

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-22

P7-96-22

А.Н.Андреев, Д.Д.Богданов, А.В.Еремин, А.П.Кабаченко,
О.Н.Малышев, А.Г.Попеко, Р.Н.Сагайдак,
Г.М.Тер-Акопьян, В.И.Чепигин, В.Нинов¹, С.Хофманн¹,
Ф.П.Хессбергер¹, Х.Фольгер¹, Ш.Шаро²

СЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ
ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ
В РЕАКЦИЯХ $^{24}\text{Mg} + ^{197}\text{Au}$ И $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$

Направлено в журнал «Ядерная физика»

¹ГСИ, Дармштадт, Германия

²Университет Яна Каменского, Братислава, Словакия

1 Введение

Для области легких делящихся компаунд-ядер имеется достаточно большое количество экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что при энергиях бомбардирующих ионов, на 20-30 МэВ превышающих барьер слияния, сечения образования испарительных продуктов полного слияния практически перестают зависеть от массы бомбардирующего иона. В качестве примера можно сослаться на результаты работ [1,2], в которых был проведен детальный анализ сечений образования испарительных продуктов в реакциях с ионами ^{31}P , ^{40}Ar , ^{84}Kr и ^{100}Mo , приводящих к образованию компаунд-ядра — ^{200}Po . Было показано, что переход во входном канале от резко асимметричной к полностью симметричной комбинации не влияет на положение максимумов и форму функций возбуждения испарительных продуктов, образующихся в канале полного слияния. Абсолютные величины сечений при этом уменьшаются пропорционально уменьшению приведенной длины волны во входном канале реакции, что свидетельствует о постоянстве среднего углового момента в канале испарительных продуктов для всех исследованных реакций. Полученные результаты имеют простое объяснение. Из-за уменьшения барьера деления ядра с увеличением его углового момента и, как следствие этого — роста делимости, основной вклад в сечения образования испарительных продуктов будут вносить парциальные волны с малыми значениями углового момента $l < l_1$ [3]. Из модельных расчетов следует, что для компаунд-ядра ^{200}Po величина l_1 не превышает $\sim 30\hbar$, что существенно меньше, чем величина $l_{\text{кр}}$, даже для реакции с ионами фосфора. Поэтому доминирование на первой стадии реакции процесса полного слияния с образованием компаунд-ядра будет приводить к отсутствию зависимости сечений образования испарительных продуктов от масс-асимметрии во входном канале реакции, что и подтверждается экспериментом.

Однако ситуация может измениться при переходе к ядрам с более высокой делимостью, для которых полное слияние с образованием компаунд-ядра может перестать быть доминирующим каналом в процессе эволюции двойной ядерной системы, даже при малых значениях прицельных параметрах соударения. Некоторые общие аргументы в пользу такого предположения были высказаны в работе [4]. Там же было показано, что имеются отдельные экспериментальные результаты по сече-

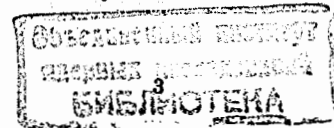
ниям образования испарительных продуктов, которые можно интерпретировать как подтверждение этого предположения. Поэтому нам представлялось интересным продолжить исследования зависимости сечений образования испарительных продуктов от масс-асимметрии во входном канале реакции для более тяжелых делящихся ядер, чем ^{200}Po . Выбор для исследования реакций, приводящих к образованию компаунд-ядра ^{221}Ra , представлялся разумным компромиссом. С одной стороны, сечения αp -, $\text{p}\alpha\text{p}$ - и $\alpha\text{h}\alpha\text{p}$ -реакций в этой области ядер все еще относительно велики, что позволяет провести достаточно детальные измерения функций возбуждения для отдельных каналов реакции. С другой стороны, в работе [5] указывалось на возможное присутствие аномалии в сечениях образования ^{224}U при переходе от реакций с ионами ^{22}Ne к реакциям с ионами ^{48}Ca .

