

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 593.172.17

КНЯЖЕВА

Галина Николаевна

**ВЛИЯНИЕ ВХОДНОГО КАНАЛА НА ПРОЦЕССЫ
СЛИЯНИЯ-ДЕЛЕНИЯ И КВАЗИДЕЛЕНИЯ
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна, 2009

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

М.Г. Иткис

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Г.М. Тер-Акопян

доктор физико-математических наук,
профессор

Ю.В. Пятков

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2009 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.06 Объединенного института ядерных исследований по адресу:
141980, г. Дубна, Московская обл., Объединенный институт ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2009 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета:

Попеко А.Г.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из важных проблем современной ядерной физики является исследование свойств атомных ядер в экстремальных состояниях. Синтез новых сверхтяжелых элементов и изучение их свойств занимает центральное место в этой проблеме. Для синтеза новых элементов используют реакции с тяжелыми ионами. Коренная перестройка большого числа нуклонов в таких системах ведет к различным каналам реакции: от передачи нескольких нуклонов, до полного слияния двух ядер. Однако, для предсказания вероятности образования сверхтяжелого ядра в таких реакциях необходимо более глубокое понимание механизма взаимодействия двух сложных ядер.

Выживаемость ядра по отношению к конкурирующему процессу деления зависит от высоты барьера деления, целиком определяемой для сверхтяжелых ядер эффектом ядерных оболочек. Приближение к замкнутым оболочкам должно приводить к росту барьера деления и, следовательно, к увеличению выживаемости ядра. Недавние успехи в синтезе новых элементов с $Z=112-118$, полученных в реакциях с актинидными мишенями ^{238}U , ^{244}Pu , ^{248}Cm , ^{249}Cf с ионами нейтронно-избыточного ^{48}Ca , подтверждают возможность существования «острова стабильности» вблизи протонных оболочек с $Z=114, 120, 122$ и нейтронной оболочки с $N=184$. Одним из путей получения новых сверхтяжелых элементов с $Z>118$ является переход к более тяжелым налетающим ионам ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe .

Однако, в реакциях с тяжелыми ионами, ведущих к образованию тяжелых и сверхтяжелых систем, процессы глубоко-неупругого рассеяния и квазиделения являются доминирующими каналами, в то время как вероятность образования составного ядра экстремально мала. Это связано с тем, что квазиделение подавляет процесс образования составного ядра.

Как известно, конкуренция между процессами полного слияния и квазиделения, главным образом, определяется контактной конфигурацией двойной ядерной системы, образованной взаимодействующими ядрами, где свойства входного канала, такие как массовая асимметрия, энергия взаимодействия, вносимый в систему угловой момент, деформация ядер, играют главенствующую роль.

Важно отметить, что процесс квазиделения экспериментально сложно отделить от реакций глубоко-неупругого рассеяния и процесса слияния-деления. Поэтому необходимо проводить эксперименты с измерением как можно большего числа наблюдаемых характеристик взаимодействия двух ядер, а именно, измерять массово-энергетические и угловые распределения фрагментов деления, а также изучать сопутствующую эмиссию легких частиц.

На сегодняшний день для описания процессов, протекающих в реакциях с тяжелыми ионами, существует несколько теоретических моделей, в рамках которых можно рассчитать динамику взаимодействия тяжелых ядер, оценить вероятности различных каналов реакции для таких систем. Однако, предсказания этих моделей сильно расходятся друг с другом и с экспериментальными данными.

Основной целью работы являлось исследование влияния свойств входного канала реакции на конкуренцию процессов слияния и квазиделения. В данной работе анализировалось влияние статической деформации ядра мишени, а также массовой асимметрии входного канала на динамику взаимодействия тяжелых ядер. Для такого рода исследований потребовалось усовершенствовать установку для измерения характеристик бинарных фрагментов реакции, что позволило извлекать информацию об угловых и массово-энергетических распределениях фрагментов, с высокой точностью разделять процессы слияния-деления и квазиделения и измерять сечения этих процессов.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Модернизация установки для измерения характеристик бинарных фрагментов реакции, состоящей из двуплечевого времяпролетного спектрометра КОРСЕТ и ТоF-Е телескопов, и применение экспериментальной методики для определения массовых и энергетических распределений бинарных фрагментов реакции, а также их дифференциальных сечений под различными углами.

2. Результаты измерений энергетических потерь фрагментов спонтанного деления ^{252}Cf , а также тяжелых ионов ^{48}Ca , ^{84}Kr , ^{132}Xe , ^{197}Au в различных материалах, а также созданная на основе полученных данных полуэмпирическая формула для расчета потерь энергии фрагментов при прохождении через различные среды.
3. Результаты измерений массово-энергетических распределений бинарных фрагментов, образующихся в следующих системах: $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{192}\text{Pb}$, $^{40}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{194}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{202}\text{Pb}$, $^{16}\text{O}+^{186}\text{W}\rightarrow^{202}\text{Pb}$ в широком диапазоне энергий возбуждения составных ядер от 30 до 100 МэВ, также массово – угловых распределений фрагментов реакций $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{202}\text{Pb}$ и $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{192}\text{Pb}$ при двух энергиях ионов ^{48}Ca (вблизи Кулоновского барьера). Исследование массово-энергетических и угловых распределений для реакций $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{192}\text{Pb}$, $^{40}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{194}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{202}\text{Pb}$, а именно зависимость процесса квазиделения от статической деформации взаимодействующих ядер и влияние оболочечных эффектов на формирование фрагментов реакции.
4. Результаты измерений массово-энергетические распределения бинарных продуктов полученных в реакциях $^{44}\text{Ca}+^{206}\text{Pb}$, $^{64}\text{Ni}+^{186}\text{W}$, ведущих к образованию составного ядра ^{250}No , при энергиях возбуждения составного ядра 30 и 40 МэВ, массово-угловых корреляций фрагментов этих реакций при энергии возбуждения составного ядра ≈ 40 МэВ, а именно зависимость процесса квазиделения от массовой асимметрии входного канала.

