

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ИМ. Г.Н. ФЛЁРОВА

На правах рукописи

(подпись соискателя ученой степени)

Новиков Кирилл Владимирович

**Образование и распад ядерных систем с $Z=114, 120$ в реакциях с
тяжелыми ионами**

Специальность 1.3.15 – физика атомных ядер и элементарных частиц, физика
высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2022

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрва
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель – *Козулин Эдуард Михайлович, кандидат физико-математических наук*

Официальные оппоненты –

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А. Г. Попеко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Изучение и расширение верхней части карты нуклидов является одной из основных задач современной физики сверхтяжелых элементов. Согласно теоретическим расчетам, проведенным в рамках различных современных моделей, «остров стабильности», где время жизни изотопов тяжелых и сверхтяжелых ядер будет довольно велико, ожидается вблизи нейтронной $N = 184$ и протонной $Z = 114$ или $Z = 120-126$ оболочек. Положение протонной оболочки в этой области пока точно не определено, т.к. ее значение, получаемое в различных моделях, сильно зависит от выбора параметров ядро-ядерных взаимодействий. В связи с этим получение ядер вблизи предсказанного «острова стабильности» и исследование их свойств является чрезвычайно важной задачей. Имеющиеся экспериментальные данные для изотопов ядер в этой области также подтверждают существование «острова стабильности», однако не позволяют сделать окончательного вывода о положении замкнутой протонной оболочки ($N = 184$ и $Z = 114$ или $Z = 120-126$). В связи с этим, синтез сверхтяжелых элементов с $Z > 118$ представляет особый интерес в этих исследованиях. Чтобы продвинуться в область исследуемых ядер с $Z > 118$ с использованием реакций полного слияния, из-за ограниченного числа актинидных ядер (применяемых в качестве мишеней), пригодных для эксперимента, необходимо использовать ионы, тяжелее ^{48}Ca . Однако при переходе к более тяжелым налетающим ионам растет кулоновское отталкивание между взаимодействующими ядрами (параметр Z_1Z_2). Этот фактор является одним из ключевых параметров, увеличение значения которого приводит к подавлению процесса формирования составного ядра за счет усиления конкуренции процессов слияния-деления и квазиделения.

Цель работы

Цель работы состояла в экспериментальном исследовании процессов слияния-деления и квазиделения в реакциях с тяжёлыми ионами, приводящих к образованию сверхтяжёлых составных систем с $Z = 114, 120$, при энергии взаимодействия вблизи кулоновского барьера и в оценке вероятности процесса слияния-деления при образовании и распаде этих составных систем в зависимости от кулоновского фактора (Z_1Z_2) и среднего параметра делимости (x_m).

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Выполнена модернизация установки CORSET с целью увеличения эффективности регистрации фрагментов реакции, скорости набора данных, надежности и достоверности получаемых данных.
2. Измерены массово-энергетические распределения фрагментов распада составных систем с $Z = 114$, образованных в реакциях $^{48}\text{Ti}+^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr}+^{232}\text{Th}$, $^{86}\text{Kr}+^{198}\text{Pt}$, и составных систем с $Z = 120$, образованных в реакциях $^{52,54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{68}\text{Zn}+^{232}\text{Th}$.
3. Изучены вклады процессов слияния-деления и квазиделения в реакциях $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ti}+^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr}+^{232}\text{Th}$, $^{86}\text{Kr}+^{198}\text{Pt}$, $^{52,54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$, $^{68}\text{Zn}+^{232}\text{Th}$, приводящих к образованию сверхтяжёлых составных систем с $Z = 114$ и 120 , при энергиях взаимодействия вблизи кулоновского барьера.
4. На основе анализа полученных экспериментальных данных сделаны оценки вклада событий слияния-деления при образовании и распаде составных систем с $Z=114, 120$ в зависимости от кулоновского фактора (Z_1Z_2) и среднего параметра делимости.

