

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д15-2004-126

На правах рукописи

УДК: 539.172.16 + 539.172.17

Абдель Гхани Абдель Фаттах Хассан Эль-Сайед
(Египет)

**ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИЙ СЛИЯНИЯ ЯДЕР
НА ПУЧКАХ ${}^4,6\text{He}$ И ${}^7\text{Li}$**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2004

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

**Научный руководитель
доктор физико-математических
наук, профессор**

Ю.Э. ПЕНИОНЖКЕВИЧ

**Официальные оппоненты:
доктор физико-математических
наук, профессор
доктор физико-математических
наук, профессор**

**А.А. ОГЛОБЛИН
(Курчатовский Институт)
Г.М. ТЕР-АКОПЬЯН
(Объединенный институт
ядерных исследований)**

Ведущая организация:

**Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.
Скобельцына Московского государственного университета
(НИИЯФ МГУ)**

**Защита состоится “___” _____ 2004 г. в “___”
часов**

**на заседании диссертационного совета D.720.001.06 при
Объединенном институте ядерных исследований, по адресу:
141980, г. Дубна Московской области, Объединенный
институт ядерных исследований**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 2004 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук**



А.Г. ПОПЕКО

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы: В последнее время достигнуты существенные результаты в технике получения вторичных пучков радиоактивных ядер. С точки зрения понимания структуры экзотических ядер, а также динамики их взаимодействия с ядрами мишени большой интерес представляют реакции слияния этих ядер с мишенями.

Особый интерес представляет исследование реакций слияния с пучками нейтронно-избыточных ядер, для которых характерно наличие валентных нейтронов, приводящих к образованию нейтронного гало. Примером ядер с такой структурой являются ядра ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$. Как следствие более широкой распределенной плотности нейтронов в этих ядрах, по сравнению со стабильными ядрами, в реакциях слияния может осуществляться двухступенчатый процесс с предварительным захватом нейтронов, что приводит к увеличению вероятности слияния вблизи кулоновского барьера. С другой стороны эти ядра являются слабо-связанными ядрами, что должно приводить к увеличению вероятностей их развала с последующим слиянием или реакциям передачи нуклонов без процесса слияния.

Таким образом, несмотря на понимание физики происходящего процесса, до настоящего времени, не имеется достаточно полных экспериментальных данных о процессах слияния и распада составных систем, образующихся при взаимодействии пучков нейтронно-избыточных ядер с ядрами мишени. Для настоящих исследований был выбран и сформирован пучок ионов ${}^6\text{He}$ с варьируемой энергией в диапазоне 25-200 МэВ. Относительно реакций с этим ядром в настоящее время имеются противоречивые данные, одни из которых свидетельствуют об увеличении сечения слияния вблизи кулоновского барьера, а другие о подавлении сечения слияния реакции. В настоящей работе впервые были получены полные данные о процессе слияния и распаде составной системы (деления, образовании испарительных остатков, $x\text{H}$ -каналов), образующейся в реакции ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ в указанном диапазоне энергий.

При анализе исследуемых реакций с экзотическими ядрами, весьма важным является вопрос о выборе соответствующих реакций для сравнения и последующего выявления характерных особенностей в динамике взаимодействия и структуре изучаемых ядер. Нами были проведены сравнения сечений образования испарительных остатков, деления в реакциях ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$. Данные системы приводят к образованию различных составных ядер ${}^{215}\text{At}$ и ${}^{213}\text{At}$ соответственно. Чтобы исключить связанную неопределенность, с вероятностью распада этих составных ядер нами была исследована реакция ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, приводящей к образованию того же составного ядра ${}^{215}\text{At}$, как и в реакции ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$.

Главной целью работы является изучение особенностей, которые могут проявиться в реакциях, вызванных слабосвязанными ядрами (главным образом, ${}^6\text{He}$) в широком диапазоне энергий. Предметом исследования явилось изучение закономерностей реакций деления и образования испарительных остатков, с последующим сравнением реакций под действием ионов ${}^6\text{He}$ с аналогичными реакциями, с ионами ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$, приводящими к образованию и распаду близких по Z и A составных ядер.

Основные результаты и научная новизна

- 1 Создана экспериментальная установка, которая эффективно использовалась в экспериментах на вторичных пучках радиоактивных ядер относительно низкой интенсивности. Эта установка позволяет одновременно регистрировать осколки деления составного ядра и альфа-распад ядер, образованных после испарения нейтронов из составного ядра.
- 2 Впервые проведены измерения сечений деления и сечения образования испарительных остатков (соответствующих испарению $4n-8n$ из составного ядра) в реакции ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ в диапазонах энергий 23-180 МэВ.
- 3 Для выявления особенностей реакции ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ проведены исследования реакции ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, приводящей к образованию того же составного ядра ${}^{215}\text{At}$. Для этого проведены измерения сечений деления и сечения образования

испарительных остатков (соответствующих испарению $3n-9n$ из составного ядра) в реакции ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ в диапазонах энергий 30-117 МэВ.

- 4 Для сравнения с реакцией ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ проведены аналогичные измерения сечений деления и сечения образования испарительных остатков (соответствующих испарению $2n-4n$ из составного ядра) в реакции ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ в диапазоне энергий 20-110 МэВ.
- 5 Для исследования влияния типа мишени на процесс образования составного ядра, проведены исследования сечения слияния и сечения образования испарительных остатков в реакциях с ионами ${}^7\text{Li}$ на мишенях ${}^{209}\text{Bi}$ и ${}^{208}\text{Pb}$ при энергиях в диапазоне 30-220 МэВ.
- 6 Путем сравнения измеренных функций возбуждения деления и полного сечения слияния для трех исследованных реакций ${}^{4,6}\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, показано, что эти функции имеют близкие значения сечений в исследуемом диапазоне энергий возбуждения в пределах достигнутых экспериментальных погрешностей.
- 7 Проведен анализ измеренных функций возбуждения слияния и деления для исследуемых реакций ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$, ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, приводящих к образованию близких составных систем ${}^{213,215}\text{At}$ с использованием теоретических моделей RАСЕ-4 (статистической) и СС (модели связанных каналов).

Практическая значимость

Практическая значимость работы определяется предстоящим запуском и первоочередными экспериментами на комплексе вторичных радиоактивных ядер DRIBs ЛЯР ОИЯИ, и в частности на пучке ${}^6\text{He}$, энергия которого 12 МэВ/нуклон. Интенсивный пучок ${}^6\text{He}$ с такой энергии позволит исследовать механизм реакции вблизи кулоновского барьера. Экспериментальная установка, созданная в рамках диссертационной работы, будет использована в экспериментах с использованием вторичных пучков ядер, обладающими невысокой интенсивностью, и кроме этого, позволяет одновременно регистрировать различные выходные каналы

реакции. Эти эксперименты можно будет проводить как в ЛЯР ОИЯИ, так и в других научных центрах.