Научная новизна и практическая ценность работы:

Созданная установка для измерения массово-энергетических и угловых распределений фрагментов реакций, а также разработанный анализ полученных распределений могут быть использованы для решения широкого класса задач, связанных с исследованием различных процессов, протекающих в реакциях с тяжелыми ионами. Полученные данные по потерям энергии тяжелых ионов в различных материалах необходимы для

уточнения различных моделей и программ для расчета энергетических потерь заряженных ионов при прохождении через вещество.

Впервые были измерены массово-энергетические и угловые распределения фрагментов деления и квазиделения для реакций $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{192}\text{Pb}$, $^{40}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{194}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{202}\text{Pb}$, $^{16}\text{O}+^{186}\text{W}\rightarrow^{202}\text{Pb}$ и $^{44}\text{Ca}+^{206}\text{Pb}\rightarrow^{250}\text{No}^*$, $^{64}\text{Ni}+^{186}\text{W}$. Полученные в работе экспериментальные данные могут использоваться для проверки теоретических моделей, описывающих процесс взаимодействия тяжелых ядер в таких ядерных центрах, как ОИЯИ, GSI, RIKEN, Berkly и т.п.

Апробация работы и публикации:

Результаты диссертации докладывались на:

- Доклад – “The influence of entrance channel properties on quasifission”, EXON - 2004, Peterhof, Russia, July 5-12, 2004;
- Доклад – “Heavy ion energy losses at energy range 0.1-6MeV/nucl.”; Workshop on Stopping Power, 20.02.05 Odense, Denmark;
- Доклад – “The influence of entrance channel on reaction dynamics of compound nucleus ^{250}No ”; the Annual Meeting of the Finnish Physical Society, Espoo, 17-19 March 2005;
- Постер – “ $^{40,48}\text{Ca}+^{144,154}\text{Sm}$: influence of deformation and shells”; the Annual Meeting of the Finnish Physical Society; Espoo, 17-19 March 2005;
- Постер – “Slowing down of fission fragments in thin layers”; the Annual Meeting of the Finnish Physical Society; Espoo, 17-19 March 2005;
- Доклад – “The influence of entrance channel on reaction dynamics” DANF-2006, Smolenice Castle, Slovak Republic, 2-6 October 2006;
- Доклад – “ $^{40,48}\text{Ca}+^{144,154}\text{Sm}$: influence of deformation and shells on quasifission process”, EXON-2006, Khaty-Mansiysk, West Siberia, Russia, 17-22 July 2006.

Материалы, вошедшие в диссертацию, достаточно полно опубликованы в 10-ти печатных работах, приведенных в конце реферата.

Объём и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация содержит 111 страниц машинописного текста, включающих в себя 9 таблиц, 33 рисунка и список литературы из 89 наименований.

1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Во введении определена актуальность и значимость изучаемых в работе проблем. Описана цель работы, её основные результаты, а также их научная и практическая ценность. Представлена информация о структуре диссертации, апробации работы, а также основные публикации, составившие содержание диссертации.

В первой главе дан краткий обзор предшествующих результатов исследования процессов, протекающих в реакциях с тяжелыми ионами, а также представлено теоретическое обоснование изучаемой проблемы.

Во второй главе описана применённая для измерений методика кинематических совпадений, основанная на измерении векторов скорости обоих фрагментов, а также на измерении скорости и энергии одного фрагмента.

Для разделения различных процессов, которые могут протекать в реакциях с тяжелыми ионами, таких как деление, квазиделение и др., помимо измерения массовых и энергетических распределений фрагментов, необходимы измерения их угловых распределений, а также характеристик эмиссии легких частиц в этих процессах. Измерения угловых распределений можно проводить с помощью 2V-метода, устанавливая времяпролетные плечи под корреляционными углами. Однако в реакциях с тяжелыми ионами переносная скорость составного ядра может достигать довольно больших значений. Это приводит к тому, что в лабораторной системе координат энергии фрагментов, вылетающих под большими углами относительно оси пучка, очень малы (порядка нескольких мегаэлектронвольт). Низкоэнергетичные фрагменты полностью тормозятся либо в веществе мишени, либо во входных окнах детекторов. В этом случае для измерения

углового распределения фрагментов реакции можно использовать одноплечевойToF-E-метод.

С учетом всего вышесказанного, была усовершенствована установка для измерения характеристик бинарных фрагментов реакции [1], а именно, к двухплечевому времяпролетному спектрометру были добавленыToF-E телескопы, позволяющие измерять дифференциальное сечение фрагментов реакции под разными углами. Спектрометр состоит из двух идентичных времяпролетных плеч для измерений скоростей обоих фрагментов реакции и несколькихToF-E телескопов для измерений массы и энергии только одного из фрагментов бинарного процесса. Каждое времяпролетное плечо включает в себя стартовый и стоповый детекторы на основе МКП, аToF-E телескоп – два детектора на основе МКП с электростатическим зеркалом и полупроводниковый детектор. Одновременно с фрагментами реакции измерялись события упругого рассеяния Резерфорда с помощью четырех поверхностно-барьерных детекторов, установленных под углами $\sim 10^\circ$ к оси пучка. Измерение не только скорости счета, но и энергетических спектров рассеянных ионов пучка позволяет контролировать как позицию пучка, так и его энергию. Дифференциальное сечение фрагментов реакции можно определить из следующего соотношения:

$$\sigma(\theta) = \frac{\Delta N_{fis}}{\Delta N_{mon}} \frac{\Delta \Omega_{mon}}{\Delta \Omega_{fis}} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{mon} \frac{eff_{mon}}{eff_{fis}},$$

где ΔN_{fis} - число фрагментов реакции, зарегистрированных в детекторе с телесным углом $\Delta \Omega_{fis}$ и эффективностью регистрации eff_{fis} , ΔN_{mon} - число событий упругого рассеяния, зарегистрированных в детекторе с телесным углом $\Delta \Omega_{mon}$ и эффективностью регистрации eff_{mon} , $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{mon}$ - сечение упругого рассеяния Резерфорда.

