

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-2013-60

На правах рукописи

ИТКИС

Юлия Михайловна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СВОЙСТВ ДЕЛЕНИЯ И КВАЗИДЕЛЕНИЯ $^{135}\text{Sb}^*(Z=108)$
ПРИ ЭНЕРГИЯХ ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 2013

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Э. М. Козулин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Д. О. Еременко

доктор физико-математических наук

И. Н. Изосимов

Ведущая организация:

Радиевый институт им. В.Г. Хлопина,
г.Санкт-Петербург


Защита диссертации состоится «__» _____ 2013г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д.720.001.06 на базе Объединенного института
ядерных исследований по адресу: 141980, Московская обл., г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Андрей Георгиевич
Попеко



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы значительно вырос интерес к процессам столкновения тяжелых ядер при энергиях вблизи кулоновского барьера, обусловленный недавними успехами в синтезе сверхтяжелых ядер. При слиянии дважды-магического ядра ^{48}Ca с мишенями-актинидами в ЛЯР ОИЯИ впервые были синтезированы сверхтяжелые элементы с $Z = 112-118$. Получение новых сверхтяжелых элементов является одной из важнейших задач современной ядерной физики. Эти исследования подтверждают возможность существования острова стабильности вблизи протонных оболочек $Z = 114$ (а, возможно, и $Z = 120, 122$) и нейтронной оболочки $N = 184$. В связи с тем, что ^{249}Cf является наиболее тяжелым актинидом, который может быть использован в качестве мишенного материала, для синтеза сверхтяжелых элементов с $Z > 118$ необходимо использовать реакции с более тяжелыми налетающими ионами ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe . Для получения информации о возможности образования новых сверхтяжелых ядер в таких реакциях необходимы более глубокие экспериментальные исследования механизмов реакций.

Основными каналами реакций с тяжелыми ионами являются упругое и квазиупругое рассеяние, реакции глубоко-неупругих передач, квазиделение, образование составного ядра с последующим его девозбуждением или делением. При таком многообразии выходных каналов реакции для исследования динамики взаимодействия двух тяжелых ядер необходимо оценивать вклад каждого процесса в сечение реакции.

В реакциях с тяжелыми ионами процессы полного слияния и квазиделения являются конкурирующими. Соотношение вкладов деления и квазиделения в полное сечение взаимодействия иона и мишени сильно

зависит от свойств входного канала реакции, таких как массовая асимметрия, деформация взаимодействующих ядер, величина кулоновского параметра Z_1Z_2 , энергия налетающего иона, вносимый в систему угловой момент. Для сверхтяжелых систем процесс квазиделения становится доминирующим, подавляя канал формирования составного ядра.

Разделение продуктов реакций слияния-деления и квазиделения является сложной экспериментальной задачей, что обуславливает необходимость проведения многопараметрических экспериментов с измерением как можно большего числа наблюдаемых характеристик взаимодействия двух ядер, таких как массовые и энергетические распределения фрагментов реакций, а также более глубокого изучения свойств сопутствующей этим процессам эмиссии легких частиц.

Цель работы состояла в исследовании свойств массовых и энергетических распределений фрагментов деления и квазиделения, полученных в реакциях с ионами ^{22}Ne , ^{26}Mg , ^{36}S и ^{58}Fe , ведущих к образованию изотопов $^{266,271,274}\text{Hs}^*$, при энергиях выше и ниже кулоновского барьера, а также характеристик нейтронной эмиссии, для получения критериев разделения процессов деления и квазиделения сверхтяжелых составных систем.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Результаты измерений массово-энергетических распределений бинарных фрагментов, образующихся в следующих реакциях: $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$, $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ при энергиях выше и ниже кулоновского барьера.

2. Разработанный метод разделения процессов слияния-деления и квазиделения на основе анализа энергетических распределений фрагментов реакции.
3. Результаты измерений сечений захвата и оценка вероятности слияния для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$, полученная из анализа массово-энергетических распределений.
4. Результаты измерений полной множественности нейтронов и ее разложения на пред- и постделительную компоненты, их зависимость от массы фрагментов для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$.
5. Впервые было обнаружено бимодальное деление $^{274}\text{Hs}^*$, полученного в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ при начальной энергии возбуждения 35 МэВ.

Основные результаты и научная новизна

Впервые измерены массово-энергетические распределения фрагментов деления и квазиделения для реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$. Впервые измерены полная, пред- и постделительная множественности нейтронов для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$. Впервые для разделения процессов слияния-деления и квазиделения был применен метод, основанный на анализе характеристик энергетических распределений фрагментов исследуемых реакций. Впервые обнаружено явление бимодального деления составного ядра $^{274}\text{Hs}^*$, полученного в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ при начальной энергии возбуждения 35 МэВ.

