

НАРУШЕНИЕ МОДЕЛИ СКЕЙЛИНГА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ УСКОРИТЕЛЬНЫХ К СВЕРХВЫСОКИМ ЭНЕРГИЯМ

*Н.Н.Калмыков, Т.Г.Левина, Ю.А.Фомин,
Г.Б.Христиансен*

Анализируется вопрос о нарушении скейлинга в адронных взаимодействиях на основании экспериментальных данных, полученных в космических лучах, и дается оценка энергии, при которой это нарушение должно происходить.

Как было показано в работе [1], сопоставление экспериментальных данных по ШАЛ с расчетами, основанными на экстраполяции по Редже — Мюллеру модели скейлинга из области ускорительных на область сверхвысоких энергий, позволяет констатировать наличие резкого расхождения, из которого следует необходимость существенного изменения модели адронных взаимодействий в области сверхвысоких энергий по сравнению с моделью, получаемой из ускорительных данных. Вывод о нарушении скейлинга при $x > 0,05$ был сделан на основе анализа экспериментальных и расчетных зависимостей числа мюонов N_μ с энергией свыше 10 ГэВ от числа электронов N_l на уровне моря и числа адронов N_H с энергией свыше 1 ТэВ от числа электронов на высоте гор. В то время как экспериментальное число мюонов превышает теоретическое, расчетное число адронов оказывается существенно выше экспериментального. Это позволяет утверждать, что вывод о нарушении скейлинга не зависит от предположений относительно химического состава первичного космического излучения (см. [1]; более подробно этот вопрос рассмотрен в [2]).

В настоящее время имеется возможность указать еще одну группу экспериментальных данных по космическим лучам, свидетельствующих о нарушении скейлинга и позволяющих, что весьма важно, уточнить область энергий, в которой это нарушение должно происходить. Речь идет об изучении высотного хода семейств гамма-квантов. Нами было проведено сопоставление экспериментальных интегральных спектров семейств гамма-квантов [3] с результатами расчетов по модели скейлинга. Форма спектра и абсолютная интенсивность первичного излучения были взяты согласно работе [4]. При допущении обычного химического состава первичного излучения (50% протонов, 25% альфа-частиц, 13% ядер группы M ($A = 15$) и 12% ядер группы H ($A = 30$)) модель скейлинга согласуется с экспериментальными данными на глубине 225 г/см^2 , а на глубине 700 г/см^2 эта модель противоречит эксперименту. Таким образом, одна и та же модель не позволяет объяснить интенсивность семейств на обеих высотах.

Чтобы не обсуждать вопросов, связанных с абсолютной интенсивностью спектра первичного излучения, удобно перейти от абсолютной

интенсивности семейств к пробегу поглощения. Пробег поглощения семейств в модели скейлинга получается равным 170 ± 10 г/см², тогда как эксперимент дает пробег, равный 110 ± 10 г/см², что значительно ниже расчетного значения. Но если предположить, что на уровне 225 г/см² верна модель скейлинга, а на уровне 700 г/см² взять, например, модель типа СКР¹⁾, то расчетный пробег поглощения семейств будет равен экспериментальному. Не следует, конечно, делать заключение, что при энергиях порядка 10^{15} эВ происходит переход от модели скейлинга к модели СКР. Как показано в [2], модель СКР также противоречит данным по адронной компоненте ШАЛ на высоте гор. Приведенные результаты свидетельствуют лишь о нарушении модели скейлинга и позволяют приближенно оценить энергии, при которых это нарушение происходит. Физический смысл такого предположения связан с тем, что значения энергий адронов, дающих вклад в интенсивность данных семейств, существенно различны для глубин 225 и 700 г/см², и поэтому для разных глубин могут работать разные модели. Если рассматривать семейства с $\Sigma E_{\gamma} > 30$ ТэВ, то среднее значение энергии первичных частиц, дающих вклад в данные семейства, составляет; согласно модели скейлинга, $3 \cdot 10^{14}$ эВ на глубине 225 г/см² и $2 \cdot 10^{15}$ эВ на глубине 700 г/см². Таким образом, можно считать, что именно в этом энергетическом интервале происходит нарушение модели скейлинга.

Это нарушение должно затрагивать область фрагментации, так как изучение распределения значений переменной Фейнмана x , вносящих вклад в рассматриваемые семейства, показывает, что наиболее существенны значения x , относящиеся к области фрагментации. Так, для семейств с $\Sigma E_{\gamma} > 30$ ТэВ доля значений x , меньших 0,05, составляет всего 7%. Согласно расчету семейства образуются приблизительно с равной вероятностью как за счет pp , так и за счет πp -взаимодействий.

Исследование пробега поглощения одиночных γ -квантов приводит к тем же выводам, что и исследование пробега поглощения семейств. В рамках модели скейлинга пробег поглощения одиночных γ -квантов с энергией 3 – 10 ТэВ составляет 150 ± 10 г/см², тогда как эксперимент дает 110 ± 10 г/см² [5]. Энергия первичных частиц, ответственных за создание γ -квантов с такой энергией, составляет $(2-5) \cdot 10^{14}$ эВ на глубине 225 г/см² и $(1-2) \cdot 10^{15}$ эВ на глубине 700 г/см².