2 Методика измерений и результаты экспериментов

2.1 Реакция $^{24}\text{Mg} + ^{197}\text{Au}$

Облучения проводились на циклотроне У-400 ЛЯР ОИЯИ. В экспериментах использовались выведенные пучки ^{24}Mg с начальными энергиями 140, 160 и 176 МэВ. Интенсивность пучка на мишени диаметром 12 мм ограничивалась и не превышала 5×10^{11} частиц/с. Изменение энергии бомбардирующих ионов с шагом 3-6 МэВ проводилось с помощью алюминиевых и титановых поглотителей, расположенных на расстоянии 70 см перед мишенью. Энергия частиц пучка после прохождения поглотителей измерялась поверхностно-барьерным полупроводниковым детектором по энергии ионов, рассеянных на угол 30° на тонкой (250 мкг/см^2) золотой фольге. Измерения потока ионов, прошедших через мишень, проводились с использованием цилиндра Фарадея. В экспериментах использовалась неподвижная мишень из золота с толщиной 415 мкг/см^2 на 6-мкм алюминиевой подложке. Мишень была изготовлена методом распыления. Толщина мишени и ее однородность измерялись методом рентгено-флуорисцентного анализа. Ошибка в определении толщины мишени не превышала $\pm 10\%$.

Отделение продуктов реакций полного слияния от частиц пучка и продуктов реакций передач осуществлялось с помощью электростати-



ческого сепаратора ВАСИЛИСА [6]. Детектирующая система, расположенная в фокальной плоскости сепаратора, состояла из двух широкоапертурных времяпролетных детекторов с временным разрешением 0,5 нс и восьмистрипового полупроводникового детектора с размерами отдельного стрипа 10×70 мм. Энергетическое разрешение для отдельных стрипов детектора составило 25-30 кэВ при охлаждении детектора до температуры $\approx -5^\circ\text{C}$. Электронная аппаратура детектирующей системы обеспечивала запись в память ЭВМ данных об энергии и времени пролета ядра отдачи, времени его прихода в детектор, номере стрипа. При последующем α -распаде ядер, имплантированных в детектор, регистрировалась энергия и время α -распада. Подробно характеристики сепаратора, детектирующей системы и электронной аппаратуры описаны в работах [6,7].

Идентификация нуклидов проводилась по энергии и периоду α -распада и положению максимума функции возбуждения для наблюдаемой активности. Для калибровки детектора по энергии использовался α -распад имплантированных в детектор нуклидов $^{216,217}\text{Th}$, ^{215}Ac и ^{210}Rn , сечения образования которых в исследуемой реакции были существенно больше, чем сечения образования изотопов протактиния. При расчетах энергии возбуждения компаунд-ядра использовались массы нуклидов из работы [8], а энергия бомбардирующих ионов считалась равной их энергии на выходе из мишени. Энергетические потери ионов в веществе мишени и подложке учитывались по таблицам [9].

Измерение эффективности сепаратора проводилось с использованием калибровочной реакции $^{24}\text{Mg} + \text{Ta}$. При этом использовались два подхода: сравнение измеренных в экспериментах выходов ядер (продуктов этой реакции) с известными сечениями их образования [10] и метод непосредственного измерения эффективности. Во втором случае после мишени устанавливался алюминиевый сборник с толщиной 1,8 мг/см², который после 10-15 минутного облучения переносился без нарушения вакуума к полупроводниковому детектору, расположенному в мишени-камере на расстоянии ≈ 5 см от мишени. В интервале времени порядка 15 минут проводилось измерение кривой распада для имплантированной в сборник активности. Аналогичное измерение проводилось и для активности, имплантированной в детектирующее устройство после сепаратора. Сравнение данных для сборника и детектирующего устройства позволяло определять эффективность сепарации с точно-

стью $\pm 20\%$. Измерения эффективности проводились в начале и конце каждого облучения. Среднее значение эффективности сепарации для ядер-продуктов, образующихся в χ -и $\rho\chi$ -каналах реакции, в описываемых экспериментах было равно $4,6 \pm 0,9\%$. При расчете сечений для $\alpha\chi$ -реакций величина эффективности сепарации уменьшалась в семь раз в соответствии с экспериментальными данными, полученными в реакции $^{20}\text{Ne} + \text{Au}$.

