

## О ВОЗМОЖНОМ ОБЪЯСНЕНИИ НАРУШЕНИЯ СКЕЙЛИНГА В АДРОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ БОЛЕЕ $10^3$ ТэВ

Н.Н.Калмыков, Г.Б.Христиансен

Показано, что теория надкритического померона с учетом аддитивной кварковой модели позволяет объяснить отклонение экспериментальных данных по широким атмосферным ливням от предсказаний модели скейлинга при энергиях более  $10^3$  ТэВ.

В недавних экспериментах, проведенных на  $p\bar{p}$ -коллайдере<sup>1,2</sup>, при эквивалентной энергии 155 ТэВ было подтверждено нарушение скейлинга в адронных взаимодействиях при сверхвысоких энергиях, предсказанное ранее на основании данных, полученных при изучении широких атмосферных ливней (ШАЛ) космических лучей<sup>3,4</sup>, а также в исследованиях с рентген-эмульсионными камерами (эксперимент "Тамир"<sup>5</sup>). В связи с появлением данных при энергии 155 ТэВ и планированием экспериментов при более высоких энергиях значительный интерес приобретает информация о характере адронных взаимодействий при энергии более  $10^3$  ТэВ по данным ШАЛ.

Экспериментальные данные по адрон-адронным взаимодействиям при энергиях  $ISR$  и при энергии  $p\bar{p}$ -коллайдера хорошо описываются в рамках теории надкритического померона (ТНП)<sup>6,7</sup>, т. е. померона, для которого значение траектории полюса Редже при  $t = 0$   $\alpha_P(0) = 1 + \Delta$ , где  $\Delta > 0$ . Значение  $\Delta$  может быть выбрано в пределах 0,07 – 0,09. ТНП позволяет находить как сечения взаимодействия, так и инклюзивные спектры генерированных частиц, что достаточно для расчета ядерно-каскадного процесса в ШАЛ.

Согласно ТНП нормированная структурная функция  $\rho(x) = (x \frac{d\sigma}{dx}) / \sigma_{in}$  в центральной области ( $x < 0,1$ ) растет с энергией, что обеспечивает отклонение от скейлинга в соответствии с данными коллайдера. В области фрагментации ( $x > 0,1$ ) при первичных энергиях  $10 - 10^5$  ТэВ с точностью не хуже 10% для  $\rho(x)$  имеет место скейлинг.

Для сравнения предсказаний ТНП с экспериментальными данными по ШАЛ необходимо предварительно учесть различие между взаимодействиями адрон-нуклон и адрон-ядро. Это различие прежде всего связано с величиной сечения и его зависимостью от энергии адрона. Результаты пересчета по методу Глаубера с учетом перерасеяний от сечения  $NN$ -взаимодействия, предсказываемого в ТНП, к сечению неупругого взаимодействия нуклонов в воздухе при энергии  $1 - 10^5$  ТэВ с процентной точностью описываются соотношением вида:

$$\sigma_{in} = \sigma_0 (1 + \alpha \ln(E/E_{\pi}))$$

где  $E$  – энергия адрона,  $E_{\pi} = 0,1$  ТэВ,  $\alpha$  составляет 0,04 – 0,05 (при  $\Delta = 0,07 - 0,09$  соответственно),  $\sigma_0$  равно 265 мб. Аналогичной формулой описывается и сечение взаимодействия пионов, но значение  $\alpha$  оказывается больше на 0,01. При  $E \sim E_{\pi}$  отношение сечений взаимодействия нуклонов и пионов составляет 1,3.