Научная новизна работы

Новизна работы состоит в том, что впервые проведен полный анализ характеристик массово-энергетических распределений бинарных фрагментов, получаемых в реакциях $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$, $^{52,54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$, $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ и $^{68}\text{Zn} + ^{232}\text{Th}$, ведущих к образованию сверхтяжелых систем с $Z = 114$ и 120 . Проведенный дополнительный сравнительный анализ полученных результатов с уже имеющимися для реакций с ионами ^{36}S , $^{40,48}\text{Ca}$, $^{48,50}\text{Ti}$, ^{58}Fe и ^{64}Ni позволил оценить влияние свойств входного канала на конкуренцию процессов слияния-деления и квазиделения, а также получить вероятности слияния для сверхтяжелых систем в широком диапазоне изменения кулоновского фактора Z_1Z_2 от 1472 до 2808.

Практическая значимость работы

Полученные в работе экспериментальные данные могут быть использованы для построения и проверки теоретических моделей, которые используются для описания взаимодействия ядер. Полученные верхние экспериментальные оценки вероятности образования составных ядер могут быть использованы при планировании, подготовке и проведении экспериментов, посвященных как исследованию свойств тяжелых и сверхтяжелых нейтроноизбыточных ядер, так и синтезу новых сверхтяжелых ядер.

Апробация работы

1. "Formation and decay of the composite system $Z = 120$ in reactions with heavy ions at energies near the Coulomb barrier". LXIX International Conference "Nucleus-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies", Dubna, Russia, 1–5 July 2019.
2. «Experimental studies of fusion-fission and quasi-fission processes in heavy ion reactions» Приглашённый доклад. 4th International Symposium's "Super Heavy Elements 2019" (SHE2019), 1–5 December, 2019, Nakone, Japan.
3. Первая премия Объединенного Института Ядерных Исследований за работу «Исследование вероятности образования и распада сверхтяжелых систем в зависимости от кулоновского фактора реакции Z_1Z_2 при энергиях вблизи кулоновского барьера» в 2021 году.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 107 страниц машинописного текста и включает в себя 2 таблицы, 35 рисунков и библиографический список из 100 наименований.

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

Первая глава посвящена краткому обзору механизмов реакции при взаимодействии тяжелых ионов. Дан краткий обзор литературных данных, существующих на сегодняшний день по данной тематике.

Во второй главе приводится описание экспериментальной установки CORSET [1], на которой были получены экспериментальные данные, анализируемые в рамках диссертационного исследования. Дается описание методов получения массово-энергетических распределений. А также обосновывается выбор конкретного метода для исследования поставленной задачи. Дается описание модернизации установки CORSET с целью увеличения эффективности регистрации фрагментов, получаемых в реакциях с тяжелыми ионами (усовершенствование детекторной части установки и системы сбора данных).

Третья глава диссертации посвящена анализу полученных экспериментальных данных по исследованию конкуренции слияния-деления и квазиделения при образовании и

распаде составных ядерных систем с $Z = 114$. Приводятся полученные массово-энергетические распределения бинарных фрагментов, образованных в реакциях $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$, $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$. Проводится анализ экспериментальных данных, полученных в этих реакциях, и сравнение с экспериментальными данными, полученными ранее в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ [2], приводящих к образованию той же составной системы с $Z = 114$. Дается заключение о соотношении проявления процессов слияния-деления и квазиделения в протекании ядерной реакции в зависимости от кулоновского фактора (Z_1Z_2) и среднего параметра делимости (x_m [3]).

Распределения масс-полной кинетической энергии первичных бинарных фрагментов, полученных в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ [2], $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ при энергиях взаимодействия выше барьера Басса [4], представлены на рис. 1. В анализе рассматриваются только события, которые находятся внутри обозначенных контуром линий в распределениях масс-полной кинетической энергии на рис. 1. На первый взгляд массово-энергетические распределения для реакций с ионами ^{48}Ca , ^{48}Ti и ^{52}Cr подобны. Наблюдается ярко выраженная асимметричная компонента, связанная с процессом квазиделения. Один из фрагментов асимметричного квазиделения располагается вблизи дважды магического свинца.

