

НАРУШЕНИЕ ЯДЕРНОГО СКЕЙЛИНГА ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Ю.Ф.Гагарин, Б.Н.Калинкин ¹⁾, В.А.Лукин, Е.А.Якубовский

В центральных столкновениях ядер группы $\text{Ca} \div \text{Fe}$ с энергией 15 – 200 ГэВ/нуклон с ядрами Ag , Vr обнаружено резкое уменьшение наклона энергетического спектра протонов в задней полусфере в диапазоне энергии 100 – 400 МэВ по сравнению с наклоном спектра во взаимодействиях адронов с ядрами.

Известно, что энергетические спектры протонов в задней полусфере $\theta > 90^\circ$ в реакции типа $h + A \rightarrow p + X$ ¹ для разных энергий E^{in} падающих адронов, массовых чисел мишени A (превышающих некоторое значение E^{in} и A) и углов θ с хорошей точностью могут быть параметризованы в виде:

$$f(E, \theta) = C \exp [-E(1 - \beta \cos \theta) / T_0], \quad (1)$$

где E – энергия протона, $\beta \approx 0,5$ и $T_0 \approx 58$ МэВ.

Универсальность записи (1) для разных начальных энергий E^{in} , углов и массовых чисел A отражает реализацию "ядерного скейлинга" во взаимодействиях адрон-ядро.

В случае pA -взаимодействия полупространство $\theta > 90^\circ$ для вторичных протонов является областью фазового пространства, запрещенной для них в процессе, происходящем при взаимодействии протон–нуклон. В соответствии с принятой терминологией такие протоны называются кумулятивными.

Представляется важной проверка наличия ядерного скейлинга в намного более сложном процессе – в центральных взаимодействиях тяжелых ядер. В настоящее время такая проверка возможна только при использовании ядер группы железа $\text{Ca} \div \text{Fe}$ космических лучей во взаимодействиях с ядрами Ag , Vr ядерной фотозмульсии.

Признаки качественных изменений энергетических спектров всех протонов с энергией 30 – 400 МэВ ($\theta = 0 - 180^\circ$) в реакции $A_1 + A_2 \rightarrow p + X$ обнаружены уже в работе ² для ядер с энергией 2 – 15 ГэВ/нуклон в реакции $(\text{Ca} \div \text{Fe}) + \text{Ag}$, Vr при числе взаимодействующих нуклонов падающего ядра $n_{B3} \gtrsim 40$. Показатель γ энергетического спектра $I = dE^{-\gamma}$ оказался равным $\sim 0,67$, в то время как для взаимодействия протон–ядро $\gamma \approx 1,3 - 1,5$. Для событий с $n_{B3} \approx 50$ энергетический спектр протонов в диапазоне 100 – 400 МэВ, полученный при $E^{in} \approx 15 - 200$ ГэВ/нуклон в данной работе, еще более жесткий – $\gamma \lesssim 0,3$. Такое резкое изменение наклона спектра (при более постепенном уменьшении показателя спектра с увеличением n_{B3} от 1 до ~ 40), по-видимому, является результатом проявления существенно нелинейных процессов в развитии пространственно-временной картины взаимодействия в столкновениях ядер, в том числе, и для частиц, вылетающих в заднюю полусферу.

Для фактического сравнения экспериментальных данных по спектрам протонов в кумулятивной области $\theta > 90^\circ$ в реакции $(\text{Ca} \div \text{Fe}) + \text{Ag}$, Vr ³