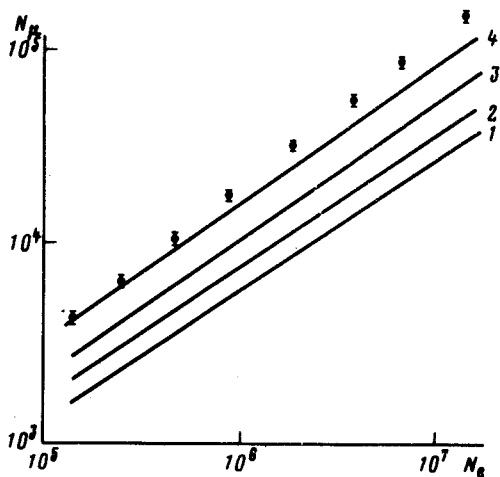


Рис. 1

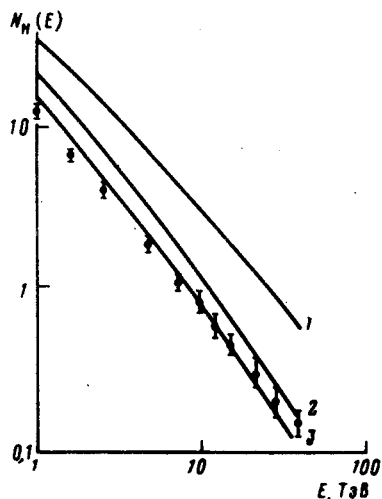


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость числа мюонов с энергией  $> 10$  ГэВ от числа электронов в ШАЛ на уровне моря: ● — экспериментальные данные <sup>10</sup>, 1 — результат расчета по модели скейлинга; 2, 3 и 4 — результаты расчета согласно ТНП; 2 — без учета АКМ, 3 — с учетом АКМ, 4 — с учетом АКМ и сложного химического состава первичного излучения.

Рис. 2. Энергетический спектр адронов на высоте гор в ливнях с  $N_e \approx 9 \cdot 10^5$ : ● — экспериментальные данные <sup>11</sup>; 1 — результат расчета по модели скейлинга, 2 и 3 — результаты расчета согласно ТНП без учета и с учетом АКМ соответственно.

Кроме того, существует различие нормированных структурных функций, описывающих взаимодействие адрон-нуклон и адрон-ядро. Это различие хорошо описывается в рамках аддитивной кварковой модели (АКМ) <sup>8</sup>. При энергиях несколько сотен ГэВ структурные функции не очень сильно отличаются друг от друга, но с ростом первичной энергии различие возрастает. Дело в том, что сечение взаимодействия составляющего кварка согласно АКМ принимается равным примерно 1/3 от сечения  $NV$ -взаимодействия и рост сечения  $NV$ -взаимодействия приводит к увеличению вероятности поглощения кварка в ядре и убыванию числа кварков-спектаторов с ростом энергии. В результате взаимодействия кварков происходит увеличение числа вторичных частиц в пионизационной области и их уменьшение во фрагментацион-

ной области. Расчет величины  $R(x) = \left( x \frac{d\sigma_{in}^{hA}}{dx} / \sigma_{in}^{hA} \right) / \left( x \frac{d\sigma_{in}^{hN}}{dx} / \sigma_{in}^{hN} \right)$  проводился в соответствии с <sup>9</sup>.

На рис. 1 и рис. 2 приведены результаты расчета основных компонент ШАЛ, выполненного в сформулированных выше предположениях. Различие между экспериментальной зависимостью числа мюонов  $N_\mu(E_\mu > 10 \text{ ГэВ})$  от числа электронов  $N_e$  на уровне моря, полученной в МГУ <sup>10</sup>, и расчетом для первичного протона (кривая 3 на рис. 1) устраняется при учете обычного химического состава первичного излучения <sup>11, 12</sup> (кривая 4 на рис. 1). Существенно, что каких-либо экстравагантных предположений относительно состава, характерных для попыток согласовать с экспериментом модель скейлинга, не требуется. Взаимодействие ядро-ядро при этом рассматривалось в рамках модели суперпозиции, обоснование которой можно найти в работах <sup>14, 15</sup>. Количество адронов высоких энергий в ШАЛ на высоте гор при изменении химического состава меняется очень слабо <sup>4</sup>. Экспериментальный спектр адронов на рис. 2 приведен согласно данным <sup>11</sup>, полученным на Тянь-Шане с помощью большого ионизационного калориметра.