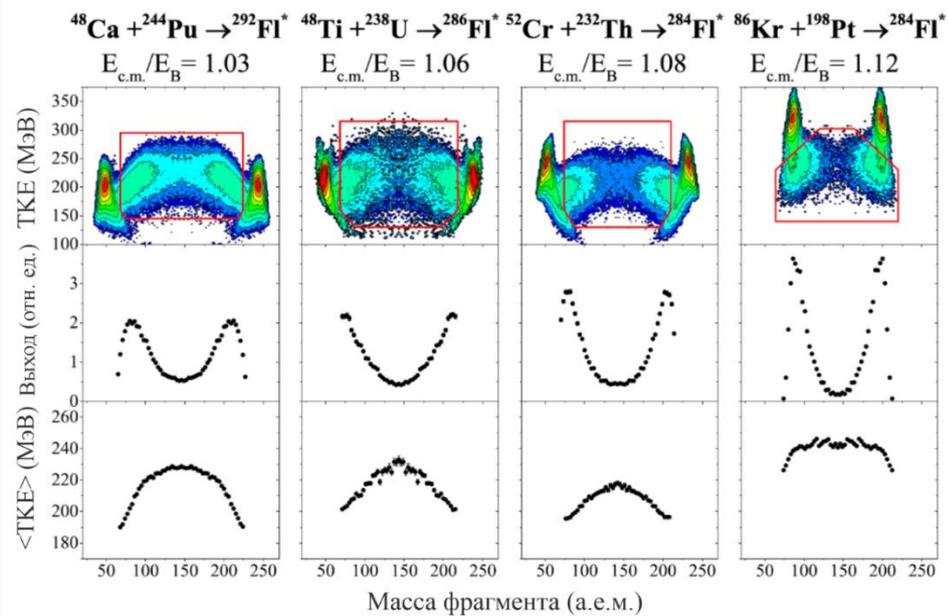


Рисунок. 1. Массовое и энергетическое распределения бинарных фрагментов, образующихся в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$, приводящих к образованию составных систем с $Z = 114$ при энергиях взаимодействия выше барьера Басса. Сверху вниз: матрицы масс-полной кинетической энергии бинарных продуктов реакции, распределения выхода масс и средней полной кинетической энергии в зависимости от массы делительноподобных фрагментов внутри контурной линии на матрицах масс-полной кинетической энергии.

Средние времена реакции для процесса асимметричного квазиделения для исследованных систем были оценены с использованием соотношения между средним временем реакции и массовым дрейфом [5]. Дрейф асимметричного квазиделения к массовой симметрии оценивался как разница между массой налетающего иона и наиболее симметричной массой при максимальном выходе фрагментов, образующихся в процессе квазиделения.

Среднее время асимметричного квазиделения для реакций $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ составляет около 6.2, 5.0, 4.8 и 2.7 зс, соответственно. Таким образом, чем тяжелее налетающий ион, тем меньше время процесса квазиделения.

Зависимость средней полной кинетической энергии от массы фрагмента отличается еще больше. В реакциях с ионами ^{48}Ca и ^{48}Ti значения средней полной кинетической энергии очень близки друг к другу; однако в случае реакции с использованием ионов ^{48}Ti средняя полная кинетическая энергия уменьшается гораздо быстрее с массовой асимметрией, чем для реакции с использованием ионов ^{48}Ca . В случае ионов ^{52}Cr средняя полная кинетическая энергия для симметричных фрагментов значительно ниже по сравнению с реакциями с использованием ионов ^{48}Ca и ^{48}Ti , что указывает на преобладание процесса асимметричного квазиделения. Для реакции $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ средняя полная кинетическая энергия практически не зависит от массы образующихся фрагментов и существенно выше, чем можно ожидать для составного ядра ^{284}Fl . Потеря полной кинетической энергии, наблюдаемая в этой реакции, составляет около 90 МэВ.