$$dN / dE = \varphi(E) \quad (2)$$

и в процессе $p + A \rightarrow p_{\text{кум}}^* + X$ ¹

$$(1/p) (d^2 \sigma / dE d\Omega) = f(E, \theta) \quad (3)$$

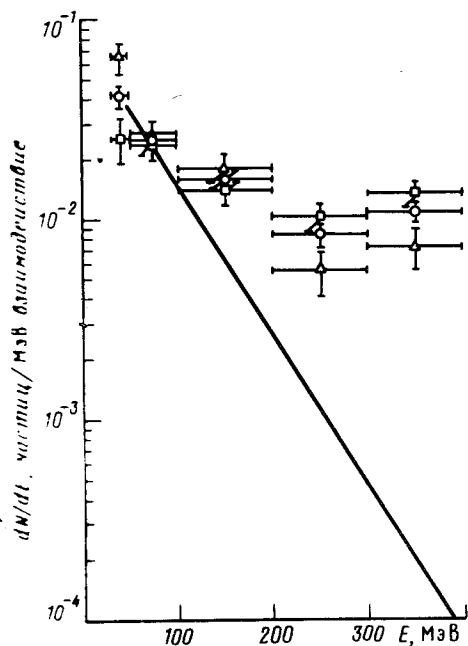
следует учесть различия в их представлении. Для приведения (3) к виду (2) необходимо

¹⁾ Объединенный институт ядерных исследований.

выражение (3) проинтегрировать с весом $\sin\theta d\theta$ в пределах $90 - 180^\circ$ и умножить на фактор $p \approx E^{1/2}$. Тогда f в единицах работы 3 приближенно равно:

$$\tilde{f}(E) \approx E^{1/2} \exp(-E/T_0^*), \quad (4)$$

где $T_0^* \approx 50$ МэВ. Рассматривая полученный эффективный спектр протонов в задней полусфере в реакции адрон-ядро в диапазоне $50 - 400$ МэВ, имеем: $\tilde{f}(50 \text{ МэВ})/\tilde{f}(400 \text{ МэВ}) \approx 430$.



Энергетический спектр протонов в задней полусфере в центральных взаимодействиях $\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Ag}$, Vg : Δ — 25 событий, $E^{in} \approx 3 - 15$ ГэВ/нуклон; \square — 36 событий, $E^{in} \approx 15 - 200$ ГэВ/нуклон; \circ — суммарное распределение, 61 событие. Прямая — эффективный спектр протонов в задней полусфере в реакции $h + A \rightarrow p + X$, построенный по соотношению (4) и нормированный на спектр протонов в суммарном распределении во взаимодействиях ядер в точке с энергией 50 МэВ

Для сравнения наклонов энергетических спектров протонов в задней полусфере во взаимодействиях ядер и адронов с ядрами мы использовали часть взаимодействий из работы [1]. Отобрав события только с энергией от 3 до 15 ГэВ/нуклон. При сравнении прямая с эффективным наклоном (4) для взаимодействия $p + A$ нормирована к эксперименту $\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Ag}$, Vg в точке с $E = 50$ МэВ, т. к. в работе [1] ядерный скейлинг описывается, начиная приблизительно с этой энергии. Во взаимодействиях ядер наклон спектра уменьшается (рис., треугольники). Однако это различие еще не велико. Подтвердится ли тенденция к нарушению скейлинга во взаимодействиях ядер при увеличении статистики, при увеличении энергии взаимодействующих ядер и при уменьшении параметра удара?

Для решения поставленной задачи в данной работе исследованы в ядерной фотоэмульсии 25 взаимодействий ядер космических лучей с энергией $15 - 200$ ГэВ/нуклон в реакции $(\text{Ca} + \text{Fe}) + \text{Ag}$, Vg . События отобраны по следующим критериям: число сильноионизирующих частиц из ядра-мишени $N_h = N_g + N_b \geq 28 - 30$ и $N_b \leq 10$, где N_g и N_b — числа протонов (серых и черных треков) с энергией $30 - 400$ МэВ и $0 - 30$ МэВ. Такие взаимодействия соответствуют малому параметру удара ($B \approx 2 - 3$ Фм). Кроме того были изучены 11 "аномальных" взаимодействий ядер группы железа с минимальным параметром удара ($B \approx 0 - 2$ Фм) с энергией $15 - 25$ ГэВ/нуклон, отобранных по критерию максимальной множественности релятивистских частиц и практическому отсутствию протонов — спектров падающего ядра под минимальными углами вылета при любом числе N_h .