Говоря о том, каким образом происходит нарушение скейлинга, необходимо рассмотреть, нельзя ли свести нарушение скейлинга к росту сечения неупругого взаимодействия адронов с энергией. Как показали расчеты [1, 2], рост сечения, который следует из ускорительных данных, практически не меняет степени расхождения между рассчитанными и экспериментальными характеристиками ШАЛ. Поэтому нами был рассмотрен вариант расчета, где предполагалось, что, начиная

¹⁾ В этой модели $n_{\pi} \sim E_0^{1/4}$, а энергетический спектр вторичных пионов $dn_{\pi}^*/dE = (n_{\pi}^*/<E>) \exp(-E/<E>)$, где $<E> = kE_0/n_{\pi}$ (k – коэффициент неупругости).

с энергии E_{Π} , рост сечения происходит по закону

$$\sigma_{in}(E) = \sigma_{in}(E_{\Pi}) \ln^2 E / \ln^2 E_{\Pi}, \quad (1)$$

дающему предельно возможный по Фруассару рост сечения.

Экспериментальное значение показателя интегрального спектра одиночных адронов в интервале энергий 7 – 30 ТэВ составляет на высотах гор $1,8 \pm 0,2$ [6] (см. также работу [7]), тогда как модель скейлинга с ростом сечения (1) дает значение показателя $3,1 \pm 0,2$. Если обратиться к данным по ШАЛ, то оказывается, что энергетический спектр адронов ШАЛ на высоте гор, рассчитанный по модели скейлинга с использованием соотношения (1), согласуется с экспериментальными данными работы [8] при энергии адронов около 1 ТэВ, если принять, что значение $E_{\Pi} \approx 1$ ТэВ. Однако, при этом обнаруживается расхождение по форме спектра адронов, приводящее к тому, что уже при энергии 10 ТэВ результаты эксперимента превышают расчетные значения почти в пять раз. Таким образом, можно заключить, что необходимое изменение модели взаимодействия адронов нельзя свести к более резкому, чем это следует из ускорительных данных, росту сечения их неупругого взаимодействия.

Как было показано в работе [1], предположение о росте сечения генерации NN -пар не может обеспечить согласование эксперимента с расчетом. Такое предположение приводит к существенному увеличению числа мюонов малых энергий, но слабо меняет число мюонов с энергией ~ 100 ГэВ; между тем для мюонов с энергией ~ 100 ГэВ наблюдается такое же противоречие с экспериментом, как и для мюонов с энергией ~ 10 ГэВ. Нарушение зарядовой инвариантности в пользу π^{\pm} или π^0 -мезонов также не может снять отмеченные противоречия [2].

Предположение о возрастании коэффициента неупругости нуклона до единицы при энергиях $\sim 10^{15}$ эВ улучшает согласие по мюонной компоненте, но очень слабо влияет на число адронов высокой энергии на высоте гор (уменьшая его всего на 20 – 25%). Резкое изменение инклюзивного спектра вторичных частиц, сопровождающееся изменением зависимости множественности вторичных частиц от энергии первичной частицы, как показано в работе [2] на примере модели СКР ($n_{\pi} \sim E^{1/4}$) и модели с высокой множественностью ($n_{\pi} \sim E_0^{1/2}$), не устраняет противоречия по адронной компоненте на высоте гор.

Высказанное в работе [1] предположение о возможности роста сечения прямой генерации лептонов во взаимодействиях адронов позволяет устранить противоречие с данными по адронной компоненте на высоте гор, но для этого надо допустить, что уже при энергии адронов ~ 3 ТэВ значительная доля их энергии (десятки процентов) уходит в лептоны. Это трудно согласовать с данными по одиночной компоненте космических лучей²⁾

²⁾ В то же время надо отметить, что при энергиях $\sim 10^{17}$ эВ и выше, по-видимому, нельзя указать экспериментальных данных, которые находились бы в противоречии с предположением о постепенном вымирании адронного каскада.

В связи с этим необходимо, по-видимому, предполагать одновременное изменение целого ряда характеристик адронных взаимодействий, включая рост сечения неупругого взаимодействия адронов, изменение инклюзивных спектров вторичных частиц и рост сечения прямой генерации лептонов.

Институт ядерной физики
Московского
государственного университета

Поступила в редакцию
15 июня 1978 г.

Литература

- [1] Н.Н.Калмыков, Г.Б.Христиансен. Письма в ЖЭТФ, **23**, 595, 1976.
 - [2] S.N.Vernov, G.B.Khristiansen, A.T.Abrosimov et al. J. Phys. G., **3**, 1601, 1977.
 - [3] Е.А.Каневская, Ю. А.Сморodin, Л.Т.Барадзеи et al. Proc XV Internat. Conf. Cosm. Rays. Plovdiv, **7**, 436, 1977.
 - [4] S.N.Vernov, G.B.Khristiansen. Proc. X Internat. Conf. Cosm. Rays. Calgary, р.А, 345, 1967.
 - [5] Е.А.Каневская, Ю. А.Сморodin, Л.Т.Барадзеи et al. Proc XV Internat. Conf. Cosm. Rays, Plovdiv, **7**, 453, 1977.
 - [6] Ohta, K.Kasahara et al. Proc XII Internat. Conf. Cosm. Rays, Denver, **3**, 2250, 1973.
 - [7] Н.Л.Григоров. ЯФ, **25**, 788, 1977.
 - [8] В.А.Ромахин. Диссертация. М., ФИАН, 1976.
-