Таблица 1. Функции возбуждения для χ -, $\rho\chi$ - и $\alpha\chi$ -испарительных каналов, измеренные в реакции $^{24}\text{Mg} + ^{197}\text{Au}$

E*, МэВ	Сечение, мкб									
	χ -канал			$\rho\chi$ -канал				$\alpha\chi$ -канал		
	4n	5n	6n	p3n	p4n	p5n	p6-7n	α 3n	α 4-5n	α 6-7n
40.5	0.9			2.6	0.4			130	45	
44.5	0.6				1.3			115	75	
47.0	0.3	0.2		2.8	3.5			100	180	
52.0	0.2	0.6	0.03	1.2	4.7	0.8		40	160	
58.0		0.2	0.13	0.2	2.5	1.4	0.1	6	160	3
67.5			0.08		0.6	2.1	0.5		100	14
74.5			0.02		0.1	1.0	0.7		30	18
81.5						0.3	0.5		20	13
83.5							0.4		20	8

Результаты экспериментов приведены в таблице 1. Статистическая точность измерений выходов составляла $\pm 15\%$ для сечений на уровне 0,3 мкб. Исключение составляют только данные для сечений образования изотопа ^{216}Ra . Для этого нуклида статистическая точность определения сечений не превышала $\pm 40\%$ и ограничивалась необходимостью учета фона от интенсивной α -линии ^{216}Th с энергией 7,92 МэВ. Для всех остальных нуклидов точность определения абсолютных величин сечений их образования оценивается нами как $\pm 40\%$. При этом учитывается возможность присутствия небольших систематических ошибок в измерениях тока пучка.

2.2 Реакция $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$

Эксперименты проводились на ускорителе UNILAC в ГСИ. Дармштадт. Вращающаяся мишень из обогащенного изотопа ^{170}Er (96,9%) облуча-

лась пучком ионов ^{51}V с интенсивностью $2,4 \times 10^{12}$ частиц/с. Мишень со средней толщиной 440 мкг/см^2 была изготовлена методом вакуумного напыления на тонкую графитовую подложку (40 мкг/см^2). Изменение энергии бомбардирующих частиц производилось перестройкой ускорителя, а ее измерение осуществлялось по времени пролета частиц на выходе ускорителя. Точность определения абсолютного значения энергии ионов на выходе из ускорителя составляла $\pm 0,5 \text{ МэВ}$. Для измерения потока ионов, прошедших через мишень, использовались данные о количестве ионов, упругорассеянных на веществе мишени за время облучения. Измерение числа рассеянных ионов проводилось двумя полупроводниковыми детекторами, расположенными под углами 30° по отношению к пучку.

Таблица 2. Функции возбуждения для xn , rxn и αxn испарительных каналов, измеренные в реакции $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$

E*, МэВ	Сечение, нб										
	xn-канал				rxn-канал				αxn-канал		
	4n	5n	6n	7n	p3n	p4n	p5n	p6-7n	α3n	α4-5n	α6-7n
40.1					169				142	36	
44.3	65.1	1.0			211	2			869	74	
47.8	82.4	2.9			152	31			2341	824	
51.6	47.7	19.4	0.7		86	140			3047	3393	
54.3	17.0	34.5	1.4		11	211	1		2247	5207	
59.8	14.7	41.0	1.9		7	254	30	1	1226	7088	19
63.6	0.4	23.5	6.7	0.8	0.5	219	118	2	370	9535	34
66.4		13.6	10.7	0.9		169	145	4	297	9850	66
71.3		1.3	7.1	1.9		39	135	20	23	5685	394
75.1			3.5	3.4		14	133	54		5852	1204
79.3			0.9	3.2		3	52	69		2454	1710
87.0			0.2	1.9			2	62		1864	1828

Продукты реакций полного слияния отделялись от частиц пучка и продуктов реакций передач с помощью сепаратора SHIP [11]. Детектирующая система, расположенная в фокальной плоскости сепаратора, состояла из двух времяпролетных детекторов и 16 -стрипового позиционно-чувствительного полупроводникового детектора с энергетическим разрешением 15 кэВ для α -частиц и координатным - около $0,2 \text{ мм}$.

Для калибровки детектора по энергии использовался α -распад имплантированных в детектор нуклидов $^{207,208}\text{Ra}$, ^{215}Ac , $^{216,217}\text{Th}$, также образующихся в исследуемой реакции. Идентификация нуклидов проводилась по энергиям и периодам α -распадов, функциям возбуждения и по α - α -корреляциям между материнским и дочерними продуктами α -распада. Подробное описание параметров и характеристик детектирующей системы и электронного оборудования дано в работе [12].

При определении сечений из экспериментально измеренных выходов использовались значения эффективности сепарации, равные 33% для xn и rxn -реакций и $3,3\%$ для αxn -реакций. Эти значения были получены на основании расчетов и тестовых экспериментов.

