

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-44

7-97-193

На правах рукописи
УДК 539.17.012

ЧЕПИГИН
Виктор Иванович

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ
ОБРАЗОВАНИЯ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ
В РЕАКЦИЯХ «ГОРЯЧЕГО» СЛИЯНИЯ
ДЛЯ КОМПАУНД-ЯДЕР В ОБЛАСТИ ОТ Bi ДО U

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1997

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций
им. Г.Н.Флерова Объединенного института ядерных
исследований, Дубна

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Д.Д. Богданов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
профессор

В.А. Карнаухов

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Ю.В. Пятков

Ведущая организация:
НИИ Ядерной Физики МГУ, г. Москва

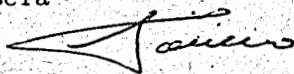
Защита состоится "17" 09 1997 года
в "10" час на заседании диссертационного совета
Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций ОИЯИ (г.Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "11" 07 1997 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

ПОПЕКО А.Г.



Общая характеристика работы

Актуальность темы

Измерение сечений различных каналов реакции, идущих через стадию образования составного ядра, является универсальным и распространенным методом исследований как термодинамических характеристик ядерной материи (температура нагретых ядер, ширины испарительных и делительных мод распадов), так и ее динамических характеристик (скорость диссипации энергии, вязкость и другие). При этом экспериментальные данные используются в качестве теста, позволяющего определять величины параметров для ядер и протекающих процессов в рамках того или иного теоретического подхода к описанию образования и девозбуждения компаунд ядра, а также зависимость этих параметров от таких экспериментально контролируемых физических величин как массовое число и заряд ядра, энергия возбуждения, переданный импульс, масс-асимметрия во входном канале реакции и т.д. Основой, на которой базируется большинство используемых теоретических подходов, является давно предложенная и хорошо известная статистическая модель девозбуждения компаунд ядра (см. например, монографию Игнатюка [1]). Однако сразу необходимо отметить, что даже в настоящее время вопросы учета в рамках статистической модели делительной моды распада трудно отнести к окончательно решенным. Проведенный около десяти лет тому назад большой цикл экспериментальных работ по измерению функций возбуждения делительной моды распада для нейтронодефицитных компаунд ядер в области от Lu до Hg , образующихся в реакциях "горячего" слияния, позволил, в рамках статистической модели, определить жидкокапельные барьеры деления для этих ядер (см. например, обзор Дж.Ньютона [2]) и привел к разработке А.Сирком новой модели для расчета их величин [3].

Для компаунд-ядер с $Z \geq 82$, образующихся в реакциях "горячего" слияния, сечение деления совпадает или близко к сечению слияния уже в околосбарьерной области энергий бомбардирующих ионов. Поэтому для этой области ядер чувствительность метода определения барьеров деления по форме и положению функции возбуждения делительной моды распада значительно уменьшается и, как следствие, резко возрастают и практически выходят за пределы реальных возможностей

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

эксперимента требования к точности измерения сечений деления, необходимой для определения величин барьеров. В тоже время, как это было отмечено еще в работе [4], в этой области ядер чувствительным и практически универсальным методом определения барьеров деления и других характеристик возбужденных ядер, использующихся при описании процесса девозбуждения компаунд ядра в рамках статистической модели испарения, может стать анализ сечений образования испарительных продуктов в реакциях "горячего" слияния. К сожалению, предложенный М.Бланом подход, практически был оставлен экспериментаторами без внимания и к началу нашей работы в области ядер от Bi до U были проведены только несколько экспериментов по измерению сечений образования нейтронодефицитных испарительных продуктов в реакциях "горячего" слияния [5, 6, 7]. К изученной можно было отнести только область близких к линии β -стабильности изотопов Tl , Pb , Bi , Po и At , для которых достаточно подробно были измерены функции возбуждения делительной моды распада в реакциях с легкими частицами (см. например, обзор А. Игнатюка [8]).

Нам представлялось, что дальнейшее продолжение исследований и достаточно подробное измерение сечений образования испарительных продуктов в области ядер от Bi до U может оказаться весьма полезным как для развития теории реакций полного слияния, так и для их правильного модельного описания. Во-первых, в этой области ядер происходит плавное уменьшение жидкокапельного барьера деления от ≈ 10 МэВ для нейтронодефицитных изотопов $Bi-Po$ до $\approx 3,0$ МэВ для нейтронодефицитных изотопов $U-Pu$. Во-вторых, в этой области ядер присутствуют ядра как с чисто жидкокапельным барьером деления, так и нуклиды со значительным оболочечным компонентом барьера деления (с $N \approx 126$). И, наконец, сечение образования испарительных продуктов для этой области ядер относительно велики и имеют значения от 10^3 до 10^{-2} мкбарн, что позволяет измерить функции возбуждения достаточно подробно при разумных затратах ускорительного времени.

Целью настоящей работы являлось систематическое измерение абсолютных сечений образования испарительных продуктов в реакциях "горячего" слияния в области компаунд-ядер от Bi до U с последующим анализом полученных данных в рамках статистической модели девозбуждения компаунд-ядра.

Научная новизна

1. Разработан и создан многоканальный детектирующий модуль для сепаратора ВАСИЛИСА, основанный на системе из двух широкоапертурных время-пролетных детекторов и многострипового ионно-имплантированного кремниевого детектора, позволяющего регистрировать ядра отдачи и их последующие α -распады.
2. С использованием сепаратора ВАСИЛИСА проведен цикл экспериментов по измерению функций возбуждения и величин абсолютных сечений образования испарительных продуктов в xp -, rxp - и αxp -каналах распада нейтронодефицитных компаунд ядер в области от Bi до U в диапазоне энергий возбуждения от 40 до (120-160) МэВ.
3. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с расчетами по статистической модели. Показано, что
а) измерение сечений образования испарительных продуктов в области компаунд-ядер тяжелее Bi является чувствительным методом для определения барьеров деления ядер;
б) сечение образования испарительных продуктов исследованной области ядер хорошо описываются стандартной статистической моделью при значениях основных параметров модели $\tilde{a}_f/\tilde{a}_\nu = 1.0$ и $C = 0,65 \pm 0,05$ и учета оболочечных эффектов в плотности уровней по Игнатюку.
4. Идентифицированы два новых α -изомера ^{189m}Bi и ^{208m}Ac . Определены энергии и периоды их α -распада.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации – 99 страницы машинописного текста, включая 26 рисунков, 23 таблицы и библиографический список из 73 наименований.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на международной конференции "6th International Conference on Nuclei far from Stability + 9th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants", Bernkastel-Kues, July 19-24, 1992 г.; на международной конференции "International Nuclear Physics Conference", Wiesbaden, July 25-30, 1992 г., Germany; на международной конференции "5th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions", Taormina, 30 May - 4 June 1994 г.; на международном совещании "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра", Санкт-Петербург, 27-30 июня 1995

г. на международной конференции "13th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications", Bad Dürkheim, Germany, September 23 – 27, 1996 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах.

Содержание работы

В первой главе диссертации рассмотрены основные характеристики сепаратора ВАСИЛИСА, рис.1, использовавшегося в качестве экспериментальной установки во всех наших измерениях [12] и изложены основные положения статистической модели. Эта установка уже более 10 лет работает на пучке и достаточно хорошо известна. Эффективность ее в зависимости от типа падающего иона равна от 3 до 25 %, , быстродействие порядка 2-3 микросекунд.

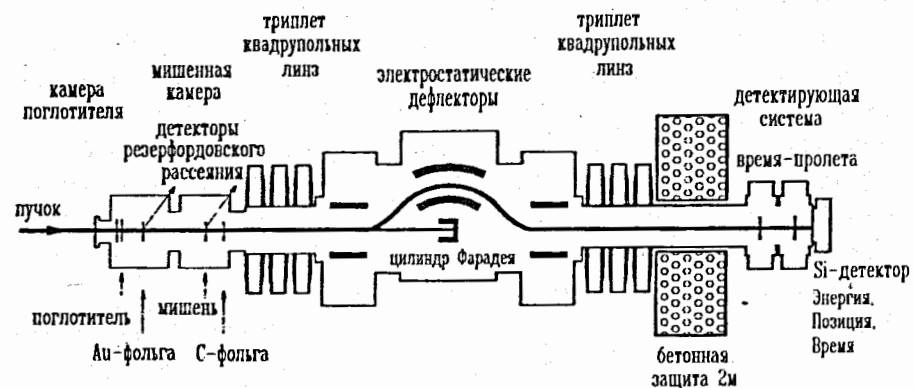


Рис. 1. Принципиальная схема установки ВАСИЛИСА.

Существенным и важным узлом любого сепаратора является детектирующее устройство. Создание и отладка современного детектирующего модуля для сепаратора ВАСИЛИСА состоящего из сборки кремниевых детекторов и время пролетной системы также являлись одной из целей данной диссертации.

В главе 2 приведено описание детектирующего модуля, расположенного в фокальной плоскости сепаратора и предназначенного для измерения энергии и скорости ядер отдачи, а также энергий и времени последующих α -распадов.

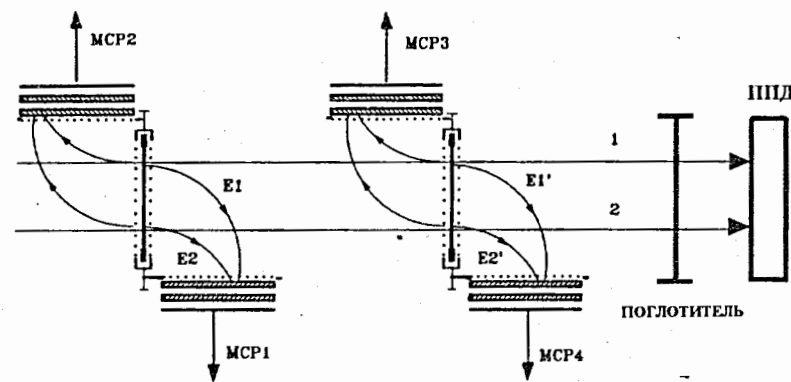


Рис.2. Общая схема детектирующей системы сепаратора.

В наших экспериментах идентификация различных каналов реакций проводилась методами α -спектрометрии с использованием генетических связей и временной корреляции α -частиц. Поэтому было необходимо разделить сигналы поступающие с ППД на сигналы от альфа-распада и ядер отдачи. Это было сделано используя антисовпадения сигнала с ППД с сигналами от ВП детекторов. Фоновые условия и чувствительность регистрации альфа распада в этом случае полностью определяются эффективностью регистрации ядер отдачи ВП системой.

Обычно в литературе используется понятие коэффициента очистки, который показывает во сколько раз система отбора уменьшает вклад ядер отдачи в альфа-спектр. Схематически детектирующий модуль показан на рисунке 2.

Он состоит из двух времяпролетных детекторов (старт и стоп) и сборки из кремниевых ППД. Принцип действия используемых нами время-пролетных детекторов основан на том, что заряженный ион, проходя через тонкую фольгу, выбивает несколько вторичных электронов, которые ускоряются затем электрическим полем и транспортируются с магнитным полем к сборке из микроканальных пластин. Пролетная база составляет 40 см.

Для ускорения выбитых из фольги вторичных электронов на нее подавалось высокое напряжение -4 кВ. Ускоренные в промежутке эмиттер - сетка до энергии 4 кэВ вторичные электроны собираются магнитным полем (≈ 50 Гс) на поверхность микроканальных пластин. Как видно из рис.2 сбор электронов осуществляется с обеих сторон

Таблица 1. Измеренные значения эффективности регистрации и временного разрешения для двух ВП-детекторов.

- а) — с суммированием сигналов от пар МКП1/МКП2 и МКП3/МКП4;
 б) — используя только МКП1/МКП4 или МКП3/МКП2 пары.

α-источник ^{226}Ra		Ядра отдачи, $E = 10 \text{ МэВ}$	
временное разрешение	коэффициент очистки	временное разрешение	коэффициент очистки
а) $560 \pm 40 \text{ пс}$	70 ± 15	$600 \pm 40 \text{ пс}$	$> 10^4$
б) $440 \pm 30 \text{ пс}$	9 ± 1	$480 \pm 30 \text{ пс}$	10^3

эмиттера и сигналы образуются на четырех независимых сборках из микроканальных умножителей. Четыре сборки необходимы для увеличения полной эффективности регистрации попадающих в детектор ядер и следовательно увеличения коэффициента очистки.

Для определения временного разрешения и эффективности регистрации системы временных детекторов, были проведены калибровочные измерения с использованием α-частиц Ra-226 и на пучке ядер отдачи, табл.1. Эффективность регистрации, измеренная для отдельных МКП детекторов на альфа-частицах, составила: $(60 \pm 3)\%$ — для МКП1 и МКП2 и $(72 \pm 3)\%$ — для МКП3 и МКП4. Измеренная в экспериментах на пучке эффективность регистрации ядер отдачи составила $(97 \pm 2)\%$. Увеличение эффективности связано с увеличением числа вторичных электронов выбиваемых из фольги тяжелым ионом.

На рис.3 приведен время-пролетный спектр, измеренный для α-частиц ^{226}Ra в режиме совпадения импульсов от двух МКП. Из рисунка видно, что временное разрешение ВП системы в этом случае составляет (440 ± 40) пс. Данный спектр получен при использовании только двух МКП. В случае использования суммирования сигналов от 2 МКП разрешающее время увеличивается до 560 псек. При работе ВП с ядрами отдачи временное разрешение остается таким же как и для α-частиц. Если говорить о коэффициентах очистки, то, как видно из таблицы, для α-частиц они равны 9 для одной пары МКП, 70 — для всех 4 МКП и, соответственно, 10^3 и $\geq 10^4$ для ядер отдачи.

По полученным характеристикам система регистрации не уступает лучшим зарубежным аналогам. Предложенная конструкция ВП-модуля была использована при разработке новой детектирующей системы на

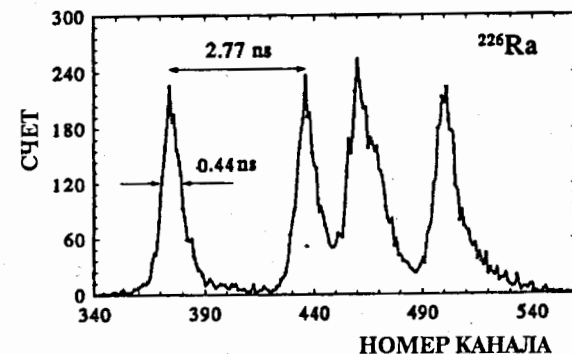


Рис. 3. Время-пролетный спектр для источника ^{226}Ra .

сепараторе SHIP GSI в Дармштате.

После прохождения времяпролетных детекторов, ядра отдачи имплантируются в полупроводниковые детекторы (ППД). Нами использовались стриповые ионно-имплантированные кремниевые детекторы с 29-ю стрипами на одном кристалле толщиной 300 микрон, изготовленных в НПО ЭЛИОН, г. Зеленоград. У этих детекторов полный размер чувствительной области равен $60 \times 60 \text{ мм}^2$, ширина стрипа $\sim 2 \text{ мм}$, промежутки между ними около 100 микрон. Энергетическое разрешение для отдельного стрипа составляет 17-18 кэВ без охлаждения. При использовании 8-ми канальной электроники [13], разработанной еще для предыдущих детекторов, подключение нескольких стрипов к одному предусилителю приводило к ухудшению энергетического разрешения в трактах до 22-25 кэВ.

В третьей главе приведены результаты измерений функций возбуждения и сечений образования испарительных продуктов в xp-, p, xp- и α, xp- каналах девозбуждения компаунд-ядер в области Bi-U.

Измерения выходов производилась 2 методами:

- а) при большом счете — по интенсивной линии в спектре,
 б) для нуклидов с малым сечением образования и не имеющих явно выделяющихся линий в спектре — используя корреляционный анализ.

Характер проводившейся обработки α-спектров проиллюстрирован на рис.4 на примере ^{226}U , получавшегося в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$.

Слева приведена часть двумерного спектра α-α-корреляций и справа — распределение временных интервалов между событиями, со-

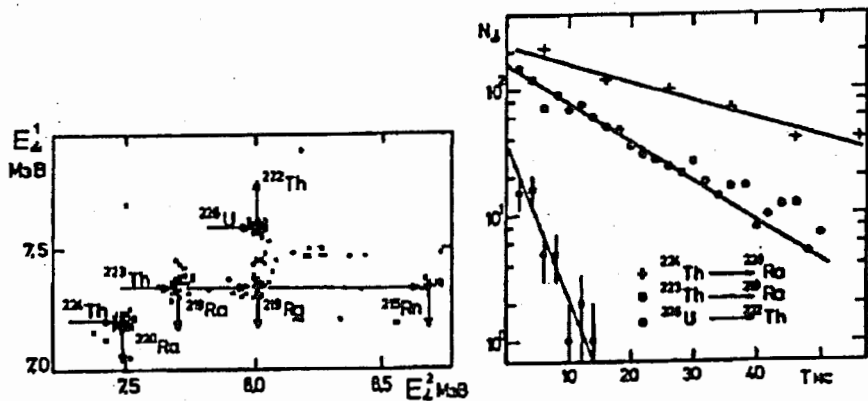


Рис.4. Часть двумерного спектра α - α -корреляций и распределение временных интервалов между событиями, составляющими корреляционные пары ^{224}Th - ^{220}Ra (+), ^{223}Th - ^{219}Ra (o) и ^{226}U - ^{222}Th (•)

ставляющими корреляционные пары. Из рисунка видно, что использование корреляционного анализа позволяет достаточно уверенно выделить события, связанные с распадом урана, хотя его интенсивность в полном α -спектре не превышает нескольких процентов.

