

С 343е

В-466

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ЯФ, 1967, т. 5, в. 5, с. 942-947 ^{16/iii}



P-2813

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Я. Вильчински , В.В. Волков, П. Децовски

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА
РЕАКЦИЙ МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ

1966

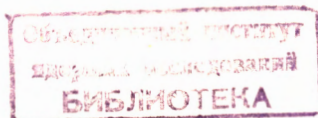
P-2813

4369/1/24
Я. Вильчински^{х)}, В.В. Волков, П. Децовски^{xx)}

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА
РЕАКЦИЙ МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ

х) Ягеллонский Университет, Краков, Польша

xx) Варшавский Университет, Варшава, Польша



1. В в е д е н и е

При взаимодействии тяжелых ионов с ядрами могут происходить реакции, в которых от ядра к ядру передаются один или несколько нуклонов. К настоящему времени опубликовано значительное число работ, посвященных однонуклонным передачам^{х)}. В указанных работах установлены характерные особенности этих реакций, свидетельствующие о том, что однонуклонные передачи являются реакциями прямого взаимодействия. Продукты однонуклонных передач вылетают в довольно узком интервале углов, образуя в угловом распределении максимум, позиция которого соответствует касательному столкновению двух ядер. Сечение реакции быстро возрастает вблизи кулоновского барьера, а затем с ростом энергии проявляет тенденцию к насыщению. Передача нуклона происходит в основном в связанные состояния с возбуждением не слишком высоких уровней конечных ядер. Теоретические работы^{/3-7/}, в которых однонуклонные передачи рассматривались в квазиупругом приближении, дали хорошее согласие с экспериментом в описании угловых распределений.

Экспериментальные данные по многонуклонным передачам более ограничены и не позволяют сделать окончательных выводов о механизме реакций. Угловые распределения многонуклонных передач отличаются значительным разнообразием. В работе Кауфмана и Вольфганга^{/8/} при облучении Rn^{103} ионами O^{16} (160 Мэв) и N^{14} (140 Мэв) наблюдались продукты реакций срыва и подхвата нескольких нуклонов, угловое распределение которых характеризовалось монотонным спадом дифференциального сечения с увеличением угла. Кумпф и Донец^{/9/}, исследуя многонуклонные передачи при взаимодействии ионов Ne^{22} с ядрами Th^{232} , обнаружили в угловом распределении четкие максимумы, соответствующие касательному столкновению. Наконец, в экспериментах Ложинского^{/10/}, проведенных при энергиях вблизи кулоновского барьера, угловые распределения продуктов передачи нескольких нуклонов характеризуются наличием даже трех максимумов.

х) См. обзорные статьи /1,2/.

Данные по энергетическим распределениям продуктов реакций весьма малочисленны, тем не менее, они показывают^{/8/}, что в многоуклонных передачах конечные ядра возбуждаются значительно сильнее, чем при передаче одного нуклона.

Среди многоуклонных передач особый интерес представляет изучение передачи двух протонов и двух нейтронов, которые, возможно, передаются в виде α -кластера. Реакции этого типа изучались на легких ядрах и при сравнительно низких энергиях^{/11,12/}.

В настоящей работе исследовалась реакция передачи двух протонов и двух нейтронов (N^{14}, F^{18}) на ядре Al^{27} с целью получения дополнительной информации о механизме многоуклонных передач. Использовался метод регистрации радиоактивных продуктов реакции. В этом случае изучение передачи α -кластера может быть осуществлено лишь с помощью одной реакции: (N^{14}, F^{18}). Эксперименты проводились на выведенном пучке 150 сантиметрового циклотрона Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В работе измерялись энергетические распределения продукта реакции F^{18} под различными углами и для различных энергий налетающих ионов.