Важной характеристикой ШАЛ является также глубина максимума ливня  $t_{max}$ . Экспериментальная величина  $t_{max}$  при  $E_0 \approx 10^3$  ТэВ составляет  $450 \pm 30$  г/см<sup>2</sup><sup>16</sup>, а при  $E_0 \approx 10^5$  ТэВ — от 630 до 680 г/см<sup>2</sup><sup>17</sup>. Расчетные значения  $t_{max}$  составляют (для первичных энергий  $10^3$  и  $10^5$  ТэВ) при чисто протонном составе 560 и 710 г/см<sup>2</sup>, а при смешанном — 510 — 660 г/см<sup>2</sup>. Таким образом расчет не противоречит эксперименту.

Отметим, что согласия с экспериментом не получается, если ограничившись ТНП, не учитывать предсказания АКМ (см. рис. 1 и рис. 2). Для достижения согласия требуется нарушение скейлинга не только при малых  $x$ , что дает ТНП, но и в области фрагментации, что имеет место при учете АКМ. Отметим также, что значительный эффект АКМ всецело связан с сильным ростом сечения неупругого взаимодействия согласно ТНП.

Таким образом, предсказания теории надкритического померона в сочетании с аддитивной кварковой моделью не противоречат экспериментальным данным по ШАЛ. Представляет интерес проверка этой теории в области первичных энергий вплоть до  $10^7$  ТэВ, где еще имеются данные о структуре ШАЛ.

Авторы глубоко благодарны академику С.Н.Вернову за постоянные стимулирующие обсуждения проблемы нарушения скейлинга.

Авторы благодарны А.Б.Кайдалову за полезные обсуждения, а также за возможность ознакомиться с результатами работ<sup>6, 7</sup>.

#### Литература

1. *Alpgard K. et al.* Phys. Lett., 1981, 107B, 310, 315.
2. *Arnison G. et al.* Phys. Lett., 1981, 107B, 320.
3. *Калмыков Н.Н., Христиансен Г.Б.* Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 595.
4. *Vernov S.N. et al.* J. Phys. G., 1977, 3, 1601.
5. *Славатинский С.А.* Материалы 7-го Европейского симпозиума по космическим лучам, стр. 37, Ленинград, 1980.
6. *Кайдалов А.Б.* Препринт ИТЭФ № 50, М., 1982.
7. *Кайдалов А.Б., Тер-Мартirosян К.А.* Препринт ИТЭФ № 51, М., 1982.
8. *Анисович В.В. и др.* ЯФ, 1978, 28, 1063.
9. *Николаев Н.Н.* УФН, 1981, 134, 369; *Nikolaev N.N., Ostapchuk A.Ya.* Preprint CERN, Ref. TH. 2575, 1978.
10. *Khristiansen G.B. et al.* 15 ICRC, Plovdiv, 1977, 8, 148.
11. *Nesterova N.M., Dubovy A.G.* 16 ICRC, Kyoto, 1979, 8, 345.
12. *Simon M. et al.* 16 ICRC, Kyoto, 1979, 1, 352.
13. *Фомин Ю.А., Христиансен Г.Б.* ЖЭТФ, 1964, 46, 2141.
14. *Деденко Л.Г., Зацепин Г.Т.* Труды Межд. конф. по косм. лучам, М., 1960, 2, 222.
15. *Шабельский Ю.М.* Препринт ЛИЯФ, № 464, Ленинград, 1979.
16. *Антонов Р.А. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 446.
17. *Inoue N et al.* 17 ICRC, Paris, 1981, 11, 270.

Московский  
государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
16 декабря 1982 г.

<sup>1)</sup> Предположив, что при изменении  $N_e$  от  $10^5$  до  $10^7$  происходит некоторое обогащение первичного состава тяжелыми ядрами, что легко получается, например, в рамках диффузионной модели происхождения космических лучей<sup>13</sup>, можно добиться согласия кривой 4 на рис. 1 с экспериментом вплоть до  $N_e \sim 10^7$ .