

НАРУШЕНИЕ МАСШТАБНОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ
В АДРОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Н.Н.Калмыков, Г.Б.Христиансен

На основании анализа экспериментальных данных по ШАЛ делается вывод о нарушении масштабной инвариантности в адронных взаимодействиях в области энергий $10^{15} - 10^{17}$ эв и анализируется вопрос о характере этих нарушений.

В настоящей работе дается анализ совокупности экспериментальных данных по ШАЛ в связи с вопросом о нарушении скейлинга в адронных взаимодействиях. В течение последних лет были хорошо установлены инклюзивные спектры вторичных частиц, рождающихся во взаимодействиях нуклонов и пионов с нуклонами, что позволяет с достаточной точностью рассчитывать различные характеристики ШАЛ и сопоставлять результаты расчетов с экспериментом.

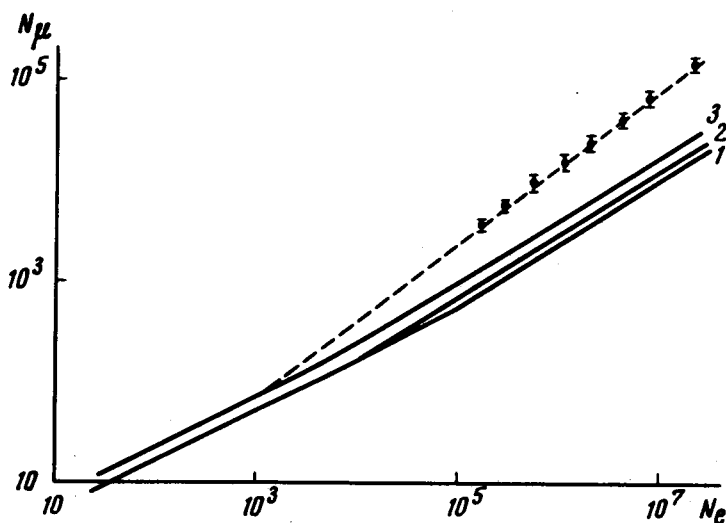


Рис. 1. Зависимость числа мюонов с энергией > 10 Гэв от N_e : — данные [3]; кривая 1 — сечения постоянны и соответствуют пробегам 80 и 120 г/см² для нуклонов и пионов соответственно, кривые 2 и 3 — сечения возрастают на 10% при росте энергии на порядок величины; кривые 1 и 2 — инклюзивные спектры соответствуют [2], кривая 3 — множественность увеличена в 1,5 раза за счет малых x

Наиболее хорошо изучены к настоящему времени электронная и мюонная компоненты ШАЛ, и именно на этих компонентах ШАЛ и следует в первую очередь проверить возможность экстраполяции модели скейлинга из области ускорительных энергий на область сверхвысоких энергий $10^{15} - 10^{17}$ эв [1, 2].

На рис. 1 представлена зависимость числа мюонов N_μ с энергией $> 10 \text{ Гэв}$ от числа электронов N_e в ШАЛ, генерированных первичными протонами. Зависимость $N_\mu(N_e)$ рассчитывалась в различных предположениях относительно сечения взаимодействия и вида структурных функций. Расчет показывает, что модель масштабной инвариантности даже с учетом довольно значительных вариаций характеристик элементарного акта резко противоречит как абсолютной величине N_μ , так и характеру зависимости $N_\mu \sim N_e^\alpha$ ($\alpha = 0,60$ согласно расчету, тогда как согласно эксперименту $\alpha = 0,78 \pm 0,01$). Из сравнения результатов расчета с экстраполирующей экспериментальных данных в область малых N_e и N_μ следует, что отклонения от скейлинга должны начаться при энергиях, которые примерно на порядок величины выше ускорительных, и стать значительными при энергиях $10^{14} - 10^{15} \text{ эв}$. Из этих данных еще нельзя сделать определенного заключения о нарушении скейлинга в области сверхвысоких энергий, поскольку в первичном излучении могут содержаться тяжелые ядра, учет которых может привести к увеличению отношения N_μ/N_e и несколько уменьшить расхождение с экспериментом. Как показывают расчеты, такую возможность нельзя полностью исключить, основываясь на существовании больших флуктуаций в числе мюонов при фиксированном числе электронов (или наоборот), хотя для одновременного существования увеличения отношения N_μ/N_e и получения флуктуаций необходимой величины необходимо предполагать крайне экзотический состав первичного излучения, с преобладанием в нем ядер более тяжелых, чем ядра железа.