2. Методика эксперимента

Схему эксперимента можно видеть на рис. 1. Пучок ускоренных ионов N^{14} , выделенный коллиматором реакционной камеры, попадал на мишень Al^{27} толщиной $1,73 \text{ мг/см}^2$. Продукты реакции - ядра F^{18} собирались в стопках алюминиевых фольг, расположенных в реакционной камере под различными углами. После облучения, которое продолжалось 2-2,5 часа, сборки извлекались из камеры и активность каждой фольги обсчитывалась на регистрирующей установке. Установка представляла собой систему из двух сцинтилляционных счетчиков, регистрирующих совпадения аннигиляционных γ -квантов от распада $F^{18}(\beta^+, T_{1/2} = 112 \text{ мин})$. Выделение активности, принадлежащей F^{18} , из кривых распада не встречало трудностей, так как при взаимодействии $Al^{27} + N^{14}$ не могут возникать другие β^+ -активные продукты с периодом полураспада, близким к 112 минутам.

Энергия ионов изменялась с помощью поглощающих алюминиевых фольг, устанавливавшихся перед коллиматором. Величина энергии ионов N^{14} на мишени, а также энергия продуктов F^{18} , определялась из зависимости пробег-энергия для алюминия, экспериментально измеренной Нортклиффом^{/13/}.

Подробное описание аппаратуры и методики измерений можно найти в нашей работе^{/14/}.

3. Результаты и дискуссия

Реакция $Al^{27}(N^{14}, F^{18})$ исследовалась при четырех значениях энергии ионов N^{14} : 107,3; 91,4; 78,7 и 65,0 Мэв (в лабораторной системе). Обычно для данной энергии одновременно измеряются четыре энергетических распределения продуктов под различными углами. Полученные результаты представлены на рис. 2. Измерения проводились с довольно большим шагом по энергии, определяемым толщиной фольг в стопках ($1,7 \text{ мг/см}^2$). Тем не менее, полученные данные отчетливо отражают некоторые общие закономерности исследованной реакции. Пунктирными линиями обозначен ожидаемый выход F^{18} за счет взаимодействия рассеянного на мишени пучка с алюминиевыми сборниками. Эти оценки были сделаны на основании результатов дополнительных экспериментов, в которых стопки алюминиевых фольг, помещенные в коллектор тока, облучались непосредственно пучком N^{14} известной интенсивности. Затем эти результаты нормировались на отношение рассеянного под данным углом пучка к полному пучку (расчеты проводились по резерфордовской формуле).

Из рис. 2 видно, что взаимодействие рассеянного пучка со сборниками вносит заметный вклад лишь под самыми малыми углами и не может повлиять на общие закономерности, проявляющиеся в представленных результатах. Стрелки над спектрами указывают величину энергии продуктов F^{18} для случая, когда в реакции $Al^{27}(N^{14}, F^{18}) Na^{23}$ оба конечных ядра оказываются в основных состояниях ($Q = -5,7 \text{ Мэв}$).

Наиболее интересная особенность полученных энергетических распределений состоит в том, что в спектре наряду с пиком, соответствующим "классической" передаче, присутствуют частицы, энергия которых простирается почти от нуля (в экспериментах не был захвачен интервал энергий 0-20 Мэв) до максимально возможной. Это означает, что при взаимодействии N^{14} с Al^{27} происходят процессы, в которых образование F^{18} сопровождается значительной потерей первоначальной энергии иона N^{14} . Ради краткости мы будем в дальнейшем называть эти два процесса соответственно "квазиупругим" и "неупругим". При малых углах пик, обусловленный "квазиупругими" передачами выделяется довольно четко. С увеличением угла величина его быстро падает и одновременно растет вклад от "неупругих" процессов. Увеличение энергии ионов N^{14} приводит к возрастанию относительного вклада низкоэнергетических продуктов реакции. При максимальной энергии 107,3 Мэв спектр F^{18} характеризуется широким "неупругим" максимумом, который перемещается с увеличением угла от $\approx 60 \text{ Мэв}$ (для $Q = 5,1^\circ$) до $\approx 40 \text{ Мэв}$ (для $Q = 19,9^\circ$). При малых энергиях ионов доминирующая роль принадлежит передачам в связанные состояния конечных продуктов реакции. На рис. 3 показано, как меняется доля "квазиупругих" процессов