В данной главе приведено краткое описание и даны основные параметры спектрометра, определенные с помощью тестовых экспериментов по измерению характеристик осколков спонтанного деления ^{252}Cf . Подробно рассматривается процедура определения эффективности детекторов, используемых в спектрометре, а также алгоритм перевода измеряемых в эксперименте параметров в физические величины.

Особое внимание было уделено потерям энергии тяжелых зараженных частиц при прохождении через вещество, т.к. фрагменты реакции, проходя

через вещество мишени и фольги входных окон детекторов, теряют часть своей первоначальной энергии. Таким образом, в измеренные в эксперименте скорости и энергии фрагментов, необходимо вносить поправки, которые (для данного спектрометра) могут составлять до 10-15% от начальной энергии фрагмента. В связи с этим были проведены эксперименты по измерению потерь энергии фрагментов спонтанного деления ^{252}Cf [2], а также тяжелых ионов ^{48}Ca , ^{84}Kr , ^{132}Xe , ^{197}Au [3] в различных материалах, а также получена на основе полученных данных полуэмпирическая формула для расчета потерь энергии фрагментов при прохождении через различные среды.

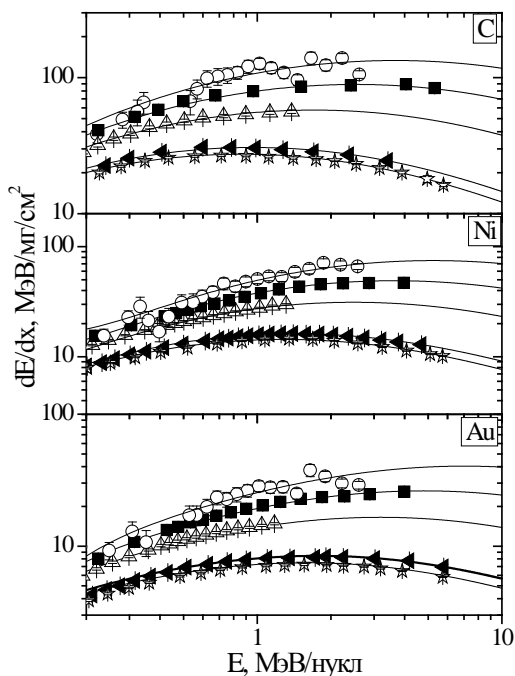


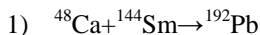
Рисунок 1. Потери энергии ионов ^{18}Ar , ^{48}Ca , ^{84}Kr , ^{132}Xe , ^{197}Au в углеродной, никелевой и золотой пленках в сравнении с экспериментальными данными. (^{18}Ar – \circ ; ^{48}Ca – \blacktriangleleft ; ^{84}Kr – \triangle ; ^{132}Xe – $!$; ^{197}Au – \circ)

На рисунке 1 представлены полученные в результате расчета с использованием предложенной полуэмпирической формулы (сплошные

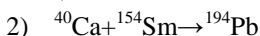
линии) и экспериментальные данные. Видно, что в энергетическом интервале $0.1=10\text{МэВ/нукл.}$ экспериментальные данные описываются с достаточно высокой точностью (с ошибкой меньше 5%).

Третья и четвертая главы посвящены анализу и обсуждению полученных экспериментальных результатов.

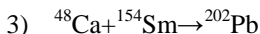
В третьей главе приводится описание исследования массово-энергетических распределений бинарных фрагментов реакций $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{192}\text{Pb}$, $^{40}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{194}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{202}\text{Pb}$, $^{16}\text{O}+^{186}\text{W}\rightarrow^{202}\text{Pb}$ в широком диапазоне энергий возбуждения составных ядер от 30 до 100 МэВ, также массово – угловых распределений фрагментов реакций $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}\rightarrow^{202}\text{Pb}$ и $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{192}\text{Pb}$ при двух энергиях ионов ^{48}Ca (вблизи Кулоновского барьера). Ядро самария, выбранное в данных реакциях в качестве мишени, имеет десять стабильных изотопов, начиная со 144, которое является сферическим, и заканчивая 154 сильнодеформированным ядром. Это дает возможность исследовать роль статической деформации сталкивающихся ядер на динамику их взаимодействия. Были измерены следующие реакции при энергиях возбуждения 30-120 МэВ:



(комбинация «ион-мишень» – сферическое-сферическое ядро);



(комбинация «ион-мишень» – сферическое - деформированное ядро);



(комбинация «ион-мишень» – сферическое- деформированное ядро).

Также измерялись продукты распада для реакции $^{16}\text{O}+^{186}\text{W}$, приводящей к образованию того же составного ядра ^{202}Pb , что и в случае 3) системы.

Эксперименты проводились на XTU TANDEM–ALPI ускорителе Национальной Лаборатории Ядерной Физики, Леньяро (Падуя) Италия в диапазоне энергий 76 – 132 МэВ выведенного пучка ^{16}O с интенсивностью 10 рпА и 163 -252 МэВ для ионов Са интенсивностью 2-5 рпА. Мишени, используемые в данном эксперименте, изготавливались путем напыления изотопов $^{154,144}\text{Sm}$ (толщиной $50\text{-}200\text{мкг/см}^2$ и обогащением 98.7%) и оксида

вольфрама $^{186}\text{WO}_3$ (толщиной 50-200 мкг/см² и обогащением 97.5%) на углеродные подложки толщиной 15-20 мкг/см². В результате эксперимента измерялись массовые, энергетические и угловые распределения бинарных продуктов реакций, а также сечения процессов деления, квазиделения. Параллельно в данном эксперименте измерялись сечения продуктов испарения для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm} \rightarrow ^{202}\text{Pb}$ [4].