$N_{\text{я.а.}} (> 1 \text{ Тэв})$

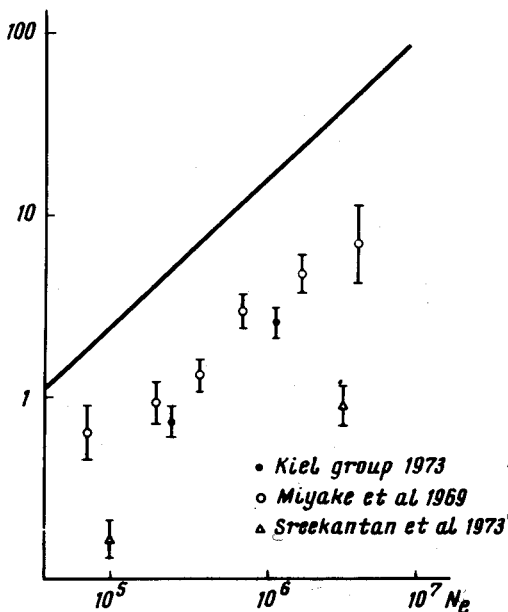


Рис. 2. Зависимость числа адронов с энергией $> 1 \text{ Тэв}$ от N_e на высоте гор: — расчет по модели скейлинга; экспериментальные данные приведены согласно работе [4]

Однако, проведенные нами расчеты показали, что значительное противоречие между моделью скейлинга и экспериментом наблюдается и при анализе экспериментальных данных по адронной компоненте ШАЛ в предположении, что первичными частицами являются протоны (см. рис. 2). Теоретическая зависимость числа адронов N_H с энерги-

ей > 1 Тэв от $N_e(N_H \sim N_e^\alpha)$ характеризуется показателем $\alpha = 0,95 \pm \pm 0,03$ (для меньших энергий значение α уменьшается). Существенно отметить два обстоятельства: во-первых, расхождение между моделью скейлинга и экспериментом имеет противоположный знак для мюонов и адронов, и, во-вторых, модельные зависимости как $N_\mu(N_e)$, так и $N_H(N_e)$ характеризуются показателем $\alpha < 1$. В то же время вся совокупность экспериментальных данных о взаимодействии нуклон-ядро и ядро-ядро, полученных как в космических лучах, так и на ускорителях, свидетельствует о крайне малой роли ($< 1\%$) коллективных эффектов в этих взаимодействиях. Поэтому взаимодействие ядер первичного излучения фактически сводится к их последовательной фрагментации. В этом случае, согласно [5], зависимость какой-либо характеристики ШАЛ при заданном N_e от массового числа ядра пропорциональна $A^{1-\alpha}$, если для первичного протона эта характеристика зависит от N_e как N_e^α .

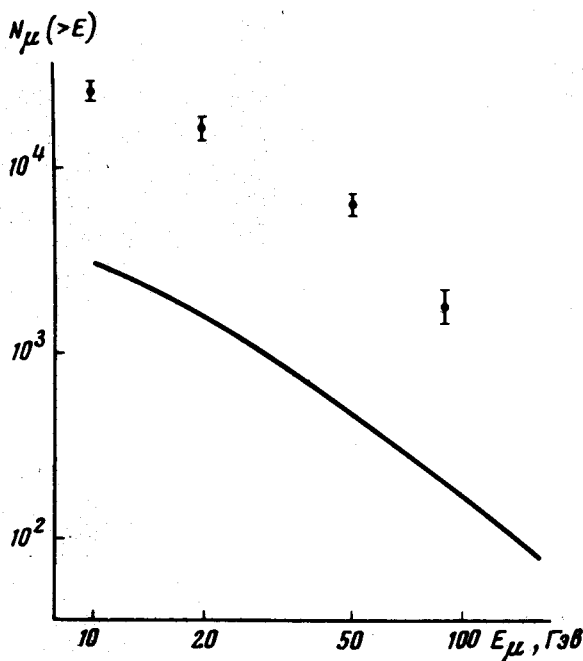


Рис. 3. Энергетический спектр мюонов в ШАЛ при $N_e = 10^6$: — расчет по модели скейлинга, — данные [7]

Таким образом, введение в первичное излучение тяжелых ядер хотя и может уменьшить расхождение эксперимента и расчета для мюонов за счет возрастания числа мюонов в ливне с заданным числом электронов, но в то же самое время приведет к увеличению расхождения по адронам, поскольку число последних также возрастет (напомним, что величина $\alpha < 1$ как для адронов, так и для мюонов). Этот аргумент является решающим в смысле исключения влияния произвольных предположений о химическом составе первичного излучения на надежность вывода о нарушении скейлинга.