Практическая значимость работы

Разработанный метод анализа массовых и энергетических распределений может быть использован для решения широкого класса задач, связанных с исследованием процессов слияния-деления и

квазиделения, протекающих в реакциях с тяжелыми ионами. Полученные в работе экспериментальные данные могут использоваться для проверки теоретических моделей, описывающих процесс взаимодействия тяжелых ядер.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на следующих научных мероприятиях:

- “The study of the characteristics of neutron emission in the reactions with ^{48}Ca ions”, The International Conference on Nuclear Physics At Border Lines, Lipari (Messina), Italy, May 21-24, 2001.
- “Fission and Quasi-Fission of Nuclei Produced in the Reactions with ^{48}Ca Ions”, The International Symposium on New Projects and Lines of Research in Nuclear Physics, Messina, Italy, October 24-26, 2002.
- “Neutron Emission in Fission and Quasi-Fission”, The International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2004), Peterhof, Russia, July 5-12, 2004.
- “Neutron Emission in Fission and Quasi-fission of Hs”. The International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2009), Sochi, Russia, September 28 - October 2, 2009.
- “Competition between fusion-fission and quasifission in the reactions with heavy ions leading to the formation of Hs”. The International Conference on Dynamical Aspects of Nuclear Fission (DANF 2011), Smolenice Castle, Slovak Republic, October 17-21, 2011.
- “Fusion-fission and quasifission in the reactions with heavy ions leading to the formation of Hs”. The International Conference on Nuclear Structure and Dynamics II, Opatija, Croatia, July 9-13, 2012.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 118 страниц машинописного текста, включающих в себя 12 таблиц, 46 рисунков и список литературы из 122 наименований.

Во введении рассматривается научная проблема, дается обоснование ее актуальности. Сформулирована цель работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту, приводится краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе приведен обзор процессов, протекающих в реакциях с тяжелыми ионами. Основное внимание уделяется свойствам процессов слияния-деления и квазиделения. Дан краткий обзор литературных данных по теме диссертации.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки для измерения характеристик бинарных фрагментов реакций и сопровождающей эмиссии нейтронов. Приведено краткое описание двухплечевого времяпролетного спектрометра CORSET, а также нейтронного спектрометра DEMON. Представлены основные параметры этих спектрометров.

В этой главе также излагаются основы методов получения массово-энергетических распределений бинарных фрагментов, а также энергетических и угловых распределений нейтронов.

В третьей главе приводятся результаты измерения сечений и массово-энергетических распределений бинарных фрагментов, образующихся в следующих системах: $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$, $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ при энергиях ниже и выше кулоновского барьера. Приводятся результаты проведенного анализа массово-энергетических

распределений продуктов реакций, и дается оценка вероятности слияния, сделанная на основе этого анализа.

Эксперименты проводились на ускорителе У-400 Лаборатории ядерных реакций им. Флерова в Дубне при энергиях пучка ионов ^{22}Ne – 102 и 127 МэВ, ионов ^{26}Mg – 121, 125, 129, 143 и 160 МэВ, ионов ^{36}S – 173, 179, 186, 198 МэВ, ионов ^{58}Fe – 289, 297, 305, 315, 324 МэВ. Мишени изготавливались путем напыления изотопов ^{208}Pb (220 мкг/см²), $^{238}\text{UF}_4$ (200 мкг/см²), ^{248}Cm (170 мкг/см²) и ^{249}Cf (150 мкг/см²) на углеродные пленки толщиной 50-60 мкг/см², обогащенность мишеней составляла 99.9%.

На рисунке 1 представлены массово-энергетические распределения фрагментов всех четырех изучаемых реакций для двух энергий – выше и ниже кулоновского барьера.