Результаты экспериментов представлены в таблице 2. Статистическая точность измерений выходов была в настоящих экспериментах не хуже $\pm 10\%$ для сечений на уровне 15 нб . Точность определения абсолютных величин сечений оценивается нами как $\pm 40\%$ и определяется возможностью небольших систематических ошибок в измерениях тока пучка и расчетах эффективности сепарации.

3 Обсуждение результатов

Как уже говорилось, целью наших экспериментов было исследование вопроса о существовании (или отсутствии) зависимости сечений образования испарительных продуктов от масс-асимметрии во входном канале реакции для компаунд-ядер с более высокой делимостью, чем ^{200}Po . Полученные результаты, вместе с ранее известными данными для реакции $^{40}\text{Ar} + ^{181}\text{Ta}$ [13], представлены на рисунках 1а,б,в. На рисунках приведено сравнение величин сечений образования отдельных изотопов Ra , Th и Ac в максимумах их выходов для всех трех реакций, приводящих к компаунд-ядру ^{221}Ra . Чтобы исключить из рассмотрения тривиальную зависимость сечений от приведенной длины волны, сечения отнормированы на длину волны во входном канале реакции $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$.

Из рисунков видно, что для компаунд ядра ^{221}Ra зависимость сечений испарительных реакций от массы бомбардирующего иона имеет достаточно необычный характер. Отнормированные величины сечений для реакций с ионами Mg и Ar хорошо совпадают, в то время как для реакции с ионами V сечения образования испарительных продуктов



Рис.1. Максимумы поперечных сечений испарительных продуктов для реакций с ^{24}Mg , ^{40}Ar и ^{51}V . Данные отнормированы на длину волны во входном канале реакции с V

существенно меньше и не вписываются в рамки простой зависимости $\sigma \approx \pi \lambda^2$. Причем уменьшение сечений практически одинаково как для каналов реакций с испарением только нейтронов, так и для каналов с испарением заряженных частиц. Наблюдаемое для реакции с ионами ванадия уменьшение отнормированных сечений в 4-6 раз более чем в два раза превышает средние ошибки в измерении сечений, приведенные нами ранее. Различие в энергетических потерях бомбардирующих ионов в веществе мишени (потери энергии в мишени составляют $\approx 2,0$ МэВ МэВ для ионов Mg и $\approx 4,0$ МэВ для ионов V) мало по сравнению с полуширинами функций возбуждения (10 МэВ или более) и поэтому не может повлиять на отношения сечений в максимумах выходов.

Падение сечений образования испарительных продуктов в реакции с ионами ванадия трудно связать с барьерными факторами [14]. Во-первых, как видно из рис.1, величина уменьшения сечений слабо зависит от энергии бомбардирующих ионов. В широкой области энергий возбуждения компаунд ядра от 40 до 80 МэВ отношение сечений можно считать постоянным в пределах ошибок измерений. Во-вторых, расчетная величина эффективного параметра делимости χ_m для реакции $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$ равна 0,734, и при таком значении параметра трудно ожидать значительных динамических запретов на слияние и образование компаунд-ядра [15,16]. Поэтому можно предполагать, что

полученные экспериментальные результаты скорее свидетельствуют о существовании для реакций с тяжелыми ионами процессов, конкурирующих с процессом образования классического компаунд-ядра и имеющих непороговый характер. Существование в области делящихся ядер не одного, а нескольких различных процессов, ограничивающих вероятность образования компаунд-ядра, не явилось бы слишком большой неожиданностью. Скорее наоборот, для этой области ядер представляется недостаточно обоснованным предположение о 100% образовании компаунд-ядра в реакциях с тяжелыми ионами при $l \leq l_{кр}$. И экспериментальное наблюдение процессов типа "extra push" и "быстрое деление" [17] об этом свидетельствуют.

Полученные экспериментальные данные о сечениях образования испарительных продуктов в реакциях $^{24}\text{Mg} + ^{197}\text{Au}$ и $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$ достаточно интересны. Однако прежде, чем делать на их основании далеко идущие выводы, нам представляется необходимым продолжить экспериментальные исследования. С этой точки зрения было бы весьма интересно измерить сечения образования испарительных продуктов в реакции $^{82}\text{Se} + ^{139}\text{La} - ^{221}\text{Pa}$ с близким к симметричному входным каналом. Для реакции $^{40}\text{Ar} + ^{181}\text{Ta}$ необходимо провести измерения в области энергий возбуждения выше 60 МэВ, для которой они не сделаны. С методической точки зрения при проведении экспериментов было бы полезно использовать для определения параметров и рабочих характеристик экспериментальных установок калибровочные реакции на мишенях из ^{123}Sb и ^{165}Ho , приводящие к образованию одного и того же компаунд-ядра - ^{205}At . Это позволит исключить возможные систематические ошибки в измерениях и существенно улучшить точность результатов.

