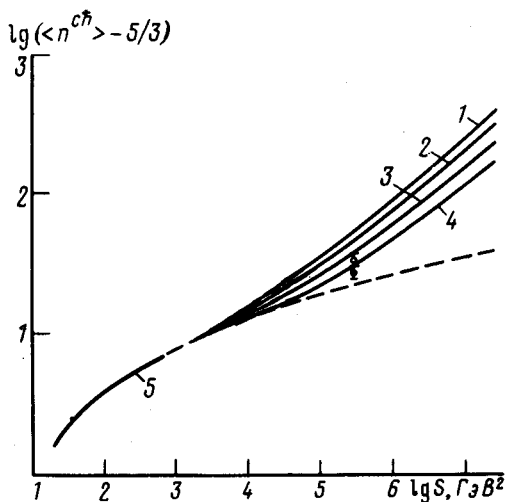
3) Измеренная на эксперименте на глубине атмосферы $\sim 250 \text{ гсм}^{-2}$ ФПР частиц на расстояниях от оси ШАЛ $\lesssim 15$ м аппроксимируется зависимостью r^{-n} при $n = 0,73 \pm 0,05$. ФПР вычисленная для первичных протонов при $a_h = 0$ соответствует $n = 1,3$. Для первичных

ядер железа $n = 1,0$. В настоящее время проводятся расчеты для первичных протонов при $a_N \cong 0,05$ при различном виде распределений по поперечным и продольным импульсам генерируемых частиц. Тот факт, что измеренная на эксперименте ФПР совпадает с рассчитанной в работе ¹⁶ для первичных протонов взаимодействующих по модели высокой множественности при величине среднего поперечного импульса $\langle p_{\perp} \rangle = 0,4$ ГэВ/с показывает, что в рамках рассматриваемой модели (в которой множественность генерируемых частиц при энергиях $\gtrsim 10^{15}$ эВ в несколько раз меньше, чем в модели высокой множественности) для достижения согласия необходимо предположить, что величина $\langle p_{\perp} \rangle$ возрастает с ростом энергии взаимодействующих частиц в несколько раз.

4) Измеренная на эксперименте глубина максимума развития ШАЛ с числом частиц в максимуме $N = 10^6$ составляет 450 ± 30 гсм⁻², что совпадает с величиной, полученной в последнее время по измерению формы черенковского импульса на разных установках. Это значение противоречит расчетному для первичного протона и $a_n = 0$ и согласуется с расчетными при $a_N \cong 0,05$ и $\beta \cong 0,5$ и также при $a_n = 0$ для первичных ядер железа, как и некоторые другие характеристики ШАЛ ¹³.

Совокупность экспериментальных данных о характеристиках ШАЛ в верхней половине атмосферы не согласуется с результатами расчетов по рассматриваемой модели при допущении, что первичное излучение в области энергий $10^{15} \div 10^{16}$ эВ состоит, в основном, из тяжелых ядер ($A \cong 50$), и взаимодействие ядро-ядро, как и в области более низких энергий, описывается моделью независимых соударений.

Экспериментальные результаты согласуются с расчетами для спектра первичных космических лучей ⁶ при $a_n = 0,04 \div 0,05$ и $\beta \cong 0,4 \div 0,5$. На рисунке приведена зависимость $\lg n^{ch}$ от $\lg S$, пересчитанная из формул (2), (3) и (4) для соударения нуклон-нуклон.



Зависимость множественности генерируемых заряженных частиц от энергии взаимодействующих нуклонов. Расчетные кривые: 1 — $a_N = 0,05, \beta = 0,5$; 2 — $a_N = 0,03, \beta = 0,5$; 3 — $a_N = 0,05, \beta = 0,4$; 4 — $a_N = 0,03, \beta = 0,4$. Кривая 5 — ускорительные данные ¹⁵ и их экстраполяция (пунктир). \bullet — экспериментальные данные ¹⁹, \circ — по экспериментальным данным ²⁰

В последнее время появились и другие данные в космических лучах, требующие для своего объяснения сильного роста множественности генерируемых частиц с энергией ¹⁴. Все эти данные, качественно, находятся в согласии с теоретическими предсказаниями Логунова и др. ¹⁷ о возможности сильного роста множественности частиц генерируемых в пионизационной области и с проведенными на основе КХД расчетами ¹⁸.

Изучение с помощью ускорителей инклюзивных сечений и зависимости коэффициентов неупругости в области энергий (\sqrt{S}) 50 — 500 ГэВ позволило бы определить возможный механизм нарушения скейлинга, уточнить параметры модели и эффективно использовать ее в широком диапазоне энергий для анализа характеристик взаимодействий адрон-ядро и химсостава и спектра первичных космических лучей.

Литература

1. *Иваненко И.П., Каневский Б.Л., Рогонова Т.М.* Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 704; ЯФ, 1979, 29, 594; препринт ФИАН №001, М., 1979.
2. *Антонов Р.А., Деденко Л.Г., Иваненко И.П., Каневский Б.Л., Макаров В.В., Рогонова Т.М.* Изв. АН СССР сер. физ., 1980, 44, 557.
3. *Mukhamedshin R.A.* Proc. of 17-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1981, 5, 343; 1981, 5, 347.
4. *Makarov V.V., Galkin V.I., Hein L.A., Ivanenko I.P., Kanevsky B.L.* Proc. of 17-th Intern Cosmic Ray Conf., 1981, 5, 135.
5. *Lagutin A.A., Uchaikin V.V., Chernyaev G.V.* Proc. of 17-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1981, 6, 260.
6. *Никольский С.И.* Изв. АН СССР, сер. физ., 1975, 39, 1160.
7. *Juliusson E.* Proc. of 14-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1975, 8, 2689.
8. *Антонов Р.А., Иваненко И.П.* ЯФ, 1974, 19, 869.
9. *Antonov R.A., Astafiev V.A., Ivanenko I.P., Kopylova T.M.* Proc. of 15-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1977, 8, 137.
10. *Antonov R.A., Ivanenko I.P., Kuzmin V.A.* Proc. of 16-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1979, 9, 263.
11. *Antonov R.A., Kuzmin V.A., Fateeva I.M.* Proc. of 17-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1981, 6, 229.
12. *Antonov R.A., Ivanenko I.P., Kuzmin V.A.* Proc. of 17-th Intern. Cosmic Ray Conf., 1981, 6, 225.
13. *Gaisser T. et al.* Rev. Mod. Phys., 1978, 5, 859.
14. *Akashi M., Amenomori M., Konoshi E. et al.* ICR-Report 91-81-12 Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 1981.
15. *Thome W. et al.* Nucl. Phys., 1977, B129, 365.
16. *Калмыков Н.Н., Христиансен Г.Б.* ЯФ, 1975, 21, 757.
17. *Ezela V.V., Logunov A.A., Mestverishvili M.A.* Preprint IHEP 72-1, Serphukov, 1971.
18. *Грибов Л.В., Левин Е.М., Рыскин М.Г.* Физика высоких энергий (материалы 16 зимней школы ЛИЯФ) Ленинград, 1981, стр.3 – 25.
19. *Alpgard K. et al.* Phys. Lett., 1981, B107, 315.
20. *Arnison G. et al.* Phys. Lett., 1981, B107, 320.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
5 февраля 1982 г.
После переработки
8 апреля 1982 г.