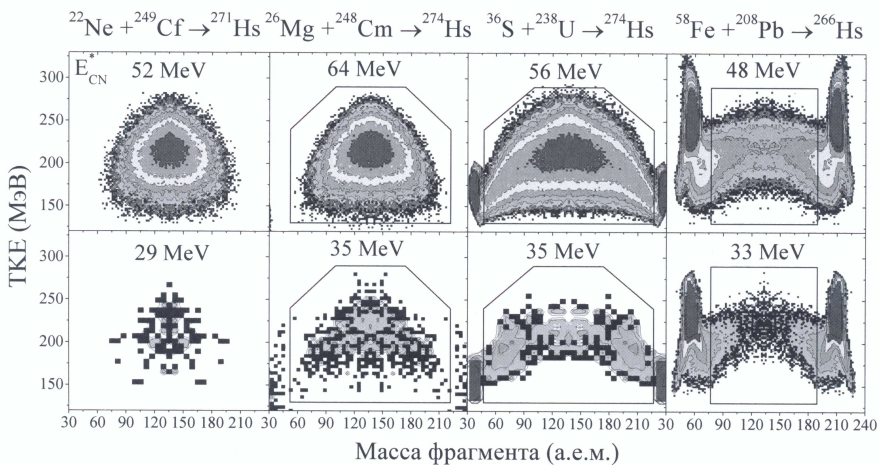


Рисунок 1. Двумерные распределения выходов фрагментов реакций в зависимости от их массы и полной кинетической энергии (M , ТКЕ).

Видно, что даже при близких энергиях возбуждения массово-энергетические распределения (M, TKE) для этих реакций сильно отличаются. В случае двух самых асимметричных комбинаций мишень-ион при энергии возбуждения выше кулоновского барьера распределения (M, TKE) имеют характерную для деления нагретых ядер треугольную форму. С уменьшением асимметрии входного канала форма распределений заметно меняется. В случае реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ при высокой энергии возбуждения распределение все еще симметрично, однако в области асимметричных масс наблюдается повышенный выход фрагментов. При низкой энергии возбуждения распределение становится асимметричным. И, наконец, для самой симметричной реакции с ионами железа, мы наблюдаем асимметричные массово-энергетические распределения как при низкой, так и при довольно высокой (~ 25 МэВ выше кулоновского барьера) энергиях.

Для реакций $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$ и $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ при высоких энергиях возбуждения, когда оболочечные эффекты не играют значительной роли, массовые распределения фрагментов хорошо описываются одним гауссианом с параметрами, соответствующими свойствам осколков деления, предсказанными жидкокапельной моделью для случая относительно нагретых ядер. Зависимости средней кинетической энергии $\langle TKE \rangle(M)$ и ее дисперсии $\sigma_{TKE}^2(M)$ от массы имеют параболическую форму, характерную для процесса деления. Однако для реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ при энергии возбуждения $E_{\text{CN}}^* = 35$ МэВ наблюдаются значительное отклонение экспериментальных точек $\langle TKE \rangle(M)$ от параболы в сторону больших значений в двух областях масс осколков – для асимметричных масс, и в области симметричных осколков вблизи $M \sim A/2$. В зависимости дисперсии кинетической энергии $\sigma_{TKE}^2(M)$

наблюдаются статистически значимые нерегулярности, причем в области симметричных масс. Увеличение выхода в районе масс 70-100 а.е.м. для реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ при энергии возбуждения 35 МэВ может быть вызвано наличием процесса квазиделения, так как энергия взаимодействия на ~ 10 МэВ ниже барьера. Как известно, в случае взаимодействия сильно деформированных ядер при энергиях ниже кулоновского барьера могут сказываться эффекты их взаимной ориентации, приводящие к увеличению вклада квазиделения.

На рисунке 2 показаны распределения полной кинетической энергии ТКЕ симметричных осколков с массами $A/2 \pm 20$ а.е.м. для реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$. Как видно из рисунка, при энергии возбуждения 35 МэВ распределение ТКЕ описывается суммой двух гауссианов с пиками, приходящимися на 214 и 232 МэВ. Заметим, что при спонтанном делении тяжелых изотопов Fm, Md, No и Rf наблюдается бимодальная структура массово-энергетических осколков [1], обусловленная проявлением сферических оболочек $Z = 50$ и $N = 82$ сразу в двух осколках. В их массовом распределении присутствуют две компоненты – узкая симметричная с высокой ТКЕ ~ 232 МэВ и симметричная компонента со значительно большей шириной и меньшей ТКЕ ~ 200 МэВ, отвечающая стандартному делению этих ядер. В нашем случае пик с низкой энергией (закрашенная серым область на рис. 2) соответствует систематике Вайолы [2], а с высокой (заштрихованная область) – значениям, полученным для высокоэнергетической компоненты при спонтанном делении тяжелых ядер в районе Fm. Следовательно, в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ при начальной энергии возбуждения составного ядра 35 МэВ, наблюдается бимодальное деление $^{274}\text{Hs}^*$.