в общем балансе образования F^{18} . Величина σ связи / σ полн, отложенная по оси ординат, определена следующим образом:

$$\frac{\sigma_{\text{связн.}}}{\sigma_{\text{полн.}}} = \frac{E_0 - 11 \text{ МэВ}}{\int_{E_0}^{E_{\text{макс}}} \left(\frac{d^2 \sigma}{d\Theta dE} \right) dE}$$

Здесь $E_{\text{макс}}$ - верхняя граница энергии данного спектра, а E_0 - расчетная энергия F^{18} для данного угла вылета в случае образования конечных продуктов реакции в основных состояниях (эти значения энергии обозначены на рис. 2 стрелками). Диапазон энергий возбуждения, отнесенный к "квазиупругим" процессам - 11 МэВ, взят из порога диссоциации Na^{23} (8,79 МэВ) при средней энергии возбуждения ядра F^{18} (2,2 МэВ). Из рис. 3 отчетливо видно, как падает с ростом энергии ионов и с увеличением угла вылета доля "квазиупругих" процессов в образовании F^{18} .

На рис. 14 представлены данные, характеризующие угловые распределения обоих процессов. Разделение проводилось таким же способом, как и для данных, показанных на рис. 3. В "квазиупругом" случае кривые имеют монотонный подъем в сторону меньших углов аналогично результатам Кауфмана и Вольфганга^{8/} для многоуклонных передач на Rh^{103} . Угловые распределения, низкоэнергетичных продуктов F^{18} имеют противоположную зависимость - величина $(d\sigma/d\Theta)_{\text{неупр.}}$ медленно растет с увеличением угла (в исследованном нами диапазоне углов).

Следует также отметить еще одну интересную особенность, проиллюстрированную на рис. 4, - уменьшение сечения для передач в связанные состояния с увеличением энергии при одновременном росте сечения "неупругих" процессов. Возможно, что оба процесса конкурируют между собой, и увеличение роли каналов реакции с образованием низкоэнергетичных продуктов F^{18} при высших энергиях приводит к падению сечения для передач в связанные состояния.

Полученные результаты можно попытаться объяснить следующим образом. Характер взаимодействия тяжелого иона с ядром существенно зависит от углового момента налетающей частицы. При малых значениях ℓ образуется компаунд-ядро. При значениях ℓ , соответствующих касательному столкновению (ядра касаются своими поверхностями), взаимодействие носит квазиупругий характер. Это область "классических" одно- и малонуклонных передач. Между этими двумя областями лежит третий диапазон значений ℓ , в котором ядерное взаимодействие достигает значительной

интенсивности, однако из-за большой величины центробежного барьера компаунд-ядро образоваться не может. В этом диапазоне θ происходят различные неупругие процессы: развал налетающей частицы на более легкие фрагменты, выбивание нуклонов и нуклонных групп, захват налетающей частицей значительного числа нуклонов из ядра мишени. Как показывает анализ угловых распределений однонуклонных передач, ширина зоны, в которой разыгрываются квазиупругие процессы составляет $\sim 1-2$ ферми и почти не зависит от энергии налетающей частиц. Ширина зоны неупругих процессов, напротив, будет возрастать с энергией. В реакциях на легких ядрах возможен следующий эффект. При соударении с угловым моментом ℓ в промежуточной области (между зоной компаунд-ядра и зоной "квазиупругих" процессов) возникает система двух ядер, сильно взаимодействующих между собой. Благодаря этому взаимодействию значительная часть кинетической энергии налетающего иона может передаваться ядру-мишени. Однако относительная скорость обоих ядер не падает до нуля, так как из-за большого центробежного барьера и кулоновского отталкивания ядра разрываются с передачей нескольких нуклонов.