Апробация работы

Значительная часть результатов была получена впервые. Результаты исследований представлялись на международных конференциях и семинарах:

- 1 VII International School-Seminar on Heavy Ion Physics (27 May-1 June, 2002, Dubna, Russia).
- 2 VIII International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (17-21 June 2003, Moscow, Russia).
- 3 Conference on Nuclear and Particle Physics (11-15 Oct., 2003, Cairo, Egypt).
- 4 Conference of Young Scientists and Specialists (3-8 Feb., 2003, Dubna, Russia).
- 5 Conference of Young Scientists and Specialists, (4-8 Feb., 2004, Dubna, Russia).
- 6 International Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure NUCLEUS-2004) (22-25 JUNE, 2004, LIV, Belgorod, Russia).
- 7 International Symposium on Exotic Nuclei, (5-12 July, 2004, Peterhof, Russia).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

- 1 Создание экспериментальной установки для одновременной регистрации осколков деления и испарительных остатков при условиях низкой интенсивности пучков ионов.
- 2 Экспериментально измеренные функции возбуждения каналов деления и образования испарительных остатков (χ -каналов) в реакциях ${}^4,6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ в широком диапазоне энергий (20-180 МэВ).
- 3 Экспериментально измеренные функции возбуждения каналов деления и образования испарительных остатков (χ -каналов) в реакциях ${}^7\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$.
- 4 Экспериментальные функции возбуждения сечения полного слияния в реакциях ${}^4,6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$.
- 5 Анализ экспериментально измеренных функций возбуждения слияния и деления для исследуемых реакций (${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$,

${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$), приводящих к образованию близких составных систем ${}^{213,215}\text{At}$.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения и 4 глав, заключения и списка литературы. Диссертация написана на английском языке. Она содержит 90 страниц, включая рисунки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматривается проблема, обосновывается актуальность и задачи исследования. Сформулирована цель работы и кратко изложен материал диссертации.

Первая глава представляет описание механизма и особенностей реакций слияния в случае слабосвязанных ядер. Здесь также содержится литературный обзор исследований, проведенных по этой тематике.

Приводятся анализ имеющихся экспериментальных результатов по исследованию деления и образования испарительных остатков в реакциях с вторичными радиоактивными пучками. Подчеркивается основной предмет исследований-действительно или нет реакции со вторичными нейтронно-избыточными ядрами могут приводить к росту полного сечения слияния. Также дается анализ современных методов теоретического описания взаимодействия экзотических, нейтронно-избыточных ядер с тяжелыми мишенями. Все обзорные работы разделяются на две подгруппы по главному признаку: наблюдается или нет ли увеличение сечения слияния. Приводится итоговая Таблица с экспериментальными и теоретическими работами, выделенными по этому признаку. Этот анализ позволяет усилить постановку задачи и ответить на вопрос “существует ли увеличение сечения слияния за счет нейтронного избытка или имеет место уменьшение (по причине реакции развала) в случае с нейтронно-избыточными вторичными пучками легких ядер.

Во Второй главе описываются современные экспериментальные методы для регистрации осколков деления и испарительных остатков в реакциях. При создании настоящей установки отдалось предпочтение методикам “on-line” по сравнению с

“off-line” методом, а также установкам, обладающим высокой светосилой, что в итоге позволяет работать в условиях относительно низкой интенсивности налетающих ионов. В этом случае, особое внимание уделено методам измерения потока налетающих ионов. На основании этого делается обоснование создания новой экспериментальной установки для проведения настоящих исследований.

Схематическое изображение установки, предназначенной для одновременной регистрации актов деления и продуктов распада испарительных остатков (*xl*-каналов реакций) в режиме измерения “on-line”, представлено на Рис.1. Установка включает в себя 2 мишени (толщиной около $300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ каждая) и две пары кремниевых полупроводниковых поверхностно-барьерных детекторов (ППД), окружающих эти мишени. Мишени (в данном случае ^{209}Bi или ^{208}Pb), на ядрах которых происходит взаимодействие с ядрами пучка, размещаются под углом 45° к оси пучка. ППД имеют достаточно большой диаметр (около 5 см) и размещаются на расстоянии около 3 см от мишеней. Такая геометрия позволила добиться относительно большого эффективного телесного угла (30% от 4π), это дает возможность набирать в эксперименте достаточную статистику даже в условиях низкой ($\sim 10^4$ част/сек) интенсивности вторичных пучков. Использование установки из двух мишеней позволяет увеличить статистику в два раза, поскольку потери энергии вторичного пучка в мишени составляют величину меньшую 1 МэВ, что сравнимо с энергетическим разрешением самого вторичного пучка. Взаимное расположение каждой пары ППД относительно мишени было выбрано в соответствии с кинематикой для регистрации совпадений коррелированных пар осколков вынужденного деления.

Для получения функции возбуждения реакций с образованием осколков деления и испарительных остатков осуществлялась необходимая вариация энергии пучка ионов в диапазоне от 20-200 МэВ. С этой целью использовалась ионно-оптическая система транспортировки пучков ускорителя У400М ЛЯР ОИЯИ. Толстый (5-6 мм) поглотитель из бериллия

устанавливался по пути первичного пучка (в данном случае пучка ионов ${}^7\text{Li}$ с энергией 35 МэВ/нуклон) и выполнял двойную функцию: он служил в качестве производящей мишени для вторичного пучка или в качестве поглотителя для снижения энергии первичного пучка. Последующая монохроматизация вторичного пучка ${}^6\text{He}$ и первичного пучка ${}^7\text{Li}$ с меньшей энергией осуществлялись посредством ахроматической магнитной системой 3QDQQD2Q ускорителя У400М. Импульсный захват этой системы составлял величину около $\pm 0,7\%$, а значение энергии пучка менялось путем изменения магнитного поля системы 3QDQQD2Q.

Особое внимание было уделено регистрации и идентификации ядер испарительных остатков по α -распаду. Чтобы исключить фон от прямых реакций с образованием α -частиц, были использованы специальный “электронный ключ” и модуляция пучка. Эта методика позволяла проводить регистрацию “мгновенных” осколков деления в режиме “beam-on” и регистрацию α -частиц в режиме “beam-off” от распада ядер, образовавшихся после испускания x -нейтронов из составного ядра.