Массово-энергетические распределения фрагментов реакции $^{16}\text{O} + ^{186}\text{W}$ [5] соответствуют предсказываемым моделью жидкой капли или диффузионной моделью распределениям для деления возбужденного составного ядра $^{202}\text{Pb}^*$. Массовое распределение имеет Гауссову форму, а кинетическая энергия фрагментов - параболическую зависимость от массы образовавшихся осколков деления, хорошо согласующуюся с систематикой Виолы, и не зависит от энергии возбуждения и углового момента составного ядра. Для этой реакции при измеренных энергиях ($E_{CN}^* \geq 48\text{МэВ}$) не наблюдается проявления оболочечных эффектов в образующихся фрагментах.

На рисунке 2 представлены массово – энергетические распределения для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$. Эти распределения при энергии $E_{CN}^* = 49\text{МэВ}$ сильно отличаются от распределений, полученных в реакции $^{16}\text{O} + ^{186}\text{W}$ при той же энергии возбуждения. Бинарные продукты реакции, выделенные контуром на М-ТКЕ матрице, в массовом диапазоне 55-145 а.е.м. можно идентифицировать как полностью термализованные (делительно-подобные) события. Для этих событий в массово – энергетических распределениях наблюдается повышенный выход в области асимметричных масс $M=65$ и 140а.е.м. , так называемых «асимметричных плечей», по сравнению с распределениями фрагментов деления $^{202}\text{Pb}^*$, образованного в реакции $^{16}\text{O} + ^{186}\text{W}$. Вклад этих «асимметричных плечей» составляет $\approx 30\%$ при энергии вблизи Кулоновского барьера реакции и уменьшается с увеличением энергии налетающего иона. При большой энергии эта компонента практически неразличима в матрице фрагментов. Это связано с ее относительным малым вкладом (порядка 1%) в общее сечение и уширением массового распределения осколков деления с увеличением энергии возбуждения и углового момента составного ядра.

Симметричная компонента массового распределения фрагментов реакции $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ хорошо описывается Гауссовым распределением. Дисперсия этого распределения больше, чем в случае $^{16}\text{O}+^{186}\text{W}$ при той же энергии возбуждения составного ядра. Это уширение дисперсии объясняется влиянием углового момента составного ядра. Зависимость $\langle TKE \rangle$ от массы образованного фрагмента для системы $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ при энергии возбуждения $E_{CN}^* = 49$ и 57 МэВ также сильно отличается в области асимметричных масс от параболической зависимости (сплошная линия на рис. 2 в)).

Примерно такое же поведение наблюдается в характеристиках фрагментов реакции $^{40}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$, а именно, в области асимметричных масс наблюдается повышенный выход фрагментов реакции при энергиях $E_{CN}^* = 56$ и 60 МэВ. Кинетическая энергия для этих событий также отличается от параболической зависимости. Вклад этой компоненты в сечение всех делительно-подобных событий меньше, чем в случае реакции $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ и составляет $\approx 10\%$ при энергии вблизи Кулоновского барьера.

Анализ массово-угловых распределений для реакции $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ [6], подробно описанный в этой главе, показал, что для асимметричных фрагментов угловое распределение асимметрично относительно 90° в системе центра масс фрагментов. Для симметричных фрагментов реакции угловые распределения симметричны и имеют анизотропию, согласующуюся с расчетной для осколков деления составного ядра $^{202}\text{Pb}^*$. Это является следствием того, что асимметричные фрагменты в данной реакции образуются, главным образом, вследствие процесса квазиделения, в то время как симметричные – являются результатом деления составного ядра.

В случае реакции $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}$ [7] в массово – энергетических распределениях фрагментов не наблюдается никаких «асимметричных плечей» (см. рис. 3в). Следует отметить, что измерения проводились примерно при тех же возбуждениях и угловых моментах образующейся системы, однако в этой реакции мишень является сферической в отличие от реакций с использованием ^{154}Sm . Кроме того, угловые распределения, измеренные для этой реакции, симметричны и хорошо описываются в рамках

моделей для вычисления угловых распределений осколков деления составного ядра для всех фрагментов.

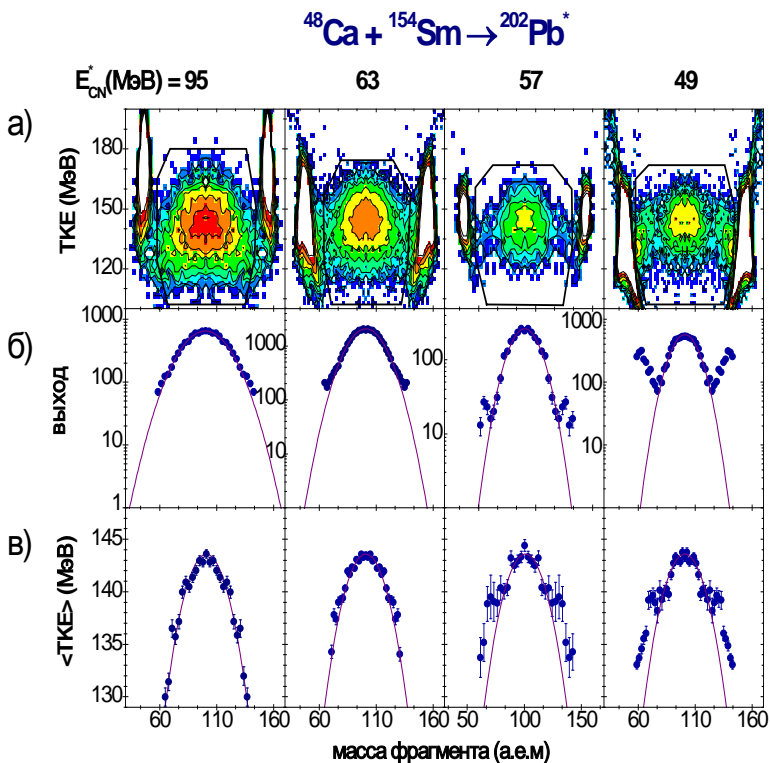


Рисунок 2. Массово-энергетическое распределение фрагментов реакции $^{48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$ при различных энергиях возбуждения: а) двумерные матрицы выходов бинарных продуктов реакции в зависимости от их массы и кинетической энергии М-ТКЕ; б) экспериментальное массовое распределение (точки) для делительно-подобных продуктов, выделенных контуром на матрице М-ТКЕ и описание массового распределения распределением Гаусса (сплошные линии); в) средняя кинетическая энергия $\langle TKE \rangle$ в зависимости от массы фрагмента (точки) для событий, выделенных тем же контуром.