Список литературы

1. R.L.Hahn et al., Phys. Rev. 1987. V. C36. P.2132.
2. А.Н.Андреев, Д.Д.Богданов, А.В.Еремин и др., ЯФ. 1995. Т.58. С.1.
3. M.Blann, D.Akers, T.T.Komoto., Phys. Rev. 1982. V. C26. P.1471.
4. А.Н.Андреев, Д.Д.Богданов, А.В.Еремин и др., Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов: Дубна, 3—12 октября 1989 г. ОИЯИ, Д7-90-142, Дубна, 1990, с.499.
5. А.Н.Андреев, Д.Д.Богданов, А.В.Еремин и др., ЯФ. 1991. Т.53. С.895.

6. A.V.Yeremin, A.N.Andreyev, D.D.Bogdanov et al., Nucl. Inst. and Meth. 1994. V. A350. P.608.
7. A.N.Andreyev, D.D.Bogdanov, V.I.Chepigin et al., Nucl. Instr. and Meth. 1995. V. A364. P.342.
8. A.Wapstra et al., Atom. Data and Nucl. Data Tabl. 1988. V. 39. P.125.
9. R.L.Northcliff and R.F.Shilling., Nucl. Data Tabl. 1970. V. A7. P.233.
10. А.Н.Андреев, Д.Д.Богданов, А.В.Еремин и др., ЯФ. 1990. Т. 52. С.640.
11. G.Münzenberg et al., Nucl. Instr. and Meth. 1987. V. B26. P.294.
12. S.Hofmann., Proc. NFFS6 + AMCO9. Bernkastel Germany. 1992. P.489.
13. D.Vermeulen, H.-G.Clerc, C.-C.Sahm et al., Z. Phys. 1984. V. A318. P.157.
14. W.J.Swiatecki., Phys. Scr. 1981. V. 24. P.113.
15. J.P.Blocki, H.Feldmeier and W.Swiatecki., Nucl. Phys. 1986. V. A459. P.145.
16. A.B.Quint, W.Reisdorf, K.-H.Schmidt et al., Z. Phys. 1993. V. A346. P.119.
17. C.Ngo., Prog. Part. Nucl. Phys. Oxford; Pergamon Press. 1986. V. A422. P.139.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 января 1996 года.

Андреев А.Н. и др.

P7-96-22

Сечения образования испарительных продуктов
в реакциях $^{24}\text{Mg} + ^{197}\text{Au}$ и $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$

Измерены сечения образования продуктов испарительного канала распада для компаунд-ядра ^{221}Pa , образующегося в реакциях полного слияния с ионами ^{24}Mg и ^{51}V . Измерения проведены в диапазоне энергий возбуждения от 40 до 80 МэВ. Установлено, что во всем исследованном диапазоне энергий возбуждения сечения образования испарительных продуктов в реакции с ионами ^{51}V значительно меньше, чем в реакциях с ионами ^{24}Mg . Полученный результат находится в противоречии с общепринятыми представлениями о доминировании процесса полного слияния при эволюции двойной ядерной системы, образующейся при малых прицельных параметрах соударения и энергиях бомбардирующих ионов, превышающих барьер слияния.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Andreyev A.N. et al.

P7-96-22

Evaporation Residue Cross Sections
for the Reactions $^{24}\text{Mg} + ^{197}\text{Au}$ and $^{51}\text{V} + ^{170}\text{Er}$

Formation cross sections of evaporation products of ^{221}Pa compound nucleus formed in complete fusion reactions of ^{24}Mg and ^{51}V bombarding ions have been measured. The measurements were performed in the excitation energy region 40—80 MeV. It was ascertained that, in all the investigated excitation energy region, evaporation residue formation cross sections for the reaction with ^{51}V were significantly smaller than those for the reaction with ^{24}Mg ions. The obtained result is in contradiction with the generally accepted notion about the dominance of the complete fusion process at the evolution of dinuclear system formed at small impact parameters by bombarding ions having the energy exceeding the fusion barrier.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996