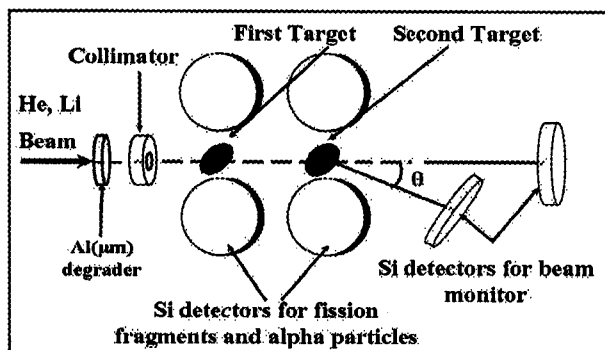


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, включающей в себя систему коллимации вторичного пучка, 2 мишени и 2 пары полупроводниковых Si-детекторов для регистрации мгновенных осколков деления и α -частиц от распада ядер-продуктов испарительных реакций.

Третья глава содержит экспериментальные результаты, полученные в данной работе по исследованию процессов деления

и образованию испарительных остатков в реакциях ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$, ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ в надбарьерной области энергий. Сечения деления были измерены в режиме "beam-on". Регистрация и идентификация долгоживущих испарительных остатков (хл-каналы реакций) были выполнены в режиме "beam-off", а для короткоживущих ядер, испытывающих α -распад (для величин периодов $T_{1/2}$ меньших 1 сек), в режиме "on-line". В случае долгоживущих ядер использовался также режим "off-line" для измерений наведенных α - и γ - радиоактивностей в облученных мишенях.

I. Измерение α -спектров ядер-продуктов испарительных каналов в реакциях ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$, ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$

Характеристики главных мод α -распада ядер, образованных в реакциях ${}^4,6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, представлены в Таблице 1. Таблица 1. Характеристики альфа-распадов изотопов ${}^{213,215-xn}\text{At}$, образующихся в реакциях ${}^4,6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ and ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$.

хп (${}^4\text{He}$)	хп (${}^6\text{He}, {}^7\text{Li}$)	Ядро- остаток	Период $T_{1/2}$	Энергия E_α МэВ
-	1n	${}^{214}\text{At}$	558 нс	8.82
0n	2n	${}^{213}\text{At}$	125 нс	9.08
1n	3n	${}^{212}\text{At}$	314 мс	7.68
2n	4n	${}^{211}\text{At}$	7.21 час	5.87 7.28 (${}^{211}\text{Po}$ 516 мс)
3n	5n	${}^{210}\text{At}$	8.1 час	5.36 - 5.52 5.3 (${}^{210}\text{Po}$ 138.4 дн.)

Для иллюстрации на Рис.2 представлен энергетический спектр α -частиц, измеренный в режиме "on-line" при α -распаде изотопов At, образовавшихся в реакции ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$. Канал с испусканием из составного ядра 3-х нейтронов, приводящий к образованию ${}^{212}\text{At}$, отчетливо идентифицируется по пику в спектре α -частиц с энергией $E_\alpha=7.8$ МэВ. Примеры спектров α -частиц, измеренных в режиме "off-line", представлены на Рис. 3 и 4. Эти спектры были получены при измерении продуктов реакций ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ и использованы для идентификации канала реакции с испарением из составного ядра 4 нейтронов,

приводящего к образованию ядра ^{211}At . Несмотря на малую статистику в суммарных спектрах α -частиц в случае изучения реакций на вторичном пучке ^6He , канал испарения $4n$ хорошо выделяется.

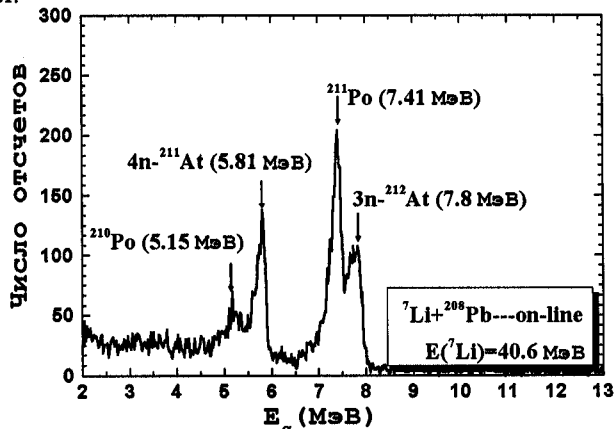


Рис. 2. Измеренный в режиме "on-line" энергетический спектр α -частиц испарительных продуктов, образовавшихся при распаде составного ядра в реакции $^7\text{Li}(41 \text{ МэВ})+^{208}\text{Pb}$.

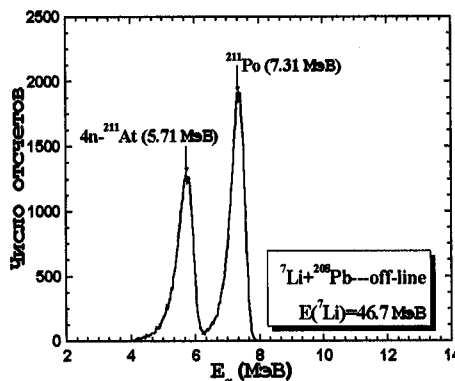


Рис. 3 Измеренный в режиме "off-line" энергетический спектр α -частиц, наблюдавшихся при распаде ^{211}At , продукта, соответствующего каналу с испарением 4-х нейтронов из составного ядра, образовавшегося в реакции $^7\text{Li}(46,7 \text{ МэВ})+^{208}\text{Pb}$.

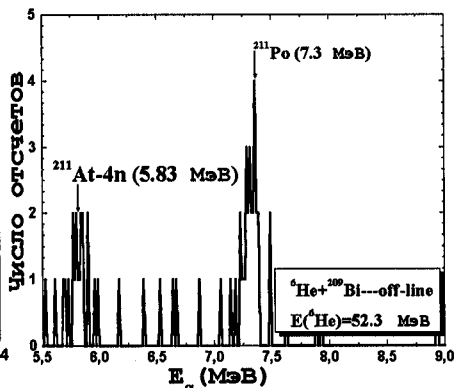


Рис. 4 Энергетический спектр α -частиц, наблюдавшихся в реакции $^6\text{He}+^{209}\text{Bi}$ и соответствующих ^{211}At как продукту испарения из составного ядра 4-х нейтронов, при энергии пучка ^6He 52,3 МэВ.