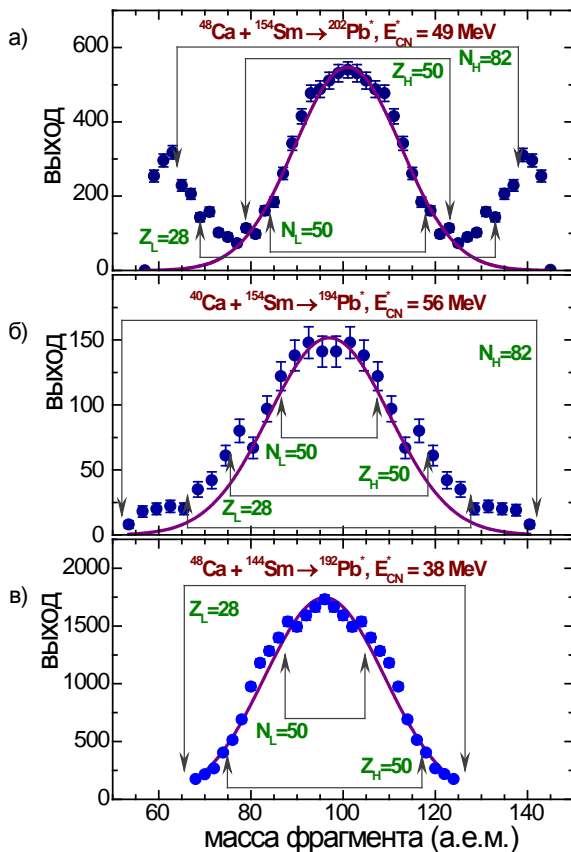


Рисунок 3. Массовые распределения фрагментов реакций $^{48}\text{Ca}+^{144,154}\text{Sm}$, $^{40}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ при энергии вблизи Кулоновского барьера.

Таким образом, в случае реакции $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}$ (два сферических ядра) при энергиях вблизи и выше Кулоновского барьера процесса квазиделения не обнаружено. На рисунке 3 показаны массовые распределения для реакций $^{40,48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ и $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}$, где стрелками показано положение замкнутых оболочек с $Z=28, 50$ и $N=50, 82$ и дополнительных к этим оболочкам масс, рассчитанных в простом предположении сохранения зарядовой плотности.

Для реакции $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ (рис. 3а)) основная часть квазиделительной компоненты лежит в области масс с $Z_L=28$ $N_H=82$. Следовательно, имеется указание на то, что для фрагментов с массой $M_L=60-75$ а.е.м. и дополнительного к нему с $M_H=130-145$ а.е.м., где наблюдается доминирование процесса квазиделения, оболочечные эффекты как легкого, так и тяжелого фрагментов играют существенную роль в динамике реакции. В случае реакции $^{40}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$, ведущей к формированию нейтронно-дефицитного составного ядра $^{194}\text{Pb}^*$, оболочечные эффекты фрагментов выражены слабее в процессе квазиделения (см. рис. 3б). Для реакции $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}$, где не наблюдается асимметричная квазиделительная компонента, замкнутые оболочки с $N_H=50$ и $Z_H=50$ соответствуют симметричным фрагментам (см. рис. 3 в).

На рисунке 4 приведены сечения процессов слияния-деления, квазиделения и сечение образования остатков испарения (ER), измеряемых в этом же эксперименте параллельно бинарным продуктам распада при тех же энергиях. Информация о сечениях слияния-деления и остатков испарения позволила получить сечения слияния для составного ядра $^{202}\text{Pb}^*$ [8], полученного в реакции $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$. Из рисунка 4 видно, что сечение для процесса квазиделения увеличивается с возрастанием энергии столкновения вплоть до энергий $E_{c.m.} = 150$ МэВ и приходит в насыщение при больших энергиях при значениях ~ 40 мб. Следует отметить, что барьер взаимодействия для компактных и некомпактных конфигураций составляет 149.7 и 129.1 МэВ, соответственно. Таким образом, в данных системах статическая деформация ядра мишени самария определяет дальнейшую динамику взаимодействия. Вероятность слияния сильно подавлена при некомпактных столкновениях ниже барьера B_{Bass} процессом квазиделения. При энергиях выше барьера все ориентации мишени дают вклад в сечение реакции и компактные столкновения ведут, главным образом, к формированию составного ядра. Такая интерпретация качественно соответствует модели, предложенной Хайндом для объяснения аномально большой анизотропии осколков реакций с тяжелыми ионами при энергиях вблизи и ниже барьера.

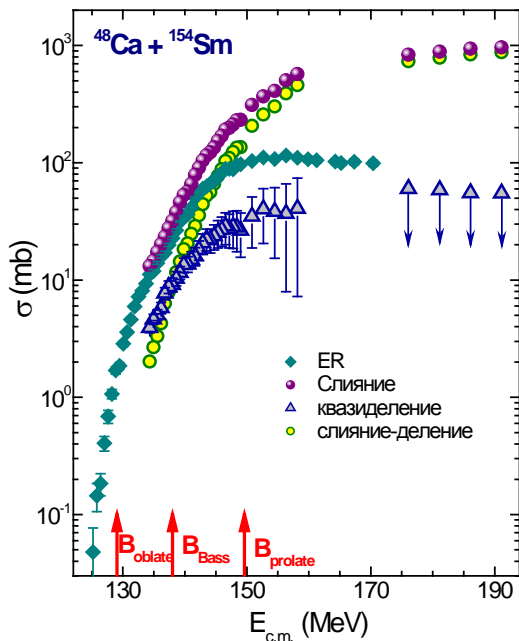


Рисунок 4. Сечения образования остатков испарения, слияния-деления и квазиделения в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния массовой асимметрии входного канала на конкуренцию процессов слияния-деления и квазиделения в реакциях $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ и $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$, ведущих к образованию составного ядра $^{250}\text{No}^*$.

Изучение тяжело-ионных реакций, ведущих к образованию составных систем с $Z > 100$, представляют большой интерес, т.к. эти ядра принадлежат к классу трансфермиевых элементов, стабильность которых главным образом определяется оболочечными эффектами, также как и в случае сверхтяжелых элементов.

Эксперимент проводился на циклотроне К-130 Университета г. Ювяскюля, Финляндия. Ток пучка на мишени составляла $\approx 2\text{-}5 \text{ pA}$. Мишени, используемые в данном эксперименте, изготовлялись путем напыления

изотопов ^{206}Pb (150мкг/см^2) и оксида вольфрама $^{186}\text{WO}_3$ (150мкг/см^2) на углеродную подложку толщиной 40 мкг/см^2 .

В результате эксперимента были измерены массово-энергетические распределения бинарных продуктов полученных в реакциях $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb} \rightarrow ^{250}\text{No}^*$, $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W} \rightarrow ^{250}\text{No}^*$ [9] при энергиях возбуждения составного ядра 30 и 40 МэВ. При этих условиях составное ядро имеет примерно одинаковое возбуждение и угловой момент. Таким образом, характеристики процесса слияния-деления в этих реакциях не должны сильно отличаться.

Массово-энергетические характеристики для реакций $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ и $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$, представленные на рисунке 5, очень сильно отличаются друг от друга. В случае $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ распределения осколков для симметричных масс с $A_{\text{CN}}/2 \pm 30$ имеют форму, близкую к Гауссовой, зависимость $\langle \text{TKE} \rangle (M)$ – параболическую форму. Как это уже отмечалось выше, такое поведение указанных характеристик осколков являются типичным для деления нагретых ядер и предсказывается моделью жидкой капли или диффузионной моделью, когда оболочечные свойства делящегося ядра становятся несущественны.

Однако, при более низкой энергии возбуждения ($E^* \approx 30\text{МэВ}$) хорошо видно, что массовое распределение для области фрагментов с $A_{\text{CN}}/2 \pm 30$ а.е.м. имеет более сложную структуру [10]. Это означает, что деление ^{250}No , хотя в целом по свойствам близко к жидкокапельному, имеет структурные особенности, характерные для низкоэнергетического деления (см. разложение на массовых распределениях рис.5).

В то же время, в реакции $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ для легких осколков с массами $65 \leq M_L \leq 100$ и им ответных тяжелых в массовом распределении наблюдаются «плечи» – повышенный выход продуктов реакции по сравнению с тем, который ожидается для деления составного ядра. Эти события также трудно отнести и к глубококонепругому процессу, так как они находятся в матрице осколков, т. е. осколочно-подобны, хотя слева и справа от этой области наблюдается плавный переход к событиям глубококонепругих передач и деления составного ядра. В области масс осколков, где доминируют «плечи», для всех энергий ионов наблюдается повышенное ТКЕ по сравнению с систематикой Виолы для деления составного ядра.

Измерения угловых распределений для этой группы фрагментов показали сильную асимметрию «вперед-назад», которая является характерной чертой процесса квазиделения. В то же время, для симметричных фрагментов угловые распределения хорошо согласуются с расчетами для деления составного ядра.

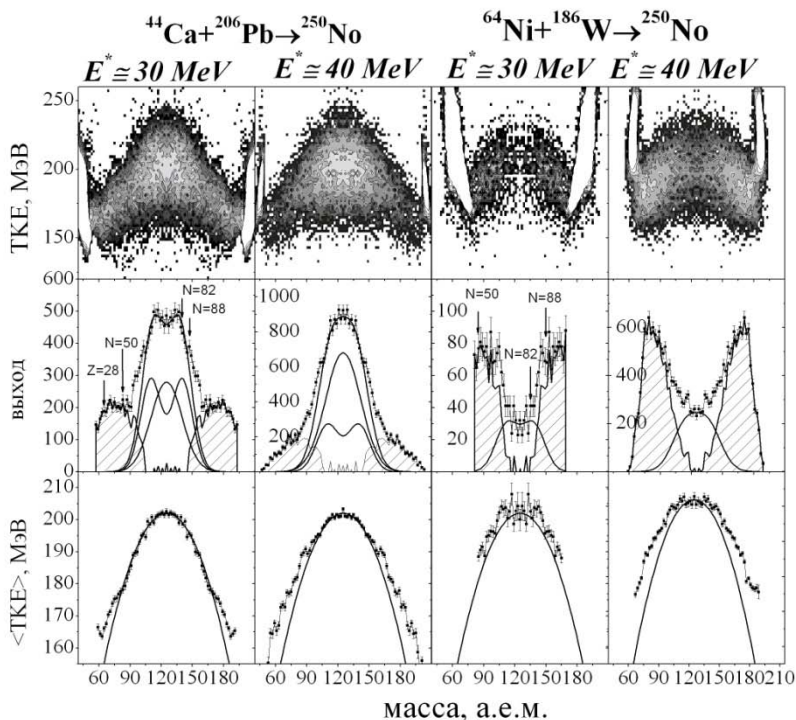


Рисунок 5. Массово-энергетические распределения продуктов реакций $^{44}\text{Ca}+^{206}\text{Pb}$ и $^{64}\text{Ni}+^{186}\text{W}$ при энергиях возбуждения составного ядра ≈ 30 и ≈ 40 МэВ.

В отличие от реакции с ионами ^{44}Ca , вклад асимметричных квазиделительных фрагментов в массовое распределение делительно-подобных продуктов, образованных в реакции $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$ значительно возрастает. Основным процессом распада такой системы становится процесс квазиделения. Так же как и в случае ионов ^{44}Ca , квазиделительные пики в

реакции $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$ формируются, главным образом, в районе масс, соответствующих замкнутым нейтронным и протонным оболочкам $Z = 28$ и $N = 50$ и деформированной нейтронной оболочки $N=88$.

Из угловых распределений осколочно-подобных фрагментов, образованных в реакции $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$ было обнаружено, что для симметричных фрагментов кроме компоненты с анизотропией, соответствующей процессу слияния-деления составного ядра при данном угловом моменте и энергии возбуждения, присутствует также небольшой вклад $\sim 10\%$, характеризующийся большей анизотропией, соответствующий процессу квазиделения.

Из массово-угловых корреляций фрагментов реакций следует, что составная система, ведущая к асимметричному разделению ($A \approx 80$ а.е.м.), образуемая в обеих реакциях живет меньше, чем один ее оборот. Используя угловые распределения (через угол поворота составной системы $\Delta\theta$) можно оценить время реакции. Для асимметричной группы масс, где основным каналом реакции является процесс квазиделения, время реакции составляет порядка $\sim 4 \times 10^{-21}$ с. Этого времени недостаточно даже на уравнивание массовой степени свободы взаимодействующей системы.

Как уже было отмечено выше, для симметричного разделения масс угловое распределения симметрично относительно 90° для обеих систем. Это означает, что образованное ядро существовало довольно долго, для того чтобы совершить несколько поворотов до того, как разделиться. Оцененное время жизни такой системы больше, чем 3×10^{-20} с для обеих изучаемых систем. Таким образом, время существования такой системы сравнимо с временем, необходимым для процесса слияния-деления составного ядра. Это еще раз доказывает предположение о том, что основной процесс, ведущий к распаду на симметричные фрагменты, является процесс слияния-деления составного ядра даже в случае более симметричной реакции $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$.

Из совокупного анализа массовых, энергетических и угловых распределений было показано, что в более симметричной реакции $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$ относительный вклад процесса слияния-деления в общее сечение захвата составляет только порядка 30%, основным процессом является

квазиделение, в то время, как в реакции $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ сечение слияния-деления составляет около 70%.

В заключении изложены основные результаты, полученные в данной диссертационной работе:

- Для решения поставленной задачи была усовершенствована установка CORSET. Были добавленыToF-E телескопы для измерения массово-угловых распределений бинарных продуктов реакции, что позволило разделить фрагменты, соответствующие процессам деления и квазиделения.
- Для определения величины энергии, теряемой фрагментами при прохождении через вещество мишени и входных окон детекторов, были проведены эксперименты по измерению потерь энергии фрагментов спонтанного деления ^{252}Cf , а также тяжелых ионов ^{48}Ca , ^{84}Kr , ^{132}Xe , ^{197}Au в различных материалах. На основе измеренных данных была получена полуэмпирическая формула для расчета потерь энергии фрагментов при прохождении через различные среды.
- Были измерены массово – энергетические распределения фрагментов реакций $^{16}\text{O} + ^{186}\text{W}$, $^{40}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$, $^{48}\text{Ca} + ^{144,154}\text{Sm}$ в широком диапазоне энергий возбуждения составных ядер от 30 до 100 МэВ. Также были проведены измерения массово-угловых распределений фрагментов реакций $^{48}\text{Ca} + ^{144,154}\text{Sm}$ при энергиях вблизи Кулоновского барьера. Из анализа массовых, энергетических и угловых распределений было установлено, что для всех изученных реакций основным процессом, ведущему к образованию симметричных фрагментов, является слияние-деление составного ядра. Однако, для реакций с деформированной мишенью ^{154}Sm ($^{40,48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$) в области асимметричных масс наблюдается повышенный выход фрагментов, связанный с проявлением процесса квазиделения.
- Квазиделительные фрагменты, образованные в реакциях $^{40,48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$ группируются вблизи масс, имеющих магическое число протонов или нейтронов. Так, для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$ основная часть асимметричной компоненты лежит в области масс с $Z_L=28$ $N_H=82$. В случае реакции $^{40}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm}$, ведущей к формированию нейтронно-дефицитного

составного ядра $^{194}\text{Pb}^*$, оболочечные эффекты фрагментов выражены слабее, тем не менее, оболочки с $Z_L=28$ $Z_N=50$ играют заметную роль в формировании фрагментов реакции.

- Было показано, что вклад квазиделения уменьшается с увеличением энергии ионов в реакциях $^{40,48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$, однако, в случае ионов ^{48}Ca этот вклад значительно больше, чем ионов ^{40}Ca , что обусловлено различием в величине параметра массовой асимметрии входного канала. В то же время, асимметрия входного канала для реакции $^{48}\text{Ca}+^{144}\text{Sm}$ меньше, чем для $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$, однако, процесса квазиделения для этой реакции не было обнаружено. Таким образом, в этих системах определяющую роль на проявление процесса квазиделения играет статическая деформация ядра мишени ^{154}Sm .
- Были измерены массово-энергетические и угловые распределения фрагментов реакции, образованных в системах $^{44}\text{Ca}+^{206}\text{Pb}$ и $^{64}\text{Ni}+^{186}\text{W}$, ведущих к образованию одного и того же составного ядра ^{250}No при энергиях возбуждения 30 и 40 МэВ. В массовых распределениях продуктов реакции наблюдаются события процесса квазиделения в области легких осколков с массами $65 \leq M_L \leq 100$. Эти фрагменты формируются, главным образом, в районе масс, соответствующих замкнутым нейтронным и протонным оболочкам $Z = 28$ и $N = 50$ и деформированной нейтронной оболочке $N=88$.
- Было показано, что в более симметричной реакции $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$ относительный вклад процесса слияния-деления в общее сечение захвата составляет только $\sim 30\%$, основным процессом является квазиделение, в то время, как в реакции $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ сечение слияния-деления составляет около 70% .

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] G.N. Knyazheva, S.V. Khlebnikov, E.M. Kozulin, T.E. Kuzmina, V.G. Lyapin, M. Muttere, J. Perkowski, W.H. Trzaska *Energy losses of ^{252}Cf fission fragments in thin foils*, Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B248 (2006), 7-15.
- [3] J. Perkowski, J. Andrzejewski, A. Climent-Font, G. Knyazheva, V. Lyapin, T. Malkiewicz, A. Munoz-Martin, W.H. Trzaska *Stopping power measurement of ^{48}Ca in a broad energy range in solid absorbers*, Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B 249 (2006), 55-57.
- [4] A.M.Stefanini, M.Trotta, B.R.Behera, L.Corradi, E.Fioretto, A.Gadea, A.Latina, S.Szilner, Y.W.Wu, S.Behera, G.Montagnoli, F.Scarlassara, A.Yu.Chizhov, I.M.Itkis, N.A.Kondratiev, I.V.Pokrovsky, R.N.Sagaidak, G.N.Kniajeva, E.M.Kozulin, V.M.Voskressensky, S.Courtin, F.Haas, N.Rowley *Fusion-evaporation cross sections for $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ near the Coulomb barrier*, Eur. Phys. J. A23 (2005), 473-4
- [5] G.N. Knyazheva, E.M. Kozulin, R.N. Sagaidak, M.G. Itkis, N.A. Kondratiev, A.M. Stefanini, B.R. Behera, L. Corradi, E. Fioretto, A. Gadea, A. Latina, S. Szilner, M. Trotta, S. Beghini, G. Montagnoli, F. Scarlassara, F. Haas, N. Rowley, P.R.S. Gomes, A. Szanto de Toledo, *$^{40,48}\text{Ca}+^{144,154}\text{Sm}$: Deformation and Shell*, "EXON-2006", Khanty-Mansiysk, Russia 17-22 July 2006, Eds.: Yu. E. Penionzhkevich, E.A. Cherepanov, Melville, New York (2007) 185-195.
- [6] G.N.Knyazheva, E.M.Kozulin, R.N.Sagaidak, A.Yu.Chizov, M.G.Itkis, N.A.Kondratiev, V.M.Voskressensky, A.M.Stefanini, B.R.Behera, L.Corradi, E.Fioretto, A.Gadea, A.Latina, S.Szilner, M.Trotta, S.Beghini, G.Montagnoli, F.Scarlassara, F.Haas, N.Rowley *Quasi-fission process in $^{40,48}\text{Ca}+^{144,154}\text{Sm}$ reactions*, Phys. Rev. C75 (2007) p. 064602 (13 pages).
- [7] M.G. Itkis, J. Aysto, S. Beghini, A.A. Bogachev, L. Corradi, O. Dorvaux, A. Gadea, G. Giardina, F. Hanappe, I.M. Itkis, M. Jandel, J. Kliman, S.V. Khlebnikov, G.N. Kniajeva, N.A.Kondratiev, E.M. Kozulin, L. Krupa, A. Latina, T. Materna, G. Montagnoli, Yu.Ts.Oganessian, I.V. Pokrovsky, E.V. Prohkorova, N. Rowley, V.A.Rubchenya, A.Ya.Rusanov, R.N.Sagaidak, F.Scarlassara, A.M.Stefanini, L.Stuttge, S.Szilner, M.Trotta, W.H.Trzaska, D.N.Vakhtin, A.M.Vinodkumar, V.M.Voskressensky, V.I.Zagrebaev *Shell*

- effects in fission and quasi-fission of heavy and superheavy nuclei*, Nucl. Phys. A 734 (2004) 136-147.
- [8] M.Trotta, A.M.Stefanini, L.Corradi, E.Fioretto, A.Gadea, S.Szilner, S.Beghini, G.Montagnoli, F.Scarlassara, A.Yu.Chizhov, I.M.Itkis, G.N.Kniajeva, E.M.Kozulin, N.A.Kondratiev, I.V.Pokrovsky, R.N.Sagaidak, V.M.Voskressensky, S.Courtin, O.Dorvaux, F.Наас, N.Rowley *Fusion of $^{48}\text{Ca}+^{154}\text{Sm}$ near the Coulomb barrier: enhancement vs. Suppression*, Nucl. Phys. A 734 (2004) 245-248.
- [9] Г.Н. Княжева, М. Г. Иткис, Е. М. Козулин, В.Г. Ляпин, В.А. Рубченя, В.Трзаска, С.В. Хлебников *Влияние входного канала реакции на образование и распад составного ядра ^{250}No* , Письма в ЭЧАЯ, 143, вып. 1 (2008), с. 40-52.
- [10] G.N. Knyazheva, A.Yu. Chizhov, M.G. Itkis, N.A. Kondratiev, E.M.Kozulin, R.N. Sagaidak, V.M. Voskressensky, B.R. Behera, L. Corradi, E. Fioretto, A. Gadea, A. Latina, A.M. Stefanini, S. Szilner, S. Beghini, G. Montagnoli, F. Scarlassara, M. Trotta, V.A. Rubchenya, V.G. Lyapin, W.H. Trzaska *The influence of entrance channel properties on quasifission*, In: *Proc of International Symposium on Exotic Nuclei, "EXON-2004"*, Peterhof, 5-12 July 2004, Eds.:Yu. E. Penionzhkevich, E.A. Cherepanov, World Scientific, Singapore (2005) 333-338.