Рисунок 5 иллюстрирует характер полученных в экспериментах результатов на примере реакции $\text{Ne} + \text{Os}$. Видно, что в данном эксперименте были измерены функции возбуждения для $x\text{p}$ -реакций с числом x от 8 до 13, для rxp -реакций с числом x от 8 до 11 и для альфа $x\text{p}$ -реакций от 9 до 11 в диапазоне изменения сечений от 10 миллибарн до микробарна.

Полный объем проведенных исследований проиллюстрирован в таблицах 2 и 3, в которой приведены исследованные реакции, с указанием величин сечений в максимумах функций возбуждения.

Если попытаться кратко охарактеризовать полученный массив данных, то можно сказать следующее:

В области компаунд ядер от Bi до U в реакциях "горячего" слияния с $A \leq 40$ измерено свыше 100 функций возбуждения для 60^{ти} различных нуклидов, образующихся в $x\text{p}$ -, rxp - и $\alpha x\text{p}$ -испарительных каналах распада возбужденных компаунд ядер. Измерения выполнены для 14-ти комбинаций мишень-налетающий ион в диапазоне энергий возбужде-

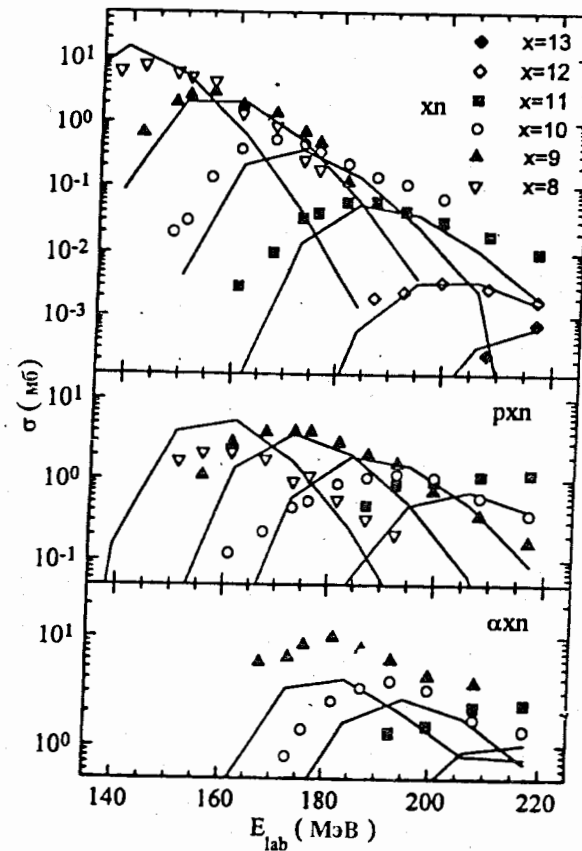


Рис.5. Функции возбуждения для $x\text{p}$ -, rxp - и $\alpha x\text{p}$ -испарительных каналов в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{190}\text{Os}$. Точки - экспериментальные данные, линии - результаты расчета.

Таблица 2. Сечения испарительных реакций в максимумах выходов (хп-канал).

Реакция	CN	3n	4n	5n	6n	7n	8n	9n	10n
$^{40}\text{Ca} + ^{151}\text{Eu}$	^{191}Bi	2.6 μb	0.9 μb						
$^{40}\text{Ca} + ^{153}\text{Eu}$	^{193}Bi	23 μb	30 μb	8 μb					
$^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$	^{199}Bi		16 mb	6 mb	4.25 mb	0.7 mb	320 μb	40 μb	9.5 μb
$^{31}\text{P} + ^{169}\text{Tm}$	^{200}Po	1.0 mb	4.5 mb	2.6 mb	146 μb^{**}	10 μb^{**}	5 μb^{**}		
$^{27}\text{Al} + ^{175}\text{Lu}$	^{202}Po	2.2 mb	17 mb	30 mb	8.4 mb	1.6 mb	0.22 mb	2.5 μb^{**}	0.4 μb^{**}
$^{40}\text{Ar} + ^{165}\text{Ho}$	^{205}At			11.5 mb	2 mb	400 μb	35 μb	3.5 μb	
$^{24}\text{Mg} + ^{181}\text{Ta}$	^{205}At			30 mb	4.5 mb	850 μb	54 μb		
$^{26}\text{Mg} + ^{181}\text{Ta}$	^{207}At		14 mb	40 mb	20 mb	8 mb			
$^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$	^{217}Ac	>145 μb	2.5 mb*		240 μb^*		2.6 μb^*		
$^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$	^{219}Ac		3 mb	6.5 mb	2 mb				
$^{20}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	^{228}U		0.8 \pm 0.4 μb	0.5 \pm 0.3 μb					
$^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	^{230}U		6 μb	2 μb	0.9 μb	0.3 μb			
			7n	8n	9n	10n	11n	12n	13n
$^{22}\text{Ne} + ^{190}\text{Os}$	^{212}Rn		28 mb	7.7 mb	3 mb	520 μb	58 μb	3.6 μb	0.75 μb

* - сечения измерены для сумм 4-5n, 6-7n и 8-9n испарительных каналов соответственно.

** - величина сечения измерена при фиксированной энергии.

Таблица 3. Сечения испарительных реакций в максимумах выходов (рхп и α хп-каналы).

Реакция	CN	p2n	p3n	p4n	p5n	p6n	p7n	p8n	p9n	p10n	p11n
$^{40}\text{Ca} + ^{151}\text{Eu}$	^{191}Bi	130 μb	>70 μb	>47 μb							
$^{40}\text{Ca} + ^{153}\text{Eu}$	^{193}Bi		1.8 mb	0.35 mb	>42 μb						
$^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$	^{199}Bi							1 mb	2.5 mb	>90 μb	
$^{40}\text{Ca} + ^{159}\text{Tb}$	^{199}At	>23 μb	110 μb	>90 μb	>3 μb						
$^{31}\text{P} + ^{169}\text{Tm}$	^{200}Po					>800 μb	290 μb	>100 μb			
$^{27}\text{Al} + ^{175}\text{Lu}$	^{202}Po							>420 μb	>180 μb	>40 μb	>10 μb
$^{40}\text{Ar} + ^{165}\text{Ho}$	^{205}At				1.3 mb	1 mb	1 mb	0.35 mb	120 μb		
$^{24}\text{Mg} + ^{181}\text{Ta}$	^{205}At				2.9 mb	1.5 mb	>1.4 mb	>250 μb			
$^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$	^{217}Ac			0.78 mb*		0.42 mb*		50 μb^*			
$^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$	^{219}Ac		>40 μb		>340 μb	>170 μb					
$^{20}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	^{228}U			0.8 \pm 0.4 μb	0.5 \pm 0.3 μb						
$^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	^{230}U				3.7 μb	2.6 μb	>0.8 μb				
$^{22}\text{Ne} + ^{190}\text{Os}$	^{212}Rn							2.2 mb	4.0 mb	1.2 mb	>1.2 mb
Реакция	CN	α 2n	α 3n	α 4n	α 5n	α 6n	α 7n	α 8n	α 9n	α 10n	α 11n
$^{40}\text{Ca} + ^{159}\text{Tb}$	^{199}At	>5 mb		>0.65 mb							
$^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$	^{217}Ac		2.8 mb	6.1 mb**		2 mb**		>0.3 mb**			
$^{22}\text{Ne} + ^{190}\text{Os}$	^{212}Rn									3.8 mb	>2.3 mb
$^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$	^{230}U	310 μb	380 μb	250 μb	310 μb	200 μb	>80 μb				

* - поперечные сечения образования измерены для сумм p,(4-5)n; p,(6-7)n и p,(8-9)n испарительных каналов, соответственно.

** - поперечные сечения образования измерены для сумм α ,(4-5)n; α ,(6-7)n и α ,(8-9)n испарительных каналов, соответственно.

ния компаунд ядер от 40 МэВ до (80–160) МэВ и диапазоне измерения сечений от 50 мб до 50 нб. Точность же измерений абсолютных величин сечений составлял в наших экспериментах $\pm 40\%$, относительная же точность была не хуже $\pm 20\%$.

В данных экспериментах были также впервые идентифицированы два новых α -изомера – ^{189m}Bi и ^{208m}Ac . К настоящему времени эти данные по изомерам подтверждены в работах других авторов [14].

В четвертой главе диссертации проанализированы некоторые общие закономерности в поведении сечений в исследованной области ядер и обсуждаются результаты сравнения экспериментальных сечений с результатами расчетов по статистической модели, причем использовался самый простой вариант модели, в котором испарительные ширины рассчитывались по Вайскопфу-Ивнингу, делительные по Бору-Уиллеру. Плотность уровней рассчитывалась по модели Ферми-газ, оболочечные эффекты в плотности уровней учитывалась по Игнатьюку, а жидкокапельный делительный барьер вычислялся по модели CPS.

Расчеты проводились с использованием компьютерных программ ALICE-MP, разработанной Музычкой Ю.А. и Пустыльником Б.И. [9] а также NIVAR, предложенной Райсдорфом [10].

Для фиттирования использовался только один свободный параметр – коэффициент C при жидкокапельном барьере деления. Необходимо отметить, что величины сечений чрезвычайно чувствительны к величине C .

На рис.6 приведено сравнение экспериментальных сечений нейтронодефицитных изотопов Bi для реакций $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ и $^{40}\text{Ca} + ^{151,153}\text{Eu}$ с расчетами. По оси абсцисс отложены числа нейтронов в конечных ядрах. Линиями изображены результаты расчетов. Видно, что оптимальным является значение $C = 0,65$. Пунктирные линии показывают результаты, полученные при расчетах с $C = 0,9$. Видно, что изменение параметра C от 0,65 до 0,9 приводит к изменению сечений более чем в 50 раз. Напомним, что точность определения абсолютных сечений образования составляет в наших экспериментах $\pm(40-50)\%$. Т.о., можно сделать вывод, что для рассматриваемых нуклидов точность определения величин коэффициента C , получаемая из сравнения расчетных и экспериментальных величин сечений будет составлять $\pm(3-5)\%$ или ± 350 кэВ для величин жидко-капельных барьеров.

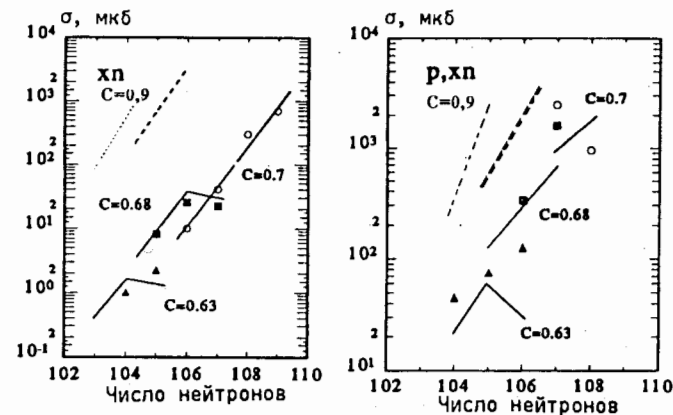


Рис. 6. Сравнение экспериментальных сечений нейтронодефицитных изотопов Bi полученных в максимумах выходов для реакций $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ и $^{40}\text{Ca} + ^{151,153}\text{Eu}$ с расчетами.