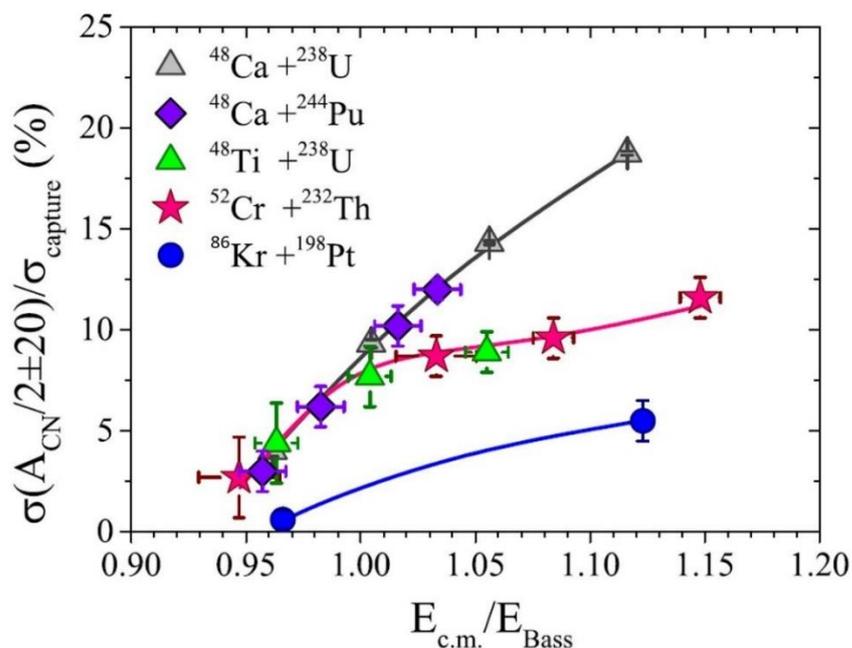


Рисунок 2. Вклад симметричных фрагментов $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. во все делительноподобные события, образующиеся в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ в зависимости от энергии взаимодействия.

В качестве первого шага для оценки сечения слияния-деления составного ядра можно рассмотреть вклад фрагментов с массами $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. На рис. 2 представлены относительные вклады симметричных фрагментов в сечения захвата реакций $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ и их зависимость от энергии взаимодействия.

Из рис. 2 хорошо видно, что выходы симметричных фрагментов $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. близки для реакций с ^{48}Ca , ^{48}Ti и ^{52}Cr при энергиях взаимодействия ниже барьера Басса. Однако при надбарьерных энергиях в реакциях с ионами ^{48}Ca вклад симметричных фрагментов $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. монотонно возрастает, а для реакций с ионами ^{48}Ti и ^{52}Cr практически не меняется и составляет около 8–9%. Это может свидетельствовать о значительном усилении процесса квазиделения при переходе от реакций с ионами ^{48}Ca к реакциям с ионами ^{48}Ti и ^{52}Cr . Для реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ при энергиях взаимодействия выше барьера Басса ($1,1E_{Bass}$) наблюдается небольшой рост вклада симметричных фрагментов. Для реакции $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, к сожалению, на сегодняшний день измерения проведены только до энергии взаимодействия $1,05E_{Bass}$, что не позволяет установить эту зависимость при более высоких энергиях. Вклад симметричных фрагментов $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. во все делительноподобные фрагменты (внутри контура в матрице масс-полной кинетической энергии на рис. 2) в реакции $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ возрастает от 0.5 % при энергии взаимодействия ниже Басс барьера до 5.5 % при энергии взаимодействия $1.12E_{Bass}$.