Из этих соображений нам представляется, что картина энергетических спектров F^{18} , наблюдавшихся в наших опытах, свидетельствует о существовании двух различных механизмов передачи групп нуклонов от ядра к ядру. Четко выделенные под малыми углами "квазиупругие" пики можно было бы интерпретировать как результат передачи α -кластера в процессе прямого взаимодействия двух ядер. Низкоэнергетическая часть спектра связана, по-видимому, с процессом, в котором F^{18} образуется в результате случайного разрыва двух сильно взаимодействующих ядер. Последняя реакция занимает как бы промежуточное положение между "чистой" реакцией прямого взаимодействия и реакцией образования компаунд-ядра.

В заключение мы выражаем благодарность Г.Н. Флерову за постоянный интерес к работе, Б.А. Загеру и операторам У-150 за обеспечение работы циклотрона, И.А. Арефьеву и А.Г. Золкину за помощь в измерениях.

Л и т е р а т у р а

1. A. Zucker, Ann. Rev. Nucl. Sci. 10, 183 (1960).
2. G.N. Flerov, V.A. Karnaukhov, Comptes Rendus du Congrès International de Physique Nucleaire (Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1964) vol. I p. 373.
3. T. Kammuri, Progr. Theor. Phys. 28, 934 (1962).
4. B.N. Kalinkin, J. S Grabowski, Proceedings of the Third Conference on Reactions between Complex Nuclei (University of California Press, Berkeley, Los Angeles, 1963/ p. 129; Acta Phys. Polonica, 24, 435 (1963).

5. В.М. Струтинский. ЖЭТФ, 46, 2078 (1964).
6. W.E. Frahm, R.H. Venter. Nucl. Phys. 59, 651 (1964).
7. A. Dar. Phys. Rev. 139, B1193, (1965).
8. R. Kaufmann, R. Wolfgang. Phys. Rev. 121, 192 (1961).
9. Г. Кумпф, Е.Д. Докл. ЖЭТФ, 44, 788 (1963=).
10. E. Lozynski. Nucl. Phys. 64, 321 (1965).
11. R. Bock, H.H. Duhm, G. Hortig, R. Ridel. Comptes Rendus du Congrès International de Physique Nucleaire (Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1964). vol. 11, p. 1123.
12. R.M. Gaedke, K.S. Toth. ORNL Report, Oak Ridge, 1965. Направлено в журнал "Nuclear Physics" .
13. L.C. Northcliffe. Phys. Rev. 120, 1744, (1960).
14. J. Wilczynski, V.V. Volkov. Препринт ОИЯИ 2580, Дубна 1966. Направлено в журнал "Nuclear Physics".

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июня 1966 г.