II Идентификация ядер-продуктов реакций “слияние-испарение” по γ -излучению при облучении ${}^7\text{Li}$ мишеней из ${}^{208}\text{Pb}$

Для реакций ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ и ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ были исследованы продукты, образовавшиеся после испарения из составной системы от 5-ти до 9-ти нейтронов (будем называть их продуктами $5n$ - $9n$ испарительных каналов) в режиме “off-line” по характеристическому γ -излучению. Идентификация ядер была проведена при анализе измеренных нами γ -спектров с выделением пиков с характерными для синтезируемых ядер значениями энергий γ -переходов и периодов полураспада ($T_{1/2}$). На Рис.5 представлен энергетический спектр γ -лучей, полученный для продуктов реакции ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ при энергии бомбардирующих ионов 67 МэВ, а на Рис. 6 приведены кривые изменения со временем интенсивности выделенных нами линий γ -лучей для определения периодов $T_{1/2}$ и идентификации образовавшихся ядер.

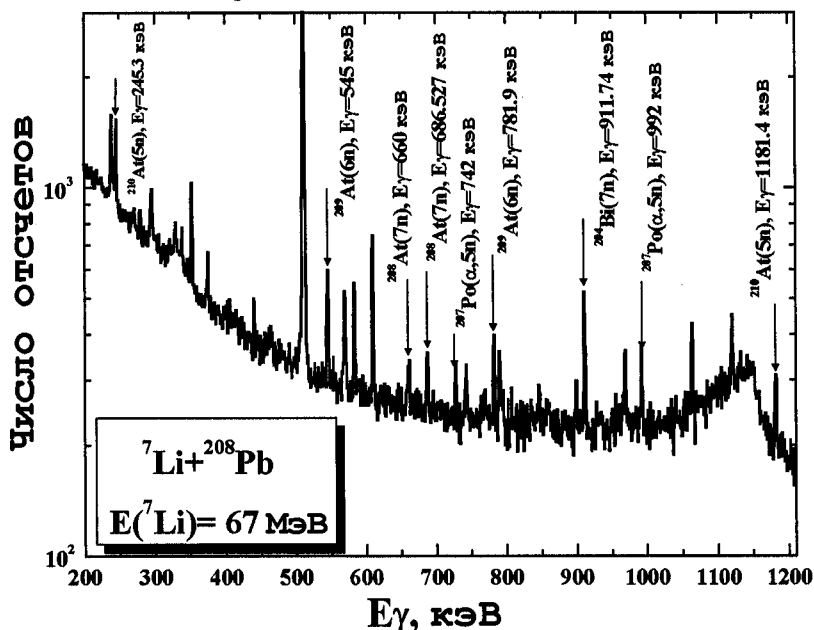


Рис. 5. Энергетический спектр γ -лучей и идентификация ядер-продуктов реакций с испарением $5n$ - $7n$ нейтронов при облучении ионами ${}^7\text{Li}$ (67 МэВ) мишени из ${}^{208}\text{Pb}$.

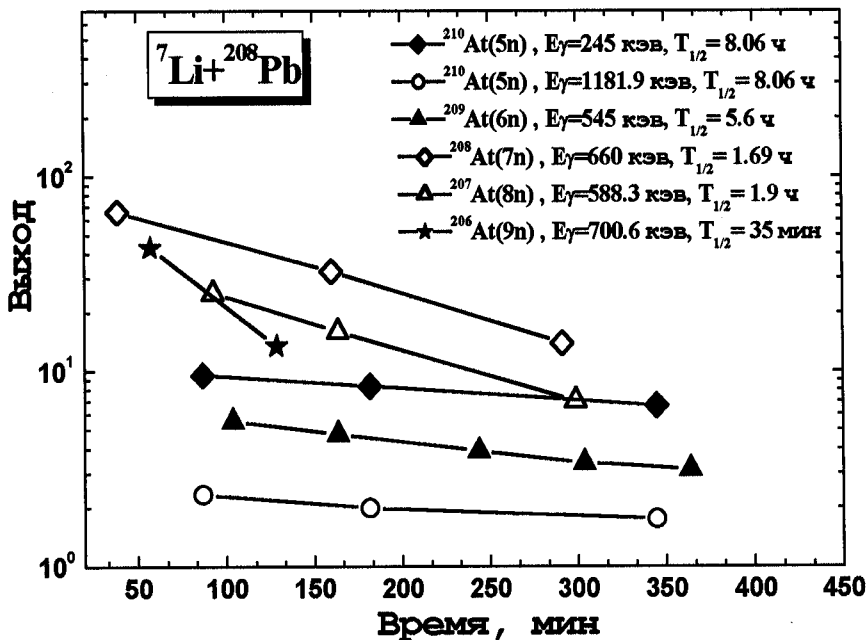


Рис. 6. Кривые распада для характерных γ -линий наведенной в мишенях γ -активности в реакции ${}^7\text{Li}(67 \text{ МэВ}) + {}^{208}\text{Pb}$ (идентификация характерных γ -линий для ядер-продуктов $5n$ - $9n$ испарительных каналов в указанной реакции).

III Измерение осколков деления в реакциях ${}^4,6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$, ${}^7\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ и ${}^7\text{Li} + {}^{209}\text{Bi}$

Регистрация коррелированных пар осколков деления проводилась каждой парой Si-детекторов в совпадении, а изменение энергии налетающих ионов позволила получить функцию возбуждения деления, т.е. зависимость сечения деления ядер мишени ядрами налетающих ионов в зависимости от их энергии. Совпадение двух осколков деления позволяло четко выделять процесс деления от других каналов реакции, как это представлено на Рис.7.

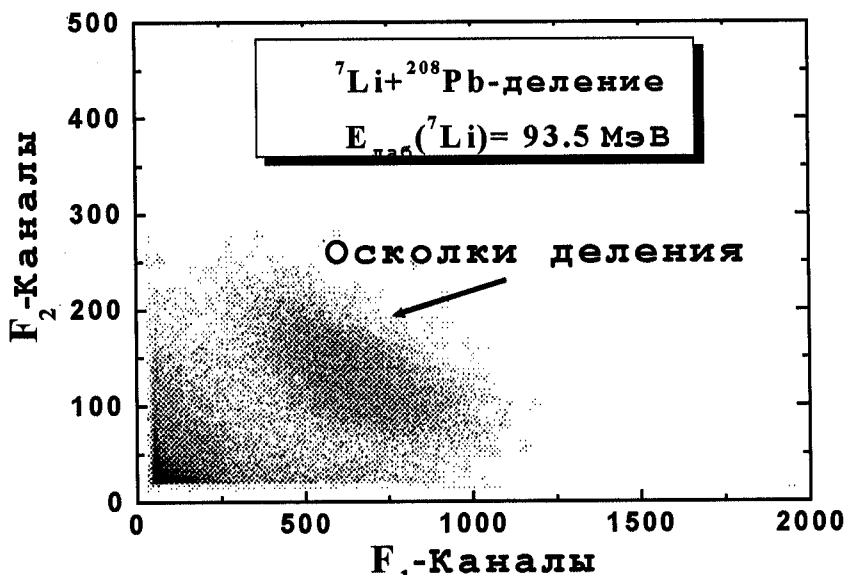


Рис. 7. Двухмерная матрица выходов двух коррелированных продуктов реакции от их энергии (в каналах). Область, соответствующая образованию осколков деления, отчетливо отделяется от других продуктов реакций.

Глава четвертая: В главе дается анализ экспериментальных значений сечений деления и образования испарительных остатков, полученных для исследуемых реакций. На Рис. 8 представлены экспериментальные функции возбуждения деления, полученные для исследуемых реакций ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$, ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$. На верхней части Рис. 8а представлена экспериментально измеренная в настоящей работе функция возбуждения для реакции ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ в надбарьерной области энергий в сравнении с результатами исследований работы [2], полученными при энергии вблизи кулоновского барьера. На Рис. 8б и Рис. 8с представлены аналогичные зависимости для реакций ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, соответственно, в широком диапазоне энергии налетающих ионов от кулоновского барьера до 200 МэВ. Необходимо заметить, что представленные функции возбуждения для исследуемых реакций были измерены впервые при столь высоких энергиях возбуждения.

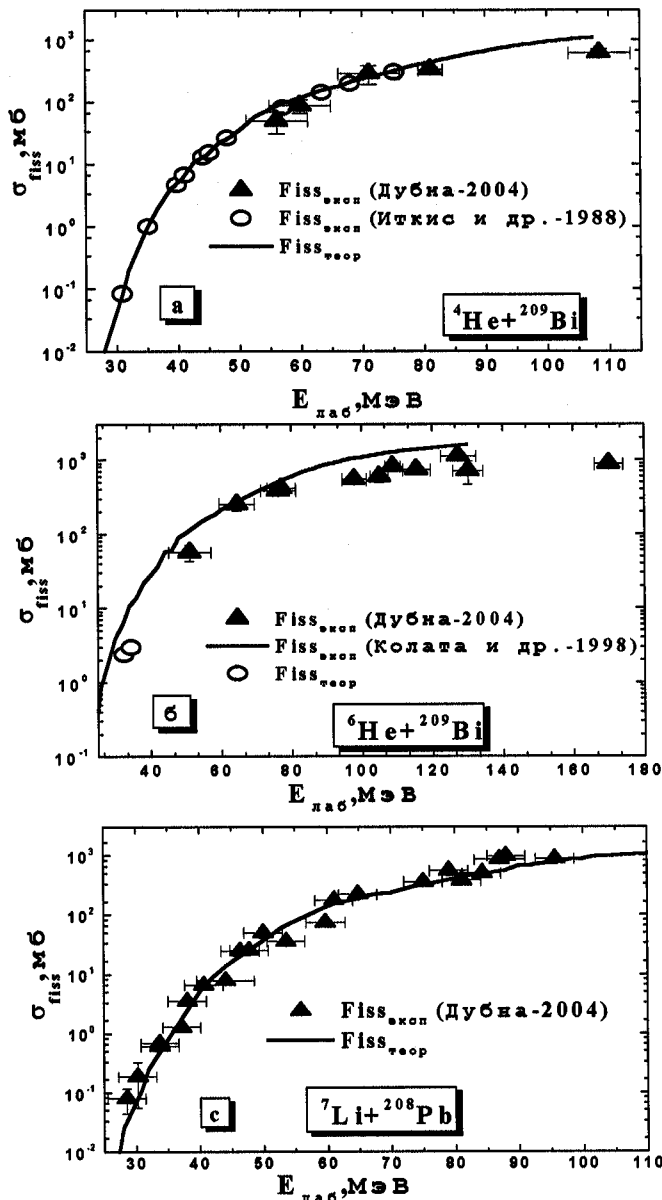


Рис. 8 Экспериментальные зависимости сечений деления ${}^4\text{He} + \text{Bi}$ и ${}^7\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ от энергии налетающих ионов (в лабораторной системе). Символами представлены полученные экспериментальные данные, а сплошными кривыми результаты расчетов по программе PACE-4.

Сравнительный анализ функций возбуждения для трех исследованных реакций ${}^4,6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ показывает (Рис. 9), что в пределах экспериментальных погрешностей эти функции имеют близкие значения сечений деления в широком диапазоне энергий возбуждения. Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что процесс деления в этих реакциях имеет одинаковый характер, без проявления особенностей входного канала и, вероятно, определяется только свойствами образовавшегося составного ядра At. Нужно отметить, что нет также значительной разницы в делении высоковозбужденных составных ядер ${}^{213}\text{At}$ и ${}^{215}\text{At}$.

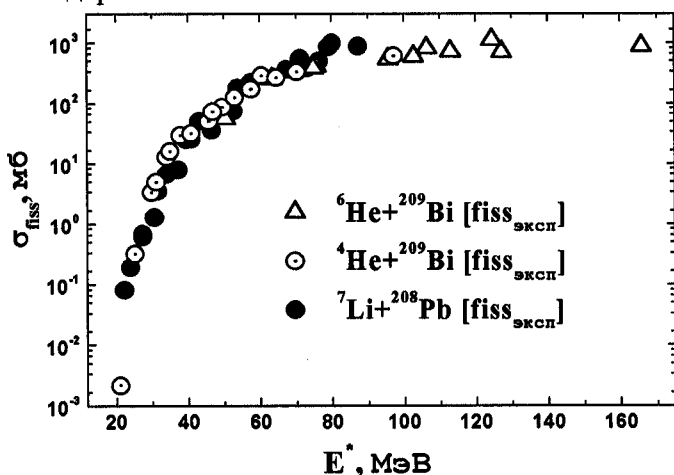
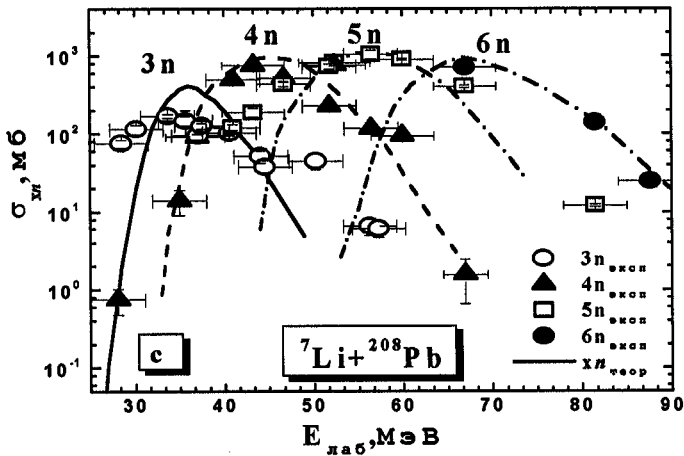
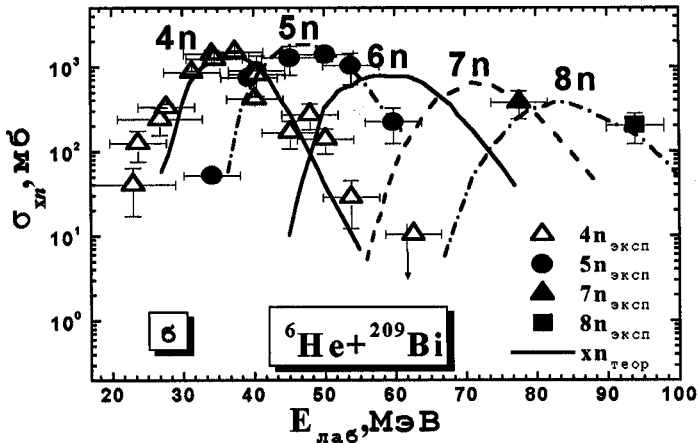
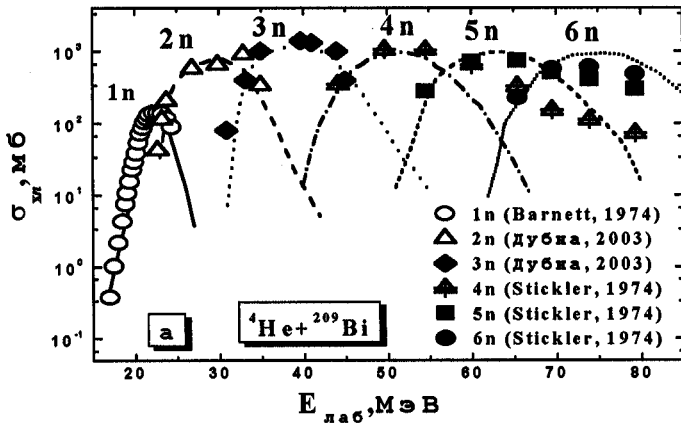


Рис. 9. Экспериментальные зависимости сечений деления от энергии возбуждения для реакций ${}^4,6\text{He}+\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$.

Экспериментальные данные по измерению сечений образования испарительных остатков, представлены на Рис. 10 а, б, с и д. Так, на Рис. 10а представлены измеренные функции возбуждения для $1n$ - $6n$ каналов. Данные для $1n$ -канала заимствованы из работы [3], для каналов $5n$ - $6n$ из работы [4]. Данные для $2n$ - $4n$ каналов измерены в настоящей работе. На Рис. 10б представлены полученные данные для $4n$ - $8n$ каналов в реакции ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$. Все функции возбуждения для реакции ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, представленные на Рис. 10с и 10д, получены впервые в настоящей работе.



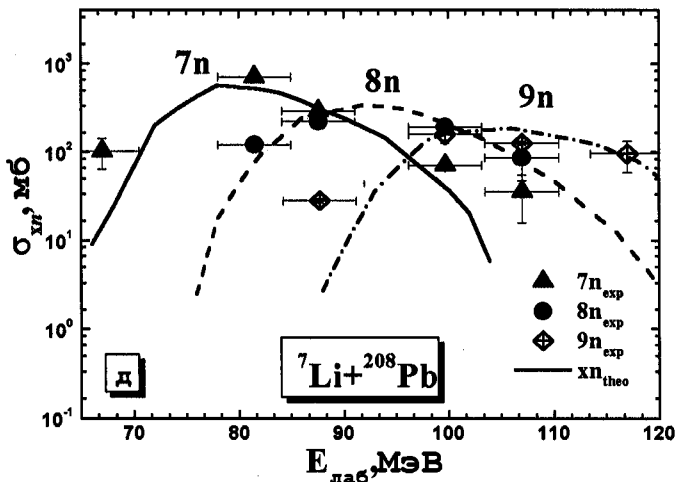


Рис.10 Экспериментальные зависимости сечений образования испарительных остатков (xn -каналов) от энергии бомбардируемых ионов для реакций ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$. Кривыми представлены результаты расчетов с использованием программы PACE-4.

Анализ измеренных функций возбуждения деления составных ядер и продуктов xn -каналов (т.е. остатков после испарения x -нейтронов) был проведен, используя код PACE-4 [5]. Результаты расчетов на основе этой модели представлены на Рис.8 и Рис.10 в виде кривых. Видно, что удается получить удовлетворительное описание экспериментальных данных для трех исследуемых реакций при близком наборе фитируемых параметров. Значения этих параметров приводятся для реакции с ${}^7\text{Li}$: радиус $r_0=1.3$ фм, максимальный угловой момент $l_{max}=35$ и глубина потенциала $v_0=67$ МэВ. Для реакции ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ были получены близкие по значению параметры $r_0=1.35$ фм, $l_{max}=40$ и $v_0=45$ МэВ. Таким образом, подтверждается сделанный ранее вывод о том, что в исследуемых реакциях ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$, ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ в надбарьерной области энергий возбуждения происходит образование и распад близких составных систем ${}^{213,215}\text{At}$ без проявления особенностей входного канала.

На основе измеренных функций возбуждения для деления и образования испарительных остатков были построены функции возбуждения сечений полного слияния. Эти результаты представлены на Рис. 11. Анализ этих функций возбуждения был проведен с использованием модели “связанных каналов и “CCFULL”-код [Ref.6]. Этот метод позволял оценить вклад процессов развала налетающих ионов в поле ядра мишени с возможным последующим слиянием. Результаты расчетов сечений полного слияния по этой модели в зависимости от энергии (в с.ц.м.) представлены на Рис. 11 в виде кривых. Видно, что экспериментальные значения сечений полного слияния для реакций ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ при энергиях вдали от барьера имеют меньшие значения, чем расчетные, что составляет примерно одинаковую величину 78%. А при значениях энергии вблизи барьера экспериментальные значения сечения близки к расчетным. Вероятно, этот факт свидетельствует о том, что при больших энергиях возбуждения может иметь место процесс развала слабосвязанных ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$, как указывалось выше. Возможным объяснением могут быть одинаковые процессы развала, имеющие место как в случае взаимодействия с пучком ядер ${}^4\text{He}$, так и в случае слабосвязанных ядер, каковыми являются ${}^6\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$. Существуют модели, на основании которых эти ядра можно представить, как связанную систему из “кора” (${}^4\text{He}$) и двух нейтронов или тритона, соответственно. Видимо, имеет место процесс развала налетающих ионов в поле ядра мишени с последующим слиянием кора с ядрами мишени и делением полученного составного ядра. Как показывают литературные данные, вклады процессов деления ядер Bi нейтронами [7] или Pb тритонами [8] малы, измеренные сечения этих реакций находятся на уровне $\mu\text{б}$

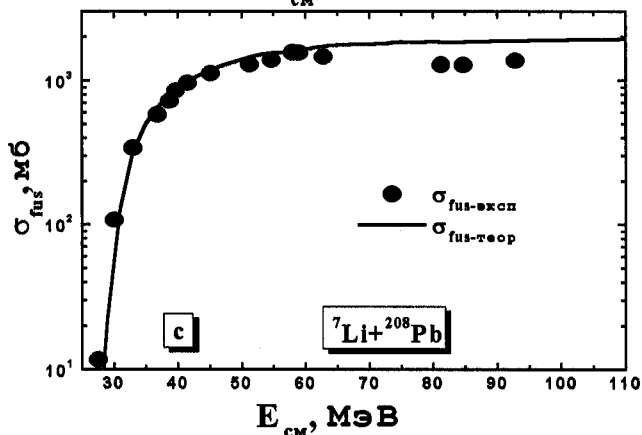
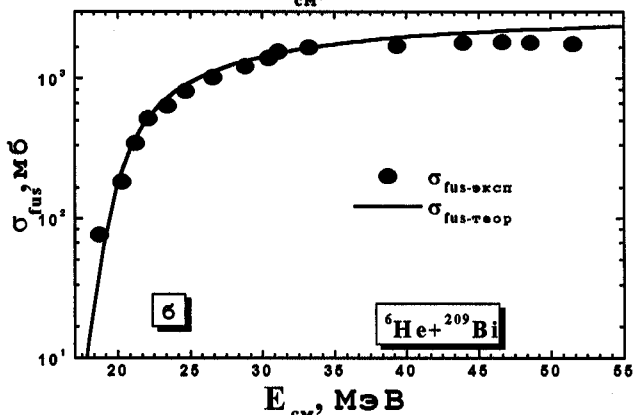
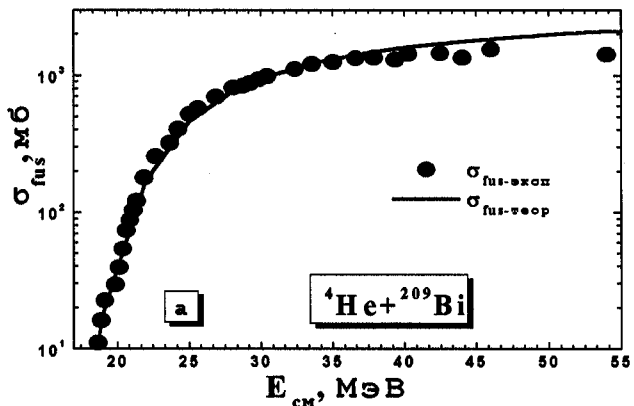


Рис. 11. Экспериментальные зависимости сечений полного слияния ${}^4\text{He} + \text{Bi}$ и ${}^7\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ от энергии в с.ц.м. Кривые получены с использованием модели "связанных каналов" - код CCFULL

Для исключения влияния кулоновского барьера на процесс слияния, функции возбуждения были построены в зависимости от величины E_{cm}/V_B , где E_{cm} значение энергии в системе центра масс, а V_B кулоновский барьер для каждой системы. Это сравнение показано на Рис. 12. Из рисунка видно, что в пределах экспериментальной погрешности функции возбуждения для всех трех реакций одинаковы в широком диапазоне значений E_{cm}/V_B .

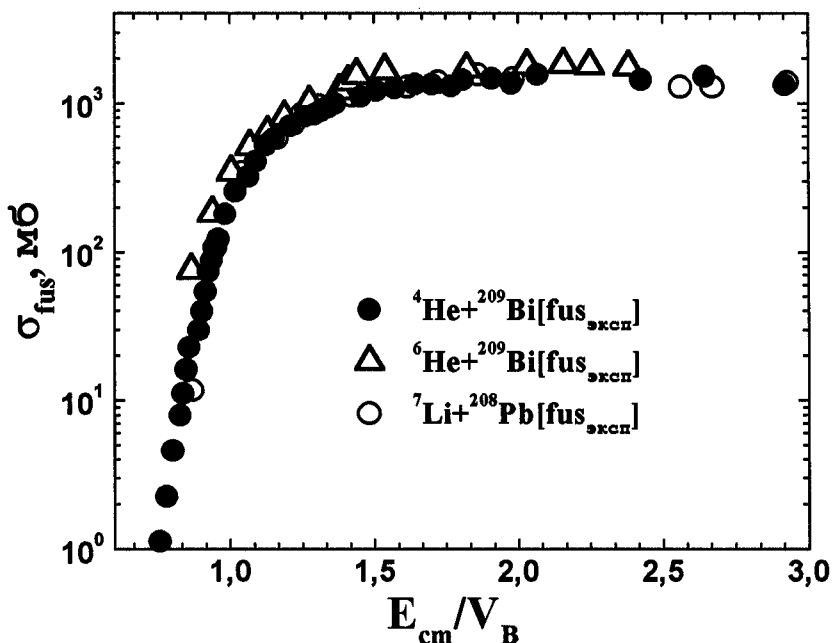


Рис. 12. Функции возбуждения для полного слияния в зависимости от величины E_{cm}/V_B для реакций ${}^4\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$

Проведенные измерения позволяют выявить влияние типа мишени на процесс деления и слияния. Для этого был проведен анализ сечений в реакциях, вызванных одним и тем же ионом ${}^7\text{Li}$ при различных энергиях в диапазоне 30-220 МэВ, на мишенях ${}^{208}\text{Pb}$ и ${}^{209}\text{Bi}$. Проведено сравнение функций возбуждения деления и χ -каналов, а также функций возбуждения полного сечения слияния. Как видно из Рис.13, процесс слияния-деления в

реакциях ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$ имеет аналогичный характер. Таким образом, не выявлено никакой зависимости от типа мишени на механизм реакций слияния, индуцированных ионами ${}^7\text{Li}$.