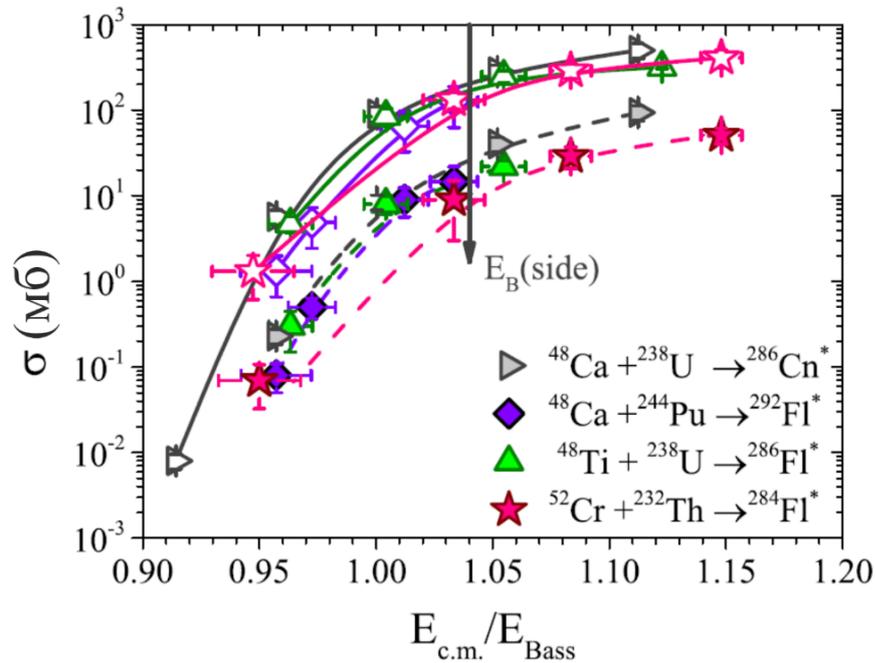


Рисунок. 3. Сечения захвата (светлые символы) и сечения симметричных фрагментов с массами $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. (закрашенные символы) для реакций $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$ и $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ в зависимости от энергии взаимодействия.

Абсолютные сечения захвата вместе с сечениями образования симметричных $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. фрагментов для реакций $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ [6], $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ [2], $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$, $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ представлены на рис. 3. Хорошо видно, что сечения захвата уменьшаются при переходе от реакций с участием ионов ^{48}Ca к реакциям с ионами ^{48}Ti и ^{52}Cr . При энергиях взаимодействия выше барьера Басса сечение захвата для $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ близко к геометрическому [7]; для реакций $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$ и $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ оно составляет около 60% от геометрического сечения.

При энергиях взаимодействия выше барьера Басса сечение образования симметричных фрагментов $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. уменьшается в 2 раза для реакции $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$ и в 4 раза для реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ по сравнению с реакцией $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$. Более того, как уже упоминалось выше, значительная часть симметричных фрагментов $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. образуется в процессе квазиделения. Поэтому можно получить только верхний предел сечения слияния-деления составного ядра.

Метод выделения процесса слияния-деления составного ядра Распределения полной кинетической энергии симметричных фрагментов с массами $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. для реакций $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ при энергиях взаимодействия выше барьера Басса представлены на рис. 4.