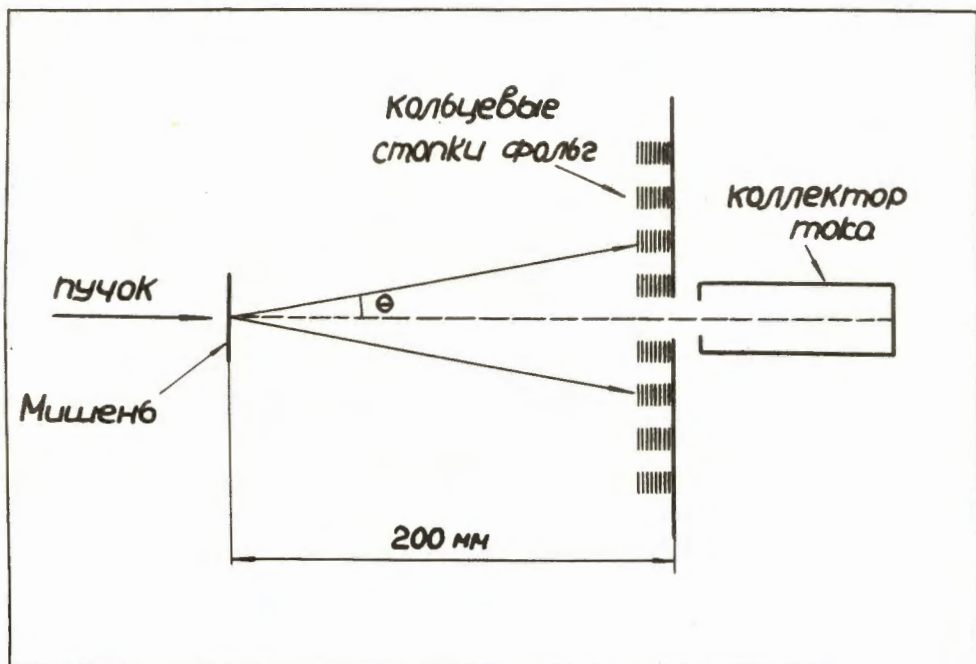


Рис. 1. Схема эксперимента.

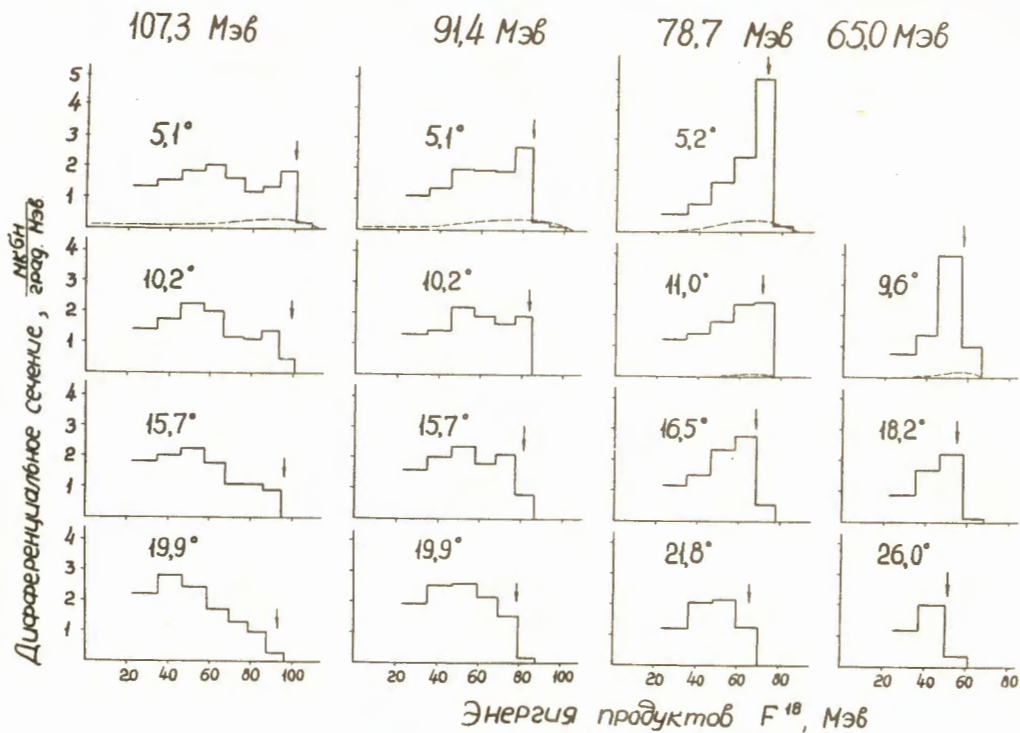


Рис. 2. Энергетические распределения продуктов F^{18} из реакции $Al^{27}(N^{14}, F^{18})$ для четырех значений энергии ионов N^{14} : 107,3; 91,4; 78,7 и 65,0 Мэв. Над спектрами указаны значения углов (в лабораторной системе). Значения энергии F^{18} , рассчитанные для случая реакции $Al^{27}(N^{14}, F^{18})_{Na^{23}}$ с образованием конечных ядер в основных состояниях, обозначены стрелками. Пунктирные линии обозначают ожидаемый эффект образования ядер F^{18} при взаимодействии рассеянного пучка со сборниками.

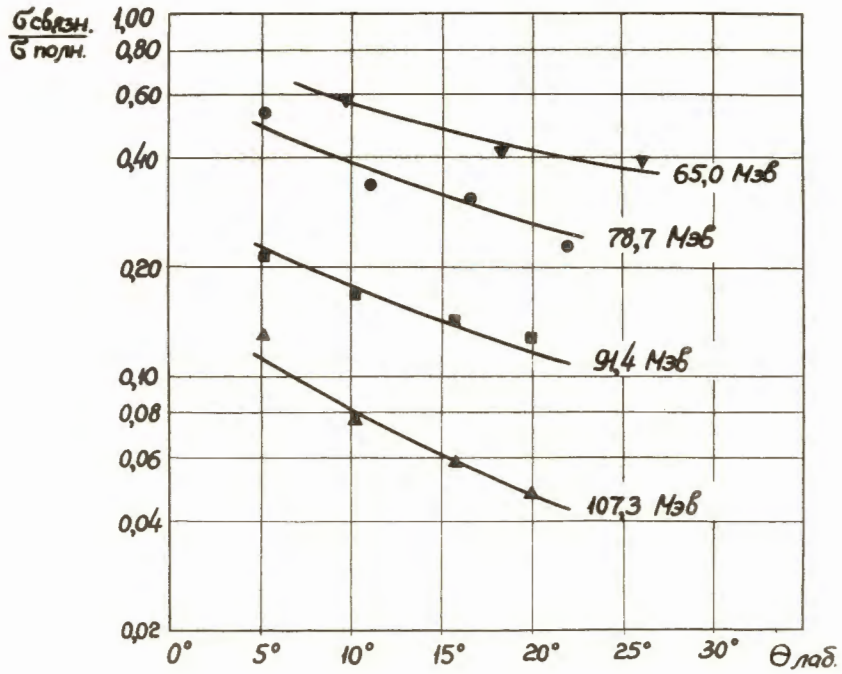


Рис. 3. Отношение сечения реакции передачи $Al^{27}(N^{14}, F^{18})Na^{23}$ (оба конечные ядра в связанных состояниях) к полному сечению образования продуктов F^{18} в зависимости от угла и энергии ионов N^{14} . Метод вычисления величины $\sigma_{связн.}/\sigma_{полн.}$ описан в тексте.

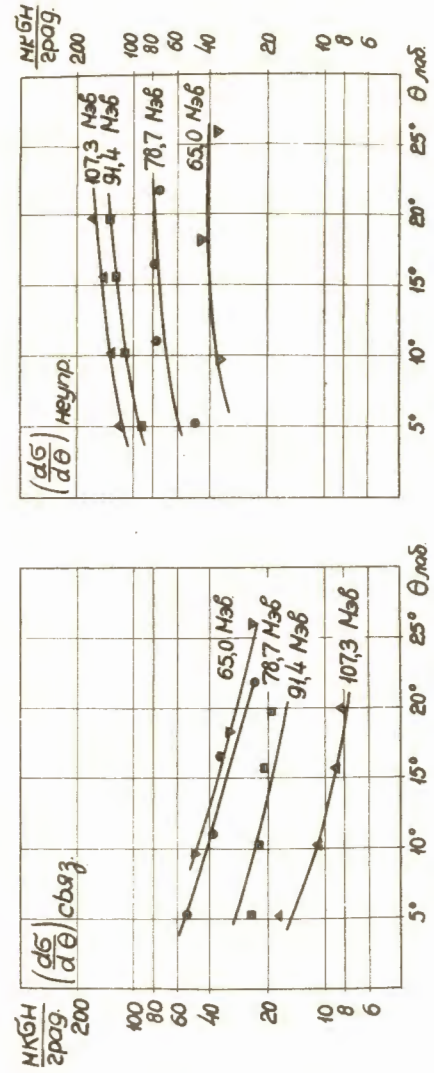


Рис. 4. Угловые распределения F^{18} из реакции (N^{14}, F^{18}) на Al^{27} для передач в связанные состояния конечных ядер и в случае образования продуктов F^{18} в сильно нейтрных процессах. Способ разделения обоих процессов см. в тексте.