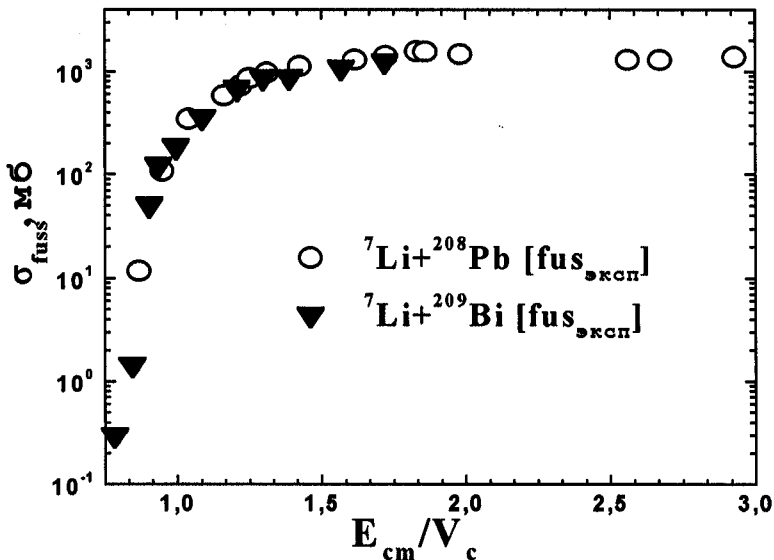


Рис.13 Экспериментальные зависимости сечений полного слияния ${}^7\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ от величины отношения энергии в с.д.м. к величине кулоновского барьера.

Заключение

Представленных результатов наиболее существенными являются следующие:

- 1 Создана экспериментальная установка, которая может быть использована эффективно в экспериментах на вторичных пучках радиоактивных ядер низкой интенсивности. Эта установка позволяет одновременно регистрировать осколки деления составного ядра и альфа-распад ядер, образованных после испарения нескольких нейтронов из составного ядра.
- 2 Получены значения сечений деления и сечений образования испарительных остатков [$3n-9n$] в реакциях взаимодействия

- ионов ${}^7\text{Li}$ при энергиях 28-220 МэВ с мишенями ${}^{208}\text{Pb}$ и ${}^{209}\text{Bi}$.
- 3 Измерены сечения деления в реакциях взаимодействия ионов ${}^6\text{He}$ при энергиях 50–180 МэВ с мишенью ${}^{209}\text{Bi}$.
 - 4 Измерены сечения образования испарительных остатков $[4n-8n]$ в реакциях взаимодействия ионов ${}^6\text{He}$ при энергиях 23–95 МэВ с мишенью ${}^{209}\text{Bi}$.
 - 5 Измерены сечения деления и $[2n-3n]$ -испарительных каналов в реакциях, вызванных ионами ${}^4\text{He}$ с мишенью из ${}^{209}\text{Bi}$ при энергиях в диапазоне 20-110 МэВ.
 - 6 Сравнения измеренных функций возбуждения деления и полного сечения слияния для трех исследованных реакций ${}^4,6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, показало, что в пределах достигнутых экспериментальных погрешностей эти функции имеют близкие значения в широком диапазоне энергий возбуждения.
 - 7 С точки зрения механизма ядерных реакций, вызванных слабосвязанными ионами, проведен анализ экспериментально измеренных функций возбуждения слияния и деления для исследуемых реакций ${}^4\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$, ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$, приводящих к образованию близких составных систем ${}^{213,215}\text{At}$. Этот анализ проведен с использованием теоретических моделей “PACE-4 и CCFULL”-кодов.

Цитируемая литература:

- 1 M. Dasgupta et al., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 48, 401 (1998).
- 2 M.G. Itkis et al., Particles Nuclei (Russian), 19, p.701(1988).
- 3 A.R. Barnett and J.S. Lilley, Phys. Rev C9, 2010 (1974)
- 4 J.D. Stichler and K.J. Hofstetter, Phys. Rev C9, 3(1974).
- 5 <http://dnr080.jinr.ru/lise/>
- 6 <http://nrj.jinr.ru/nrv/>
- 7 V. P. Eismont et al., Phys. Rev. C 53, 2911-2918 (1996)
- 8 O. Häusser et al., Phys. Lett. 38B, 75 (1972)

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

- 1 **A.A. Hassan**, S.M. Lukyanov, R.Kalpakchieva, N. K. Skobelev, Yu.E. Penionzhkevich, Z. Dlouhy, S.Radnev, and N.V. Poroshin "SETUP FOR FISSION AND EVAPORATION CROSS SECTION MEASUREMENTS IN REACTIONS INDUCED BY SECONDARY BEAMS", JINR–Preprint E7-2002-118, Dubna (2002) and Physics of Atomic Nuclei, V66, No 9, P(1-4), (2003).
- 2 **A.A. Hassan**, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich, L.R. Gasques, L.C. Chamon, A. Szanto de Toledo "Study of the ^4He on ^{209}Bi fusion reaction", JINR–Preprint E15-2003-186, Dubna (2003) (Submitted to Physics of Atomic Nuclei).
- 3 **A.A. Hassan**, S.M. Lukyanov, R. Kalpakchieva, Yu.E. Penionzhkevich, R. Astabatyan, I. Vinsour, Z. Dlouhy, A.A. Kulko, S. Lobastov, J.Mrazek, E. Markaryan, V. Maslov, N.K. Skobelev, Yu.G. Sobolev "Study of fusion reactions induced by ^4He and ^7Li beams on the ^{208}Bi and ^{208}Pb targets", JINR–Preprint P15-2004-122, Dubna (2004) (Submitted to Physics of Atomic Nuclei).
- 4 **A.A. Hassan**, "Excitation Function of the $^4\text{He}+^{209}\text{Bi}$ Fusion Reaction", Proc. of 7th conference of Young Scientists and Specialists, (JINR, Dubna, Russia, 2003), p. (67-70).
- 5 **A.A. Hassan**, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich, R. Kalpakchieva, R. Astabatyan, I. Vinsour, T. Zholdybaev, Z. Dlouhy, S.P. Lobastov, V.A. Maslov, E. Markaryan, J. Mrazek, Yu.A. Muzychka, N.K. Skobelev, Yu.G. Sobolev "STUDY OF THE FUSION-FISSION REACTIONS INDUCED BY WEAKLY BOUND NUCLEI", Proc. of 8th conference of Young Scientists and Specialists, (JINR, Dubna, Russia, 2004), p.(140-143).
- 6 **A.A. Hassan**, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich "Study of the fusion reaction induced by ^4He on ^{209}Bi ", Proc. of 4th Conference on Nuclear and Particle Physics Egyptian Nuclear Physics Association (ENPA), Cairo, Egypt, 2003), p. (23-24).

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 10.08.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,32. Тираж 100 экз. Заказ № 54554.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/