В отличие от реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, где основным каналом является деление составного ядра, и реакции $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$, где, наоборот, доминирует

квазиделение, в случае $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ оба процесса вносят значительный вклад в сечение реакции, и процедура разложения массовых распределений на компоненты, соответствующие этим процессам, становится неоднозначной. В связи с этим был проведен анализ энергетических распределений осколочноподобных продуктов всех изучаемых реакций.

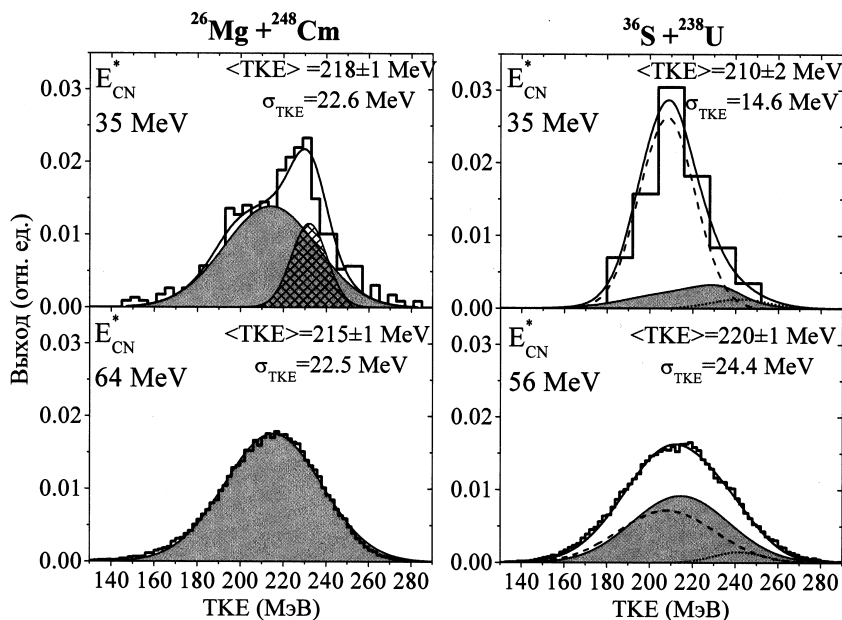


Рисунок 2. Распределения полной кинетической энергии в области масс фрагментов $A/2 \pm 20$ а.е.м., полученных в реакциях $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$.

Как видно из рисунка 2, при высокой энергии возбуждения 56 МэВ распределение ТКЕ симметричных фрагментов реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ имеет близкую к гауссовой форму. Но дисперсия его значительно выше ($595 \pm 4 \text{ МэВ}^2$), чем это следует из систематик для деления составного ядра (502 МэВ^2), тогда как в реакциях с ионами ^{26}Mg и ^{22}Ne при высоких энергиях возбуждения распределение ТКЕ фрагментов хорошо

описывается при помощи одного гауссиана со средним значением и дисперсией, соответствующим этим систематикам.

Теоретические расчеты [3], основанные на динамических уравнениях движения Ланжевена, показали, что при столкновении тяжелых ядер на поверхности потенциальной энергии, кроме долины дважды магического свинца ($Z = 50$ и $N = 82$), наблюдается долина дважды магического олова ($Z = 50$ и $N = 82$), приводящая к массовой асимметрии ~ 0.1 . Таким образом, в реакциях с тяжелыми ионами можно выделить как минимум три моды, ведущие к формированию делительноподобных фрагментов: асимметричная квазиделительная мода, обусловленная влиянием ядерных оболочек $Z = 28, 82$, и $N = 50, 126$, симметричная квазиделительная мода, определяемая оболочками $Z = 50$ и $N = 82$, и истинное слияние-деление, ведущее к формированию симметричных фрагментов. Мы предположили, что в случае реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ симметричные фрагменты могут образовываться в этих трех процессах, поэтому для определения их вкладов распределение ТКЕ было описано суммой трех гауссианов. Один из них соответствует процессу деления (закрашенная область на рис. 2). Низкоэнергетическую компоненту в распределении ТКЕ мы ассоциируем с процессом асимметричного квазиделения (штриховая линия), а высокоэнергетическую – с симметричным квазиделением (пунктирная линия).

Таким образом, мы описали распределения ТКЕ для области симметричных масс фрагментов и, следовательно, получили соотношения вкладов трех процессов в эту область. Зная значения вклада процесса деления в сечение захвата для области масс фрагментов $A/2 \pm 20$ а.е.м., можно описать массовые распределения, используя эти значения в качестве весовых коэффициентов. Результаты описания массовых распределений показаны на рисунке 3.

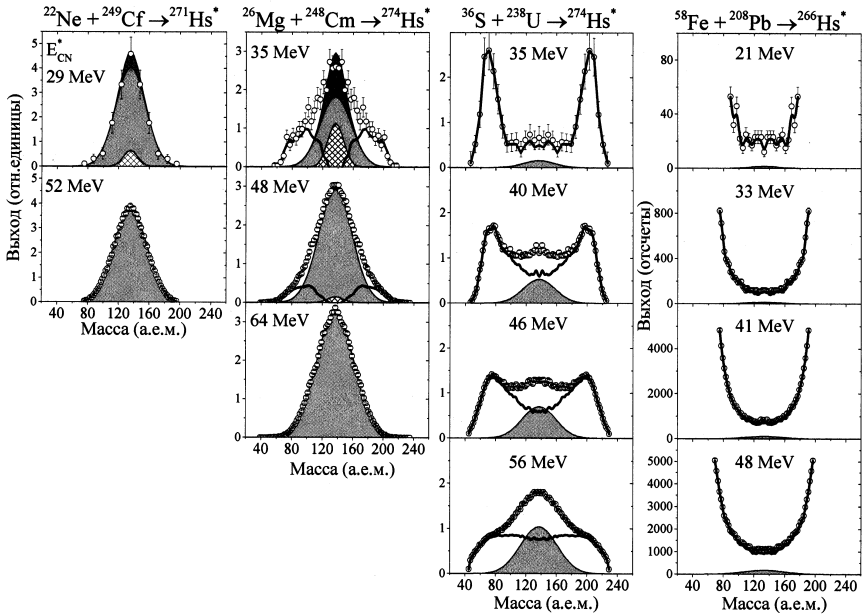


Рисунок 3. Массовые распределения фрагментов реакций $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf} \rightarrow ^{271}\text{Hs}^*$, $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{274}\text{Hs}^*$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{274}\text{Hs}^*$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{266}\text{Hs}^*$. Кружки – экспериментальные значения, закрашенная серым цветом область – вклад деления, заштрихованная область (для реакций $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$, $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$) – вклад компактного симметричного деления, толстые линии – вклад квазиделения.

Обычно в реакциях с тяжелыми ионами формирование асимметричных квазиделительных фрагментов связывают с влиянием оболочек $Z=82$ и $N=126$. Действительно, для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ [4] максимальный выход соответствует фрагментам с массой 208 а.е.м. Однако, на формирование асимметричной квазиделительной моды, помимо оболочек $Z=82$ и $N=126$ в тяжелом осколке, также могут влиять и замкнутые оболочки $Z=28$ и $N=50$ в легком, что может привести к сдвигу квазиделительных пиков. Так, в случае реакции $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ [4] максимальный выход асимметричных квазиделительных осколков приходится на 215 а.е.м. (тяжелый осколок), тогда как в реакциях с более

легкими налетающими ионами пики сдвигается в сторону симметричных масс [5], и для системы $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ мы наблюдаем пик в области 200 а.е.м.. Исходя из простой гипотезы о неизменной зарядовой плотности, можно легко подсчитать массы тяжелого и легкого осколков, соответствующие всем этим оболочкам. В таблице 1 приведены позиции вычисленного таким образом тяжелого квазиделительного пика $M_{\text{H}}^{\text{Shell}}$ (значение усреднено по всем оболочкам). Значения $M_{\text{H}}^{\text{Shell}}$ хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными, кроме двух наиболее асимметричных реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$, где пики заметно смещены в сторону массовой симметрии. Количество нуклонов обмена для этих реакций значительно больше, что может говорить о том, что система живет более длительное время до того как разделиться. В случае более симметричного входного канала максимум выхода асимметричной квазиделительной компоненты в экспериментальных массовых распределениях приходится на усредненное значение $M_{\text{H}}^{\text{Shell}}$ для оболочек $Z = 82, N = 126$ и $Z = 28, N = 50$.

Таблица 1. Позиции тяжелого пика в массовом распределении фрагментов. $M_{\text{H}}^{\text{exp}}$ и $M_{\text{H}}^{\text{Shell}}$ – экспериментально определенное и рассчитанное из оболочек положения пика, соответственно.

Реакция	Z_1Z_2	$M_{\text{H}}^{\text{exp}}$	$M_{\text{H}}^{\text{Shell}}$	Количество нуклонов обмена	Ссылки
$^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$	1152	180	202.5	68	Наши данные
$^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$	1288	178	199.3	60	К. Nishio[5]
$^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$	1472	200	202.5	38	Наши данные, К. Nishio[5]
$^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$	1656	204	204.5	34	К. Nishio [5]
$^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$	1840	208	208.5	30	Е.М. Kozulin[4]
$^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$	2576	215	216.5	23	Е.М. Kozulin[4]

Реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ ведут к образованию одной и той же составной системы $^{274}\text{Hs}^*$, однако положения асимметричных квазиделительных пиков в массовом распределении сильно отличаются. В случае более симметричного входного канала кулоновский фактор Z_1Z_2 выше, и, следовательно, силы кулоновского отталкивания больше, что может приводить к меньшему времени взаимодействия. Таким образом, на формирование асимметричных фрагментов квазиделения, помимо оболочечных эффектов, влияют свойства входного канала реакции, причем не только на конкуренцию деления и квазиделения, но и на свойства самого процесса квазиделения.

Проведенный анализ массово-энергетических распределений фрагментов реакций позволил выделить вклад процесса слияния-деления, и следовательно, оценить вероятность слияния P_{CN} , которая определяется как вероятность образования составного ядра после того как два взаимодействующих ядра соприкоснулись. Сечения образования испарительных остатков для этих двух реакций составляют порядка нескольких пикобарн [6, 7], и их вклад в сечение слияния очень незначителен. Поэтому P_{CN} можно оценить как отношение между числом событий, соответствующих процессу деления составного ядра согласно проведенному анализу массово-энергетических распределений, и всеми делительноподобными событиями.

На рисунке 4а показаны полученные вероятности слияния для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$. При энергии взаимодействия в районе барьера оцененные вероятности слияния P_{CN} составили $\sim 70\%$ и $\sim 17\%$, соответственно. Как следует из экспериментальных данных, свойства входного канала сильно влияют на динамику реакций, и P_{CN} значительно убывает в случае более симметричного входного канала, особенно в

подбарьерной области, так как процесс квазиделения подавляет процесс слияния-деления.

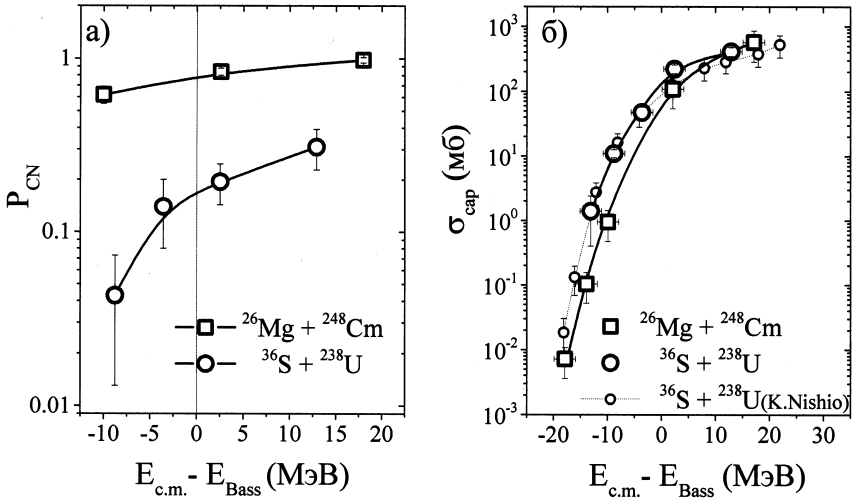


Рисунок 4. Вероятность слияния и сечения захвата для реакций S + U и Mg + Cm.

На рисунке 4 также представлены полученные сечения захвата для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$. Для реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ также показаны результаты из работы [8].

В четвертой главе излагаются результаты измерений угловых и энергетических распределений нейтронов, полученных в реакциях $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$. Приводятся результаты анализа измеренных характеристик нейтронной эмиссии.

На рисунке 5 показаны зависимости множественностей нейтронов от массы фрагмента для всех трех реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ при приблизительно одинаковой энергии возбуждения. На верхних панелях черными линиями показаны диапазоны масс фрагментов, для которых были получены значения нейтронных множественностей.

В случае реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ зависимости пред- и постделительной множественностей в области симметричных масс фрагментов 90-180 а.е.м. ведут себя сходным образом. Значения предделительной множественности нейтронов (M_{pre}) практически совпадают, несмотря на то, что проведенный в данной работе анализ массово-энергетических распределений показал, что в область симметричных масс фрагментов в случае $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$, кроме процесса деления составного ядра, также вносит вклад процесс симметричного квазиделения. Такое совпадение подтверждает теоретические предположения, что процесс симметричного квазиделения является более медленным, чем процесс асимметричного квазиделения, и имеет временной масштаб, характерный для процесса сияния-деления.

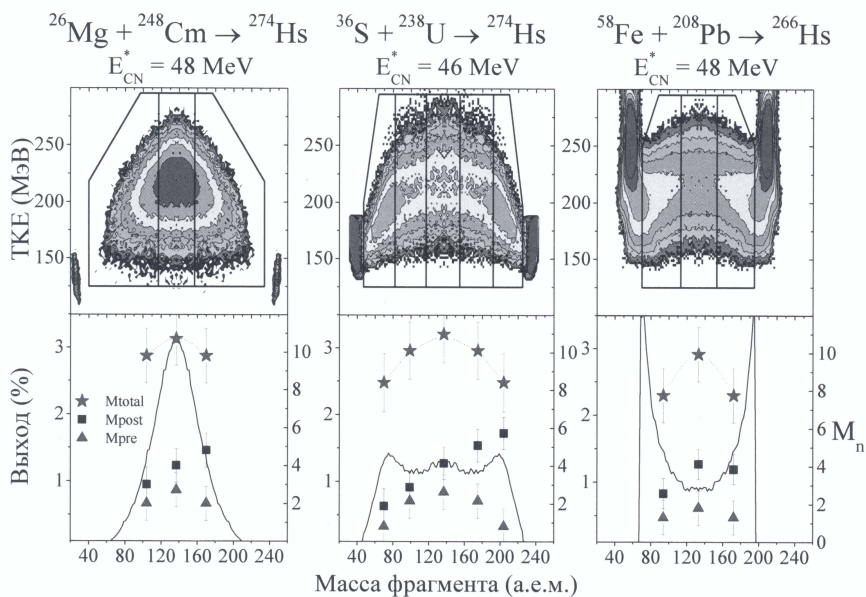


Рисунок 5. Двумерные матрицы (M,ТКЕ) (верхние панели); массовые распределения фрагментов (сплошные линии) и полная (звездочки), пред- (треугольники) и пост- (квадраты) делительные нейтронные множественности как функции от массы фрагментов (нижние панели) для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$.

В случае реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ зависимость M_{pre} носит параболический характер с максимумом в районе симметричных масс и заметно уменьшается для асимметричных фрагментов. Уменьшение M_{pre} с увеличением массовой асимметрии может быть связано со значительным вкладом процесса квазиделения в области асимметричных масс фрагментов.

Что касается постделительной множественности нейтронов (M_{post}), то для обеих реакций она линейно увеличивается с увеличением массы осколка. Это означает, что энергия возбуждения делится между фрагментами пропорционально массе в соответствии с жидкокапельной моделью.

В случае реакции $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ предделительная множественность значительно ниже для всего диапазона масс фрагментов, чем в случае двух более асимметричных реакций. Это связано с тем, что в реакции с ионами железа процесс квазиделения является доминирующим. Зависимость постделительной множественности от массы для этой реакции отклоняется от линейной, и для тяжелого фрагмента M_{post} значительно ниже, чем ожидалось бы в случае линейной зависимости. Особенностью данной реакции является тот факт, что один из партнеров во входном канале реакции – дважды магический свинец, вследствие чего события квазиделения трудно отделить от событий процессов упругих, квазиупругих и глубоко-неупругих передач. Низкие значения постделительной множественности нейтронов в области асимметричных фрагментов могут быть связаны с присутствием вклада событий реакций глубоко-неупругих передач.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

Измерены массово-энергетические распределения фрагментов реакций $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$, $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$, $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ в широком диапазоне энергий возбуждения составных ядер от 20 до 65 МэВ.

Установлено, что основным каналом реакций $^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$ и $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ является деление составного ядра. Для реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ наблюдается большой вклад квазиделения. В случае реакции $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ доминирующим процессом является асимметричное квазиделение.

Проведенный анализ энергетических распределений для области симметричных масс фрагментов $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$ а.е.м. показал, что дисперсия ТКЕ может служить критерием разделения процессов деления и квазиделения.

Измерены сечения захвата и оценена вероятность слияния P_{CN} для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$. Обнаружено, что P_{CN} значительно убывает в случае более симметричного входного канала, особенно в подбарьерной области.

Измерены множественности нейтронов для реакций $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ и $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$. Обнаружено, что при исследуемых энергиях предделительная множественность нейтронов в области симметричных фрагментов ($A_{\text{CN}}/2 \pm 20$ а.е.м.) слабо чувствительна к присутствию процесса квазиделения. В области асимметричных масс фрагментов предделительная множественность нейтронов значительно ниже, чем в области симметричных масс.

Впервые было обнаружено явление бимодального деления составного ядра $^{274}\text{Hs}^*$, образованного в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ при начальной энергии возбуждения 35 МэВ.

Список публикаций с основными результатами диссертации:

1. Э.М. Козулин, А.А. Богачев, М.Г. Иткис, Ю.М. Иткис, Г.Н. Княжева, Н.А. Кондратьев, Л. Крупа, И.В. Покровский, Е.В. Прохорова. *Времяпролетный спектрометр CORSET для измерения бинарных продуктов реакций.* // Приборы и техника эксперимента, Т. 51, В.1 (2008) с. 44-58.
2. I.M. Itkis, M.G. Itkis, G.N. Knyazheva, E.M. Kozulin, L. Krupa, F. Hanappe, O. Dorvaux, L. Stuttgé. *Neutron Emission in Fission and Quasifission of Hs.* // AIP Conf. Proc. 1224 (2010) 372-376.
3. I.M. Itkis, E.M. Kozulin, M.G. Itkis, G.N. Knyazheva, A.A. Bogachev, E.V. Chernysheva, L. Krupa, Yu.Ts. Oganessian, V.I. Zagrebaev, A.Ya. Rusanov, F. Goennewein, O. Dorvaux, L. Stuttge, F. Hanappe, E. Vardaci, D. De Goes Brennand. *Fission and quasifission modes in heavy ions induced reactions leading to the formation of Hs*.* // Phys. Rev. C 83 (2011) 064613 (12 pages).
4. M.G. Itkis, F. Goennewein, I.M. Itkis, G.N. Knyazheva, E.M. Kozulin, A.A. Bogachev, E. Vardaci. *Fusion-Fission of superheavy compound nuclei produced in the reactions with heavy ions beyond Ca.* // Eur. Phys. J. Web of Conf. 17 (2011) 12002 (4 pages).
5. M.G. Itkis, I.M. Itkis, G.N. Knyazheva, E.M. Kozulin. *Fusion-Fission and quasifission of superheavy systems in heavy ion induced reactions.* // Nucl. Phys. A 834 (2010) 374c-377c.
6. I.M. Itkis, M.G. Itkis, G.N. Knyazheva, and E.M. Kozulin. *Fusion-fission and quasifission in the reactions with heavy ions leading to the formation of Hs.* // AIP Conf. Proc. 1491 (2012) 350-352.

Цитированная литература:

- [1] E.K. Hulet, J.F. Wild, R.J. Dougan *et al.*, *Bimodal Symmetric Fission Observed in the Heaviest Elements*. // Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 313
- [2] V.E. Viola, K. Kwiatkowski, M. Walker, *Systematics of fission fragment total kinetic energy release*. // Phys. Rev. C 31 (1985) 1550
- [3] V. Zagrebaev and W. Greiner, *Unified consideration of deep inelastic, quasi-fission and fusion-fission phenomena*. // J. Phys. G 31 (2005) 825.
- [4] E.M. Kozulin, G.N. Knyazheva, I.M. Itkis *et al.*, *Investigation of the reaction $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ being an option of synthesizing element 120*. // Phys. Lett. B 686 (2010) 227
- [5] K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka *et al.*, *Effects of nuclear orientation on fusion and fission process for reactions using actinide target nuclei*. // AIP Conf. Proc. 1224 (2010) 301
- [6] J. Dvorak, W. Bruchle, M. Chelnokov *et al.*, *Observation of the 3n Evaporation Channel in the Complete Hot-Fusion Reaction $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ Leading to the New Superheavy Nuclide ^{271}Hs* . // Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 132503
- [7] R. Graeger, D. Ackermann, M. Chelnokov *et al.*, *Experimental study of the $^{238}\text{U}(^{36}\text{S}, 3-5n)^{269-271}\text{Hs}$ reaction leading to the observation of ^{270}Hs* . // Phys. Rev. C 81 (2010) 061601(R)
- [8] K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka *et al.*, *Effects of nuclear orientation on the mass distribution of fission fragments in the reaction of $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$* . // Phys. Rev. C 77 (2008) 064607

Получено 10 июня 2013 г.

**Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.**

Подписано в печать 11.06.2013.

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

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,03. Тираж 100 экз. Заказ № 58007.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/