В принципе, как указывал еще раньше Бланн [11], с учетом универсальности метода и возможностью его использования для определения барьеров деления большого числа нейтронодефицитных изотопов полученная точность представляется достаточно хорошей для проведения систематических исследований величин барьеров деления.

Компильция расчетных и экспериментальных величин сечений для xp-реакций в максимумах их выходов приведена на рис.7. Использование для анализа в первую очередь данных о величинах сечений в максимумах выходов представляется предпочтительным, т.к. эти результаты нечувствительны к небольшим ($\pm 2,5$ МэВ) ошибкам в определении энергии возбуждения компаунд-ядра. Кроме того, при определении значения сечения в максимуме выхода обычно используются результаты нескольких измерений на функции возбуждения, что также позволяет уменьшить относительную ошибку и разброс данных.

Из рисунка видно, что для исследованных ядер характерно быстрое уменьшение сечений образования испарительных продуктов в xp-канале девозбуждения по мере роста их нейтронного дефицита. Средние значения факторов уменьшения величин сечений при изменении массового числа ядра-продукта на один нейтрон увеличиваются от 4^2 до $(10-15)^{2n}$ и слабо зависят от числа испаренных нейтронов. Можно

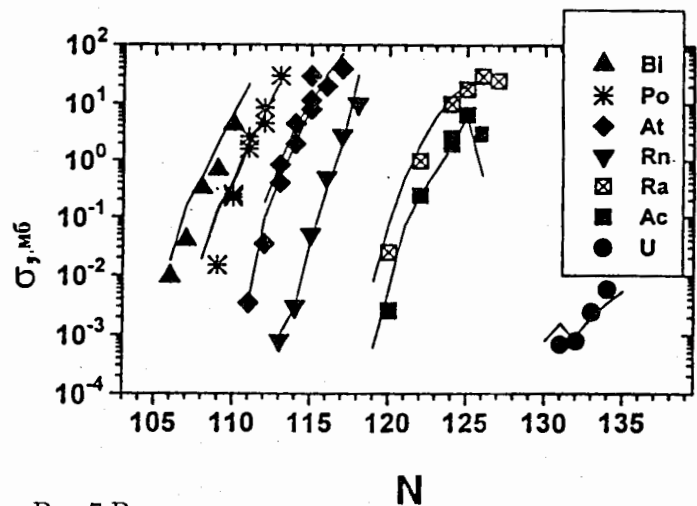


Рис.7. Расчетные и экспериментальные величины сечений в максимумах функций возбуждения в области компаунд-ядер от Bi до U.

отметить, что быстрое падение сечений для хп-канала делает эти данные наиболее критичными для сравнения с различными вариантами теоретических расчетов и предсказаний. Кроме того, т.к. измеренный для каждого Z интервал уменьшения сечения составляет (3-4) порядка величины, а общее изменение до 6 порядков, то стандартная для наших измерений ошибка в определении абсолютных величин сечений $\pm 40\%$ не может существенно повлиять на характер сделанных из этих сравнений выводов.

Линиями на рисунке показаны результаты расчета по статмодели. Из рисунка следует, что, несмотря на большой диапазон изменения сечений, расчет по статистической модели хорошо воспроизводит как относительный ход, так и абсолютные величины сечений.

Рисунок 8, в свою очередь, дает наглядное представление о больших различиях в величинах и природе барьеров деления для нуклидов, составляющих этот массив. Видно, что жидкокапельные барьеры деления уменьшаются от 7,0 МэВ для нейтронодефицитных изотопов Bi до 2,5 МэВ для нейтронодефицитных изотопов урана. Оболочечный компонент барьеров деления вначале возрастает от нуля до (5,0-7,0) МэВ при переходе от изотопов Bi к нейтронодефицитным изотопам Ra -

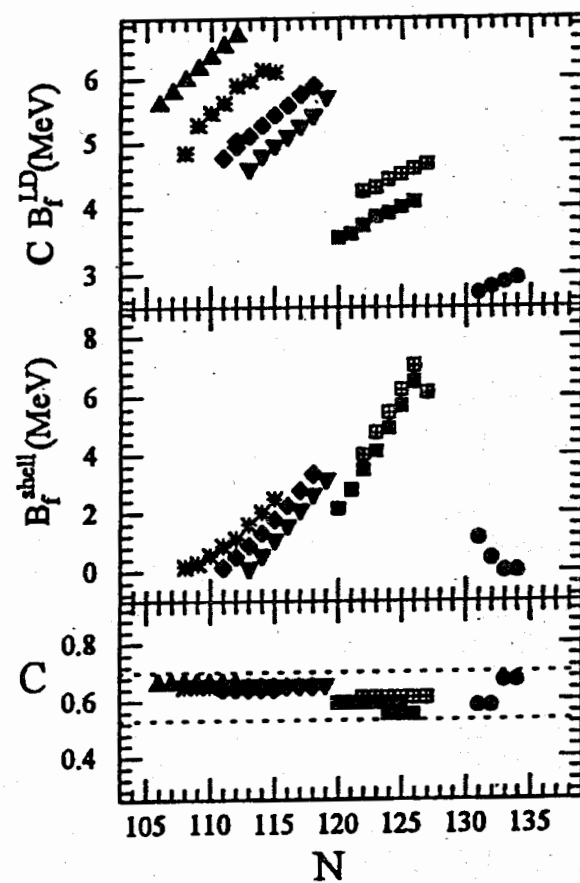


Рис.8. Величины каплевой и оболочечной компонент барьеров деления для ядер, приведенных на рисунке 7 и оптимальные значения подгоночного параметра C (пояснения смотри в тексте).

