

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



с 343a

T-57

1403/2-76

В.Д.Тонеев

19/11-76  
P4 - 9488

ЯДЕРНЫЙ СКЕЙЛИНГ И ПОЛУСКЕЙЛИНГ

**1976**

P4 - 9488

В.Д.Тонеев

ЯДЕРНЫЙ СКЕЙЛИНГ И ПОЛУСКЕЙЛИНГ

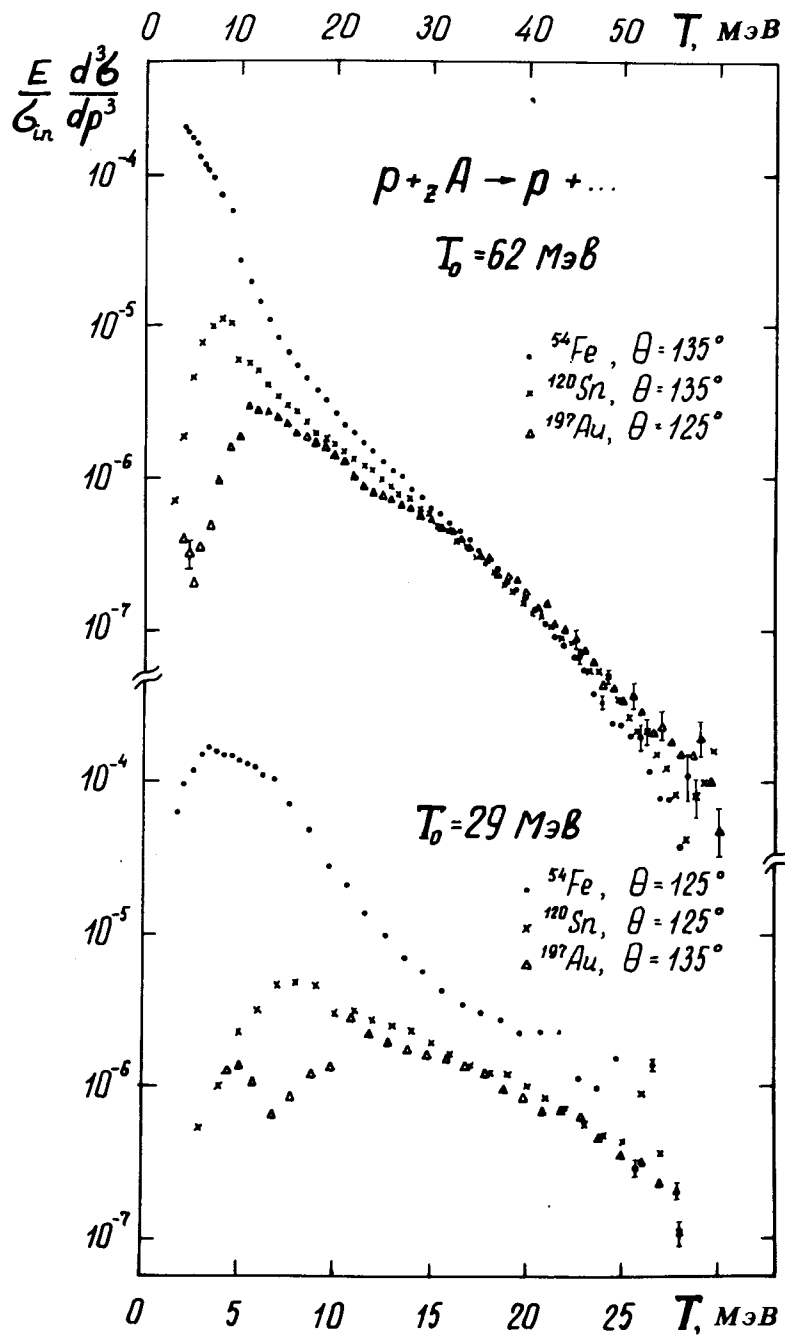
Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Поиск аналогии между процессами, протекающими в физике элементарных частиц и в ядерной физике, уже привел к обнаружению ряда интересных явлений, одно из которых - кумулятивный эффект. Существование этого эффекта было впервые экспериментально доказано на примере образования кумулятивных пионов при столкновении ядер, ускоренных до релятивистских энергий /1/. Вскоре было показано, что в адрон-ядерных реакциях при высоких энергиях также возможно рождение кумулятивных барионов и даже легких ядер /2,3/. В данной работе будет рассмотрена лишь последняя группа кумулятивных явлений, для которой часто используется специальное название - ядерный скейлинг /2,3/.