В исследуемых взаимодействиях минимальная ионизация I_0 определена счетом зерен на треках однозарядных частиц, идущих под минимальными углами к направлению движения падающего ядра, для каждого фотослоя, в котором произошло взаимодействие, и для соседнего фотослоя. На каждом треке сосчитывалось от 400 до 1000 зерен. Оценка энергии

проведена для всех серых и черных треков с $\theta > 90^\circ$. Для тонких треков с ионизацией $I \leq 1,4I_0$ измерена плотность зерен. Определение энергии для протонов энергией ≤ 100 МэВ проведено путем прослеживания треков до остановки. Для протонов с энергией от 100 до 400 МэВ оценка энергии проведена по плотности зерен. Для плоских треков с наклоном $< 10 - 20^\circ$ и с энергией ~ 100 МэВ оценка энергии по пробегу соответствовала оценке энергии по плотности зерен.

Энергетический спектр протонов с поправками к числу серых треков в различных энергетических интервалах, учитывающими занижение ионизации при счете зерен на треках с большим наклоном, совпал с энергетическим спектром частиц, полученным по трекам с малым наклоном $< 30^\circ$ с последующей геометрической поправкой на треки с большим наклоном.

Как следует из рисунка, наблюдается увеличение вдвое выхода протонов с энергией 200 – 400 МэВ при увеличении энергии ядер. Наклоны энергетических спектров протонов в диапазоне энергии 100 – 400 МэВ во взаимодействиях тяжелых ядер с $E^{in} > 15$ ГэВ/нуклон (квадраты) и во взаимодействиях адронов с ядрами (прямая) существенно различаются. Это различие еще более значимо за счет уменьшения ошибок при суммировании данных во взаимодействиях ядер во всем диапазоне энергии 3 – 200 ГэВ/нуклон (кружки). Таким образом, во взаимодействиях тяжелых ядер с энергией > 3 ГэВ/нуклон при малых параметрах удара проявляется нарушение "ядерного скейлинга" – статистически обеспеченное значительное уменьшение наклона энергетического спектра протонов в кумулятивной области $\theta > 90^\circ$ по сравнению с взаимодействиями адронов с ядрами.

Детальная интерпретация обнаруженного нами явления нарушения ядерного скейлинга во взаимодействиях тяжелых ядер будет дана в последующих публикациях. Предварительно отметим, что в исследованных взаимодействиях с малым параметром удара становится возможным торможение значительной доли неупруго взаимодействующих нуклонов обоих ядер вплоть до полной их остановки в СЦИ⁴. В результате, задние фронты сталкивающихся ядер будут взаимодействовать с ядерным веществом повышенной плотности. В рамках, например, модели "сбирания"⁵ это увеличивает выход кумулятивных нуклонов в задней полусфере в лабораторной и антилабораторной системах.

Литература

1. Баюков Ю.Д., Гаврилов В.Б., Горяинов Н.А. и др. Препринт ИТЭФ-90, 1981; Гаврилов В.Б., Герзон С.А., Зон С.А., Киселев Ю.Т. и др. Препринт ИТЭФ-124, 1983; Бояринов С.В., Герзон С.А., Киселев Ю.Т. и др. ЯФ, 1987, 46, 1472.
2. Баранов Д.Г., Бобков В.Г., Варюхин В.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, 127.
3. Варюхин В.В., Гагарин Ю.Ф., Иванова Н.С. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 800.
4. Амеев С.Ш., Варюхин В.В., Гагарин Ю.Ф. и др. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 339.
5. Ameev S.Sh., Golybyatnikova E.S., Kalinkin B.N. et al. Zeitschrift Physik A, 1988, 331, 347.