Рассмотрим теперь, как следует изменить модель адронных взаимодействий в области сверхвысоких энергий по сравнению с моделью, получаемой из исследований на ускорителях.

Как известно, при ускорительных энергиях скейлинг даже в области фрагментации выполняется только для пионов и, в принципе, роль более тяжелых частиц с энергией может расти. Поскольку экспериментальные данные относятся к мюонам сравнительно малых энергий, то не имеет смысла проводить различия между вторичными пионами и каонами. Роль $N\bar{N}$ -пар исследована в работе [6], где показано, что хотя возрастание доли $N\bar{N}$ -пар среди вторичных частиц от 5 до 40% существенно (в два-три раза) увеличивает долю мюонов малых (< 10 Гэв) энергий, доля мюонов с энергией > 50 Гэв при этом меняется незначительно. В то же время, как видно из рис. 3, где приведены экспериментальные данные по энергетическому спектру мюонов в ШАЛ [7], противоречие с моделью скейлинга наблюдается вплоть до самых высоких энергий мюонов (~ 100 Гэв), изученных с помощью магнитного спектрометра. Таким образом, предположение о росте сечения генерации $N\bar{N}$ -пар (а также и гиперонов) не в состоянии привести к устранению противоречия между расчетом и экспериментом.

Энергия, при которой должно происходить сильное отклонение от модели скейлинга, соответствует энергии унитарного предела теории слабых взаимодействий ($10^{14} - 10^{15}$ эв), в связи с чем можно рассматривать такие экзотические возможности, как, например, нарушение зарядовой инвариантности или прямая генерация лептонов. Увеличение доли π^0 -мезонов по сравнению с обычной ($f_{\pi^0} = \frac{1}{2} (f_{\pi^+} + f_{\pi^-})$)

может привести к согласию по адронной компоненте ШАЛ, но при этом увеличится расхождение по мюонам. Таким образом, эта возможность исключается. Предположение о прямой генерации лептонов может улучшить согласие с адронной компонентой, но для получения согласия по доле мюонов необходимо предполагать, что в отдельных актах взаимодействия адронов генерируется очень большое число мюонов (порядка 10^3 при $10^{14} - 10^{15}$ эв).

Одна из наиболее обоснованных возможностей заключается, по-видимому, в предположении, что в области сверхвысоких энергий принципиально меняется вид инклюзивного спектра и множественность вторичных частиц [8]. Будущие эксперименты, а также будущий анализ уже имеющихся данных позволяет сделать выбор между различными возможностями нарушения масштабной инвариантности.

Московский

государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
7 апреля 1976 г.

Литература

- [1] P. M. Fishbane, T. K. Gaisser, R. H. Maurer, et al. Phys. Rev. D, 9, 3083, 1974.
 [2] Н.Н.Калмыков, Г.Б.Христиансен, Письма в ЖЭТФ, 21, 666, 1975.
 [3] G. B. Christiansen, P. V. Vedenev, G. V. Kulikov et al. Proc. ICCR, Hobart, 6, 2097, 1971.

- [4] J.E.F.Varuch, G.Brooke, E.W.Kellerman et al. Proc. ICCR, Munchen, 8, 2949, 1975.
- [5] Н.Н.Калмыков, Г.В.Куликов, . Изв. АН СССР, сер. физ., 38, 1024, 1974.
- [6] P.K.F.Grieder. Proc. ICCR, Denver, 4, 2467, 1973.
- [7] S.M. Rozhdestvensky, B.A.Khrenov, G.B.Khristiansen et al. Proc, ICCR, Munchen, 8, 2790, 1975.
- [8] N.N.Kalmykov, Ju.A.Fomin , G.B.Khristiansen. Proc. ICCR, Denver, 4, 2633, 1973.
-