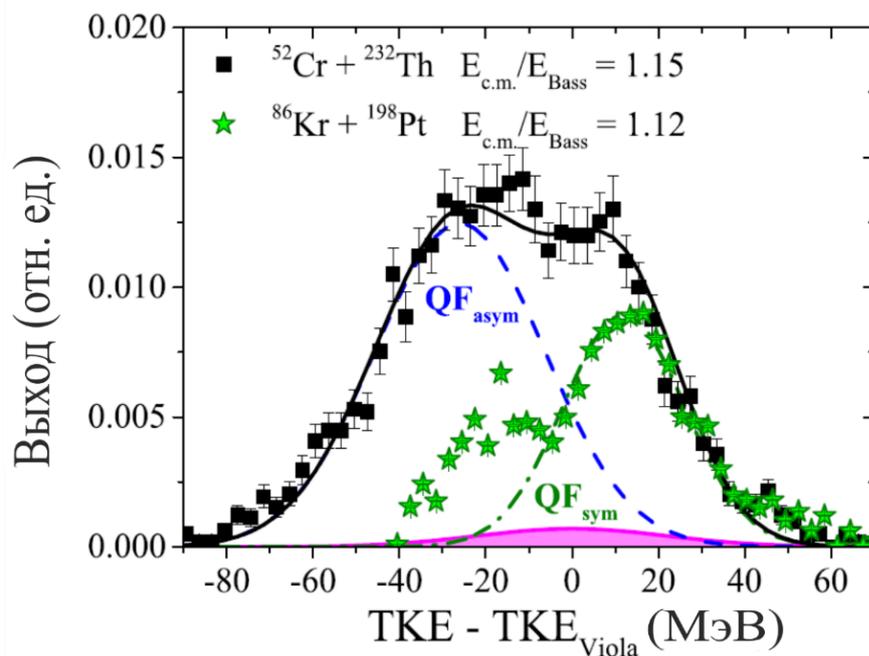


Рисунок. 4. Распределения полной кинетической энергии фрагментов с массами $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. для реакций $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ (квадраты) и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ (звездочки), приводящих к образованию одной и той же составной системы ^{284}Fl при энергиях взаимодействия выше кулоновского барьера. Заштрихованная область соответствует распределению полной кинетической энергии для слияния-деления составного ядра для реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$. Штриховые и штрихпунктирные кривые соответствуют асимметричному и симметричному квазиделению.

Для реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ распределение полной кинетической энергии имеет двугорбый характер, как и в реакциях $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$ и $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$. Отметим, что в реакциях ядер актинидов с ионами ^{48}Ca распределения полной кинетической энергии имеют форму, близкую к гауссовой, со средними значениями, близкими к ожидаемым для процесса слияния-деления составного ядра [2]. В реакции $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ распределение полной кинетической энергии также имеет двугорбую форму с ярко выраженной высокоэнергетической составляющей.

Для оценки вклада процесса слияния-деления составного ядра в области симметричных масс $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. распределение полной кинетической энергии реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ при энергии взаимодействия $1,15E_{Bass}$ было разложено в виде суммы трех гауссиан. Один из них связан с процессом слияния-деления составного ядра. Среднее значение полной кинетической энергии и дисперсия этой компоненты фиксируется на значениях, предсказанных из систематики деления составного ядра, представленной в работах [8] и [9], соответственно. Низкоэнергетическая составляющая связана с процессом асимметричного квазиделения, а высокоэнергетическая компонента с процессом симметричного квазиделения. Как было показано в работе [10], в реакции $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ (где асимметричное квазиделение является основным процессом даже в области симметричных масс) дисперсия полной кинетической энергии для процесса квазиделения не зависит от массы фрагментов, образованных в результате процесса квазиделения.

Таким образом, в процедуре подгонки фиксируется дисперсия компоненты асимметричного квазиделения, равная экспериментальному значению дисперсии полной кинетической энергии для массы фрагмента, имеющего максимальный выход в процессе асимметричного квазиделения. Параметры компоненты симметричного квазиделения были получены из разложения распределения полной кинетической энергии для реакции $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$, поскольку обе реакции ($^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ и $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$) приводят к одной и той же составной системе.

Получив оценку вклада фрагментов в области $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м., относящихся к процессу слияния-деления, и, зная вклад фрагментов в области $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. в общее число делительноподобных фрагментов, возможно оценить верхний предел вероятности образования составного ядра (P_{CN}) [7]. Согласно этому разложению распределения полной кинетической энергии на симметричное квазиделение, асимметричное квазиделение и компоненту слияния-деления составного ядра, для реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ вклад слияния-деления составного ядра составляет около 4% в области масс $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. Верхний предел вероятности слияния-деления составного ядра для реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ при этой энергии составляет всего 0.4% от сечения захвата. Расчетное сечение слияния-деления

составного ядра для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ составляет около 15% от сечения захвата. Следовательно, сечение слияния-деления составного ядра падает примерно в 40 раз при переходе от реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ к реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$.

В четвертой главе приводятся экспериментальные данные массово-энергетических распределений бинарных фрагментов, полученных в реакциях ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ [6,10]. Проводится анализ соотношения вкладов процессов слияния-деления и квазиделения в протекание ядерных реакций в широком диапазоне величин кулоновского фактора от 1472 до 2576 и в широком диапазоне значений среднего параметра делимости на примере реакций с тяжелыми ионами, приводящих к образованию составных систем с $Z = 108-120$.

На рис. 5 приведены массовые и энергетические распределения бинарных фрагментов, полученных в реакции $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$.