As с $N=126$, а затем снова падает до нуля для нейтронодефицитных изотопов урана. В тоже время значения величин для единственного подгочного параметра - коэффициента C - меняются слабо и для любого из нуклидов находятся в интервале от 0,68 до 0,55.

Возможность правильного расчета сечений с практически фиксированным набором модельных параметров как для ядер с нулевой оболочечной поправкой, так и для ядер, у которых оболочечная поправка составляет (5-7) МэВ и превышает жидкокапельный барьер, свидетельствует о том, что используемый в расчетах простой вариант статистической модели является хорошим приближением вплоть до энергий возбуждения компаунд ядер, равных ≈ 160 МэВ.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации

1. Для сепаратора ВАСИЛИСА создана и использована в экспериментах детектирующая система, обеспечивающая регистрацию ядер отдачи и их последующего α -распада, состоящая из двух широкоапертурных время-пролетных детекторов на основе МКП и стрипового ионно-имплантированного полупроводникового детектора. Детектирующая система имеет временное и энергетическое разрешение - 0,5 нс и (18-25) кэВ соответственно и обеспечивает дополнительную "электронную" очистку α -спектров на фактор $\geq 10^4$.

2. В области ядер от Bi до U впервые проведены систематические измерения величин сечения образования и функций возбуждения для xp -, p, xp - и α, xp - каналов девозбуждения компаунд-ядер. Измерения выполнены для компаунд-ядер Bi, Po, At, Rn, As и U, образующихся в реакциях "горячего" слияния с бомбардирующими ионами $^{20,22}\text{Ne}$, ^{24}Mg , ^{27}Al , ^{31}P , ^{40}Ar и ^{40}Ca .

Измерены свыше 100 функций возбуждения для $60^{\text{ти}}$ различных нуклидов. Измерения выполнены для 14-ти комбинаций мишень-налетающий ион в диапазоне энергий возбуждения компаунд-ядер от 40 МэВ до (120-160) МэВ и диапазоне изменения сечений от 50 мб до 50 нб. Точность измерений абсолютных величин сечений в экспериментах составлял $\pm 40\%$, относительная точность была не хуже $\pm 20\%$.

3. Из сравнения полученных данных с результатами расчетов по статистической модели девозбуждения компаунд-ядра, установлено, что

а) величина сечений образования испарительных продуктов чрезвычайно чувствительна к их дешимости и может быть использована для определения барьеров деления;

б) модель Коуена-Плазила-Святецкого хорошо воспроизводит относительные изменения жидкокапельных барьеров деления в исследованной области ядер;

в) стандартный вариант статистической модели с фиксированным набором параметров ($\bar{a}_f/\bar{a}_v=1,0$ и $C=0,63 \pm 0,05$) хорошо описывает сечения образования испарительных продуктов в исследованной области ядер.

4. Впервые идентифицированы два новых изомера ^{189m}Bi и ^{208m}As . Измерены энергии и периоды их α -распада. К настоящему времени эти данные подтверждены в работах других авторов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Andreyev A.N., Bashevov V.V., Bogdanov D.D., Chepigin V.I.,

Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Rohac J., Sharo S., Taranenko A.V., Ter-Akopian G.M., Yeregin A.V., "Large area high-efficiency time-of-flight system for detection of low energy heavy evaporation residues at the electrostatic separator VASSILISSA." // Nucl. Instr. and Meth. A, 1995, vol. 364, p. 342-348.

2. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Ерегин А.В., Кабаченко А.П., Музычка Ю.А., Орлова О.А., Пустыльник Б.И., Тер-Акопян Г.М., Чепигин В.И., Шаро Ш., "Сечения образования нейтронодефицитных изотопов At и Po в реакциях $\text{Ho} + \text{Ar}$, $\text{Tb} + \text{Ca}$ и $\text{Ta} + \text{Mg}$." // Ядерная физика, т.52, вып. 3(9), (1990) стр. 640-646.

3. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Ерегин А.В., Кабаченко А.П., Орлова О.А., Тер-Акопян Г.М., Чепигин В.И., Шаро Ш., Саламатин Л.И., "Измерение абсолютных значений α -вплек для нейтронодефицитных изотопов $^{193,195}\text{Bi}$." // Дубна, 1989, 3 с. /Сообщение Объед. ин-т ядерн. исслед.: P15-89-684/.

4. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Ерегин А.В., Кабаченко А.П., Музычка Ю.А., Попеко Г.С., Пустыльник Б.И., Тер-Акопян Г.М., Чепигин В.И., "Сечения образования нейтронодефицитных изотопов Bi и Pb в реакциях $^{40}\text{Ca} + ^{151,153}\text{Eu}$." // Ядерная физика, 1993, том 56, вып. 10, стр. 9-15.

5. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Ерегин А.В., Кабаченко А.П., Ма-

льшев О.Н., Музычка Ю.А., Пустыльник Б.И., Сагайдак Р.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., "Исследование сечений образования изотопов полония в реакциях $^{27}\text{Al} + ^{175}\text{Lu}$ и $^{31}\text{P} + ^{169}\text{Tm}$." // *Physics of Atomic Nuclei*, 1995, vol. 58, No 5, p. 730-736. *Ядерная физика*, 1995, том 58, вып.5, стр. 791-798.

6. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Еремин А.В., Кабаченко А.П., Малышев О.Н., Музычка Ю.А., Пустыльник Б.И., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., "Сечения образования нейтронодефицитных изотопов At в реакции $^{181}\text{Ta} + ^{24}\text{Mg}$." // *Дубна*, 1990, /Краткие сообщения ОИЯИ, N6[45]-90, стр. 60-65./

7. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Веселски В., Еремин А.В., Кабаченко А.П., Малышев О.Н., Оганесян Ю.Ц., Попеко А.Г., Рохач И., Сагайдак Р.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., Шаро Ш., "Статистическая модель и сечения образования испарительных продуктов в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{190}\text{Os}$ при энергиях бомбардирующих ионов 6,0 - 10,0 МэВ/нуклон." // *Дубна*, 1995, / Краткие сообщения ОИЯИ, N 5[73]-95, стр. 57-70./

8. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Muzychka Yu.A., Pustyl'nik B.I., Ter-Akopian G.M., Yeremin A.V., "Shell effects and cross-sections of formation of neutron deficient isotopes of Ac, Ra and Fr in $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ reaction." // *Nucl. Phys.*, A, 1994, vol. 568 p. 323-332.

9. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Еремин А.В., Кабаченко А.П., Орлова О.А., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., "Измерение сечений реакций с испарением легких частиц в канале полного слияния при облучении Au и Pb ионами Ne." // *Ядерная физика*, 1989, том 50, вып.9, стр. 619-625.

10. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Еремин А.В., Кабаченко А.П., Малышев О.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., "Сечения образования и характеристики распада новых α -излучателей— $^{223,224}\text{U}$." // *Ядерная физика*, 1991, том 53, вып. 4, стр. 895-899. "The new isotopes $^{223,224}\text{U}$." // *Z. Phys.*, A338, (1991) p. 363-364.

11. Ter-Akopian G.M., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Muzychka Yu.A., Popeko G.S., Pustyl'nik B.I., Saro S., Sagaidak R.N., Veselsky M., Yeremin A.V. "Production of $Z \geq 82$ heavy ion fusion evaporation residues (ER) and fissility of heavy nuclei." // *Nucl. Phys. A*, 1993, vol. 553, p.735-738.

12. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Веселски В., Еремин А.В., Кабаченко А.П., Малышев О.Н., Попеко А.Г., Рохач И., Сагайдак Р.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., Шаро Ш., "Влияние оболочечных эффектов на сечения образования нейтронодефицитных изотопов урана с $N \approx 126$." // *Дубна*, 1996, / Краткие сообщения ОИЯИ, N 3[77]-96, стр. 65-78./

Цитируемая литература

[1] Игнатиук А.В., "Статистические свойства возбужденных атомных ядер." // Москва, 1983, Энергоатомиздат, с. 176.

[2] Ньютон Дж.О., "Деление ядер под действием тяжелых ионов." // ЭЧАЯ, 1990, том 21, вып. 4, стр. 821-913.

[3] Sierk A.J., "Macroscopic model of rotating nuclei." // *Phys. Rev. C*, 1986, vol. 33 p. 2039-2053.

[4] Blann V., Akers D., Komoto T.A., Dietrich F.S., Hansen L.F., Woodworth J.G., Scobel W., Bisplinghoff J., Sicora B., Plasil F. and Ferguson R.L., "Situration analysis as a test statistical fission in heavy ion reactions." // *Phys.Rev, C*, 1982, vol. 26, p. 1471-1481.

[5] Vermeulen D., Clerc H.-G., Sahn C.-C., Schmidt K.-H., Keller J.G., Münzenberg G. and Reisdorf W., "Cross Sections for Evaporation Residue Production near the $N=126$ Shell Closure." // *Z.Phys. A*, 1984, vol. 318, p. 157-169.

[6] Sahn C.-C., Clerc H.-G., Schmidt K.-H., Reisdorf W., Arnbruster P., Hessberger F.P., Keller J.G., Münzenberg G. and Vermeulen D., "Fusion probability of symmetric heavy nuclear systems determined from evaporation- residue cross sections." // *Nucl. Phys. A*, 1985, vol. 441, p.316-343.

[7] Hahn R.L., Toth K.S., LeBeysc Y., Lagarde B. and Guide M.W., "Reactions with ^{40}Ar and ^{84}Kr leading to the same compound nucleus, ^{200}Po ." // *Phys.Rev, C*, 1987, vol. 36, p. 2132-2135.

[8] Игнатиук А.В., Смиренкин Г.Н., Иткис М.Г., Мульгин С.И., Околович В.Н., "Исследование делимости доактинидных ядер заряженными частицами." // ЭЧАЯ, 1985, т.16, вып.4, с. 709-722.

[9] Музычка Ю.А., Пустыльник Б.И., "Исследование деления доактинидных ядер." // Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов, 14-21 апреля 1983 г., Алушта. Дубна, 1983, / Препринт Объед.

ин-т ядерн. исслед.: Д7-83-664, с. 420-430./

[10] Reisdorf W., "Analysis of Fissionability Data of High Excitation Energies."// Z.Phys. A, 1981, vol. 300, p. 227-238.

[11] Beckerman M., Blann M., "Statistical-model analyses of heavy-ion-induced fusion reaction products."// Phys. Rev. C, 1978, vol.17, n.5., p. 1615-1631.

[12] Yeregin A.V., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Ter-Akopian G.M., Chepigin V.I., Gorshkov V.A., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Popoco A.G., Sagaidak R.N., Sharo S., Voronkov E.N., Taranenko A.V., Lavrentjev A.Yu., "The kinematic separator VASSILISSA- performance and experimental results."// Nucl. Instr.and Meth. A, 1994, vol. 350, p. 608-617.

[13] Андреев А.Н., Горшков В.А., Богданов Д.Д., Еремин А.В., Кабаченко А.П., Кузнецов А.Н., Тер-Акопьян Г.М., Чепигин В.И., "Многодетекторная система набора информации в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА."// Дубна, 1991, 14 с. /Сообщение Объед. ин-т ядерн. исслед.: P13-91-34/.

[14] Leino M., Uusitalo J., Enqvist T., Eskola K., Jokinen A., Loberg K., Trzaska W.H., Äystö J., "Alpha decay of the new isotopes $^{207,208}\text{Ac}$."// Z. Phys. A., 1994, vol. 348, p.151-152.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 июня 1997 года.