Под ядерным скейлингом понимается универсальность поведения структурной функции  $\rho = \frac{E}{\sigma_{in}} \frac{d^3\sigma}{dp^3}$  для вторичных частиц, испущенных из ядра под углами, близкими к  $180^\circ$ . Имеющиеся далеко не полные экспериментальные данные показывают, что зависимость функции  $\rho$  от кинетической энергии вылетевших частиц,  $T = E - m$ , может быть параметризована следующим образом:

$$\rho = C \cdot \exp(-T/T_c), \quad /1/$$

причем в ГэВ-ной области энергий параметр  $T_c$  с точностью /10-15% оказывается не зависящим от типа бомбардирующей частицы и ее кинетической энергии  $T_0$ . Коэффициент  $C$  как функция массового числа ведет себя примерно как  $A^{0,3-0,4}$  /2,3/.



В настоящее время теоретическое объяснение ядерного скейлинга фактически отсутствует. В попытке выяснить физику этого явления интересно обратиться к области более низких энергий для того, чтобы понять, каким образом происходит установление такого режима.

Имеющаяся экспериментальная информация практически ограничена работами Бертранда и Пилле, выполненными с пучком протонов энергии 62 МэВ и частично при значениях  $T_0 = 29$  и 39 МэВ<sup>4/</sup>. Полученная из этих данных структурная функция  $\rho$  для испущенных протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц показана на рис. 1 и 2. Как видно из этих рисунков, в области  $T \geq [15-20] \text{ МэВ}$  экспериментальные точки достаточно хорошо ложатся на прямые. Конечно, эти результаты выглядят не столь впечатляющими, как в ГэВ-ной области энергий, где линейный спад простирается на несколько порядков. В нашем случае энергия первичного протона  $T_0$  невелика и энергия детектируемых частиц находится близко к своему кинематическому пределу. Кроме того, можно ожидать, особенно при  $T_0 = 29 \text{ МэВ}$ , значительного влияния на вид структурной функции эффектов ядерной структуры. Тем не менее поведение функции  $\rho$  весьма схоже с тем, что мы наблюдаем в области высоких энергий. Если структурную функцию параметризовать соотношением типа /1/, то уже в области  $T_0 \approx 50 \text{ МэВ}$  параметр  $T_c$  оказывается слабо зависящим от массового числа ядра-мишени, хотя еще имеется существенная зависимость от  $T_0$ . Это позволяет надеяться, что и здесь мы встречаемся с проявлением эффектов раннего ядерного скейлинга, наступающего первоначально относительно зависимости параметра  $T_c$  от  $A$ ,  $\frac{\partial T_c}{\partial A} \approx 0$ . Поэтому

естественно назвать это явление квази- или полускейлингом. Взятый сам по себе, этот факт имеет лишь эв-

Рис. 1. Структурная функция для инклюзивного рождения протонов на различных ядрах при энергии первичного протона  $T_0$ . Экспериментальные точки взяты из работы /4/.

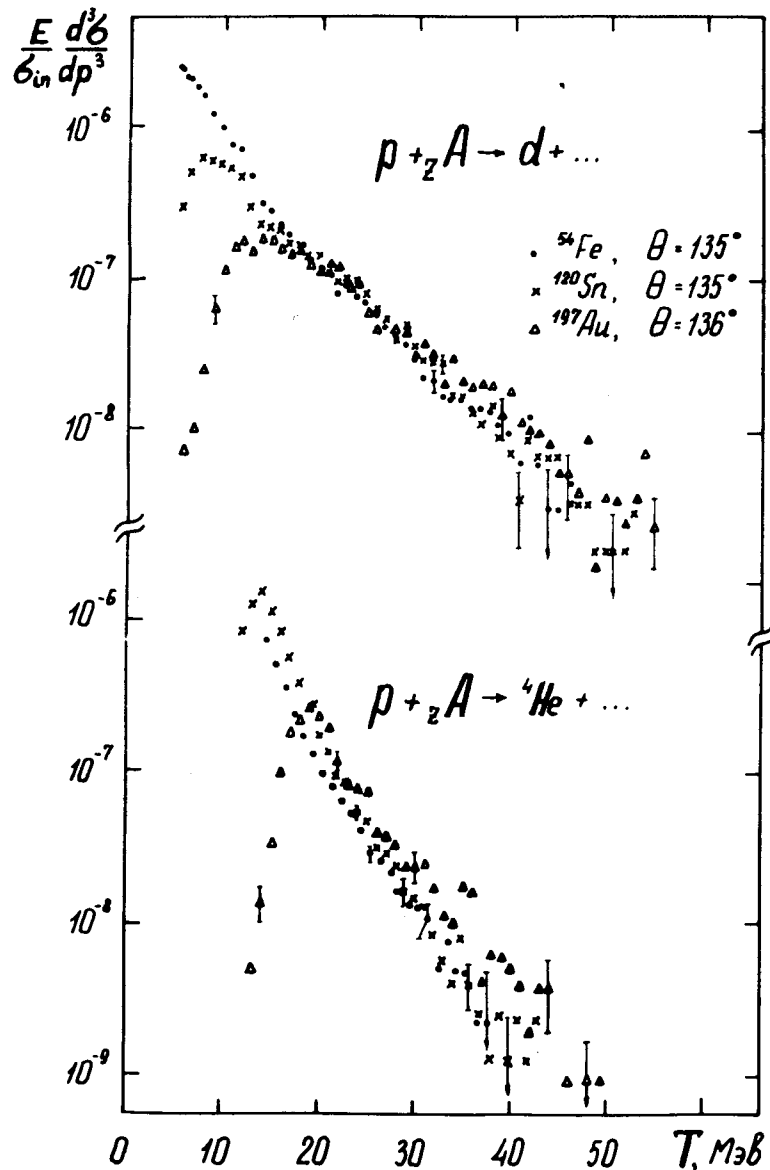


Рис. 2. Структурная функция для инклюзивного рождения дейтронов и  $\alpha$ -частиц на различных ядрах протонами с энергией 62 МэВ. Экспериментальные точки взяты из работ<sup>/4/</sup>.

ристическую ценность, однако имеются обстоятельства, заставляющие отнестись к нему более внимательно.

По-видимому, наиболее интересно то, что форма спектров вторичных частиц для области  $T_0 \leq 100$  МэВ была успешно объяснена в рамках моделей предравновесной эмиссии /см. обзоры /5, 6/ /. Эти модели описывают установление статистического равновесия в ядре как процесс усложнения возбужденных квазичастичных состояний. Частицы, испущенные на данной предравновесной /предыспарительной/ стадии, могут обладать энергиями вплоть до кинематического предела\*. Известными свойствами предравновесной компоненты являются слабый рост ее вклада при переходе к более тяжелым ядрам и независимость формы предравновесного спектра от массового числа  $A^{/5,6/}$ . Следует также подчеркнуть, что спектры быстрых протонов, вылетевших в заднюю полусферу, не объясняются обычной каскадно-испарительной моделью /7/.

Таким образом, сопоставление всех этих фактов позволяет высказать следующую гипотезу: как полускейлинг, так и ядерный скейлинг обусловлены, в основном, предравновесной эмиссией частиц.

Выдвинутая гипотеза приводит к определенным физическим следствиям, которые можно проверить экспериментально.

1. Вид функции  $T_c = f(T_0)$  в какой-то мере должен повторять зависимость энергии возбуждения ядра от энергии бомбардирующей частицы. Следовательно, ядерный полускейлинг перейдет в скейлинг /в смысле  $\frac{\partial T_c}{\partial T_0} \approx 0$  /, когда энергия возбуждения достигнет насыщения. Как показывает эксперимент, при  $T_0 \approx 0,8$  ГэВ для мишеней типа  $^{12}\text{C}$  и при  $T_0 \approx 3-4$  ГэВ для ядер фото-

\* Следует подчеркнуть, что в обсуждаемом предравновесном подходе не требуется специально постулировать какие-то высокие ядерные температуры /5,6/.

эмульсии ( $A \sim 100$ ) и более тяжелых ядер достигается насыщение для средних значений энергии возбуждения<sup>/8/</sup>, поэтому режим ядерного скейлинга должен устанавливаться не позже этой энергетической границы.

2. В эксперименте при энергиях  $T_0 = 2$  и  $3,66$  ГэВ обнаружена существенная поляризация вылетевших назад протонов<sup>/9/</sup>. Если этот экспериментальный факт достоверен, а природа ядерного скейлинга и полускейлинга, действительно, одна и та же, что и в нуклон-ядерных реакциях при  $T_0 = 50$  МэВ, предравновесная компонента вторичных частиц, испущенных под большими углами, должна быть поляризована.

3. Относительный выход частиц различного типа в области ядерного скейлинга и в "испарительной" области  $T < 20$  МэВ различен. В частности, как следует из предравновесного подхода, отношение выходов быстрых протонов к выходу нейтронов должно существенно превышать соответствующую величину для испарительной области.

4. Общий характер явления предравновесной эмиссии позволяет утверждать, что эффект ядерного полускейлинга можно также наблюдать в реакциях, инициируемых  $\gamma$ -квантами и сложными частицами, для различных вторичных продуктов, включая тяжелые фрагменты.

В заключение следует заметить, что при обсуждении ядерного скейлинга часто предполагают, что взаимодействие первичной частицы происходит одновременно с группой ядерных нуклонов. Это "естественное объяснение" получает в рамках предравновесной гипотезы новую окраску. Действительно, для этого необходимо вспомнить, что первая модель предравновесной эмиссии возникла как модель статистической интерпретации эффектов динамической структуры - так называемых промежуточных резонансов, - наблюдаемых в ядерных реакциях<sup>/10, 11/</sup>. Последнее обстоятельство открывает еще одну интересную возможность: можно надеяться, что изучение "жесткой" компоненты частиц, испущенных в область "задних" углов, даст информацию о высоковоз-

бужденных многоквартичных состояниях ядра, широко обсуждаемых в последнее время<sup>/12/</sup>.

Пользуюсь случаем выразить свою признательность К.К.Гудиме, В.К.Лукьянову и А.И.Титову за полезные обсуждения затронутых здесь вопросов.

#### Литература

1. А.М.Балдин, С.Б.Герасимов, Н.Гиордэнеску, В.Н.Зубарев, Л.К.Иванова, А.Д.Кириллов, В.А.Кузнецов, Н.С.Мороз, В.Б.Радоманов, Р.Н.Ромжин, В.С.Ставинский, М.И.Яцуца. ЯФ, 18, 79 /1973/.
2. Ю.Д.Баяков, Л.С.Воробьев, Г.А.Лексин, В.Л.Столин, В.Б.Федотов, В.Д.Хованский. ЯФ, 18, 1246 /1973/.
3. Г.А.Лексин. Ядерный скейлинг /конспекты лекций/, МИФИ, 1975.
4. F.E.Bertrand, R.W.Peele. Phys.Rev., C8, 1045 /1973/.
5. M.Blann. Nuclear Equilibration Processes at Moderate Excitation, in Proceedings of Europhysics Study Conf. on Intermediate Processes in Nuclear Reactions, Plitvice Lakes, Yugoslavia, August 31, 1972.
6. К.Зайдель, К.Зелигер, Р.Райф, В.Д.Тонеев. ЭЧАЯ, 7, вып. 2, 499, 1976.
7. H.W.Bertini, G.D.Harp, F.E.Bertrand. Phys.Rev., C10, 2472 /1974/.
8. В.С.Барашенков, В.Д.Тонеев. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
9. Ю.Д.Баяков, Л.С.Воробьев, В.М.Колыбасов, Г.А.Лексин, В.Л.Столин, В.Б.Федоров, В.Д.Хованский. ЯФ, 5, 337 /1967/.
10. J.J.Griffin. Phys.Rev.Lett., 17, 478 /1966/.
11. H.Feshbach. Rev.Mod.Phys., 46, 1 /1974/.
12. В.Г.Соловьев. ЭЧАЯ, 3, 770 /1972/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 января 1976 года.