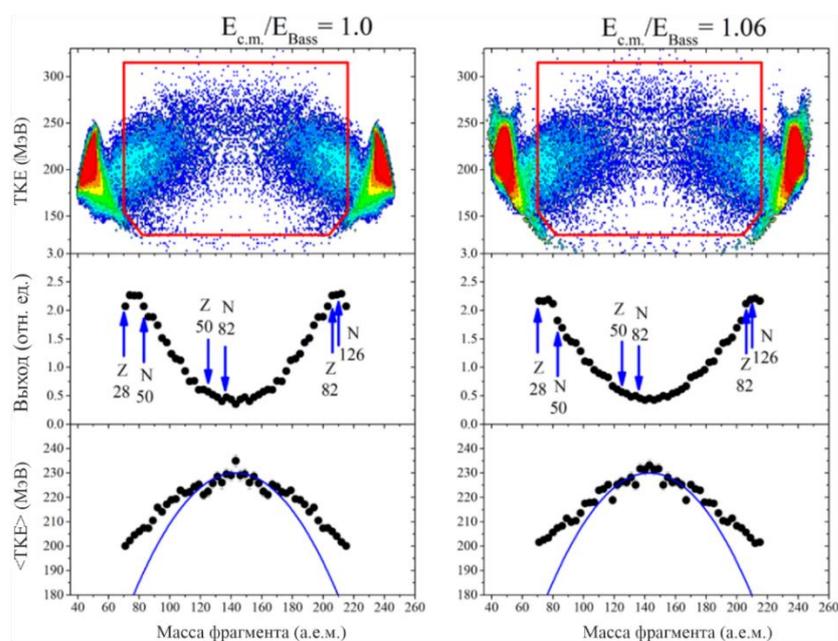


Рисунок 5. Массовое и энергетическое распределения бинарных фрагментов, полученных в реакции $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$ при энергиях взаимодействия вблизи кулоновского барьера. Сплошные линии в распределении средней полной кинетической энергии показывают ожидания в рамках модели жидкой капли. Стрелки в распределениях массы указывают положение нейтронной и протонной оболочек.

Распределение средней полной кинетической энергии для симметричных фрагментов имеет параболическую зависимость от массы фрагментов, тогда как для фрагментов, образованных в процессе асимметричного квазиделения, наблюдается значительное отклонение от параболической формы. Для фрагментов с массами 200–210 а.е.м.

экспериментальные значения полной кинетической энергии выше на 10–15 МэВ, чем предсказание модели жидкой капли.

На рис. 6 показаны массовые распределения делительноподобных фрагментов для реакций ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ при энергиях взаимодействия вблизи и выше кулоновского барьера.

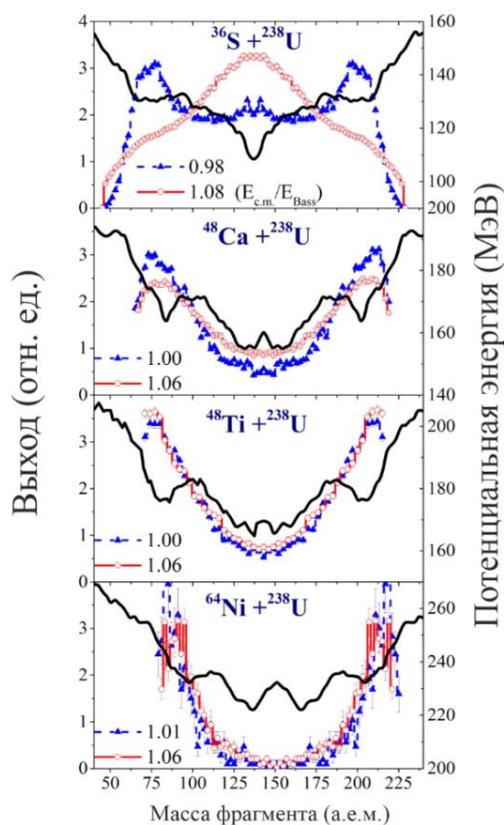


Рисунок. 6. Массовые распределения делительноподобных фрагментов для реакций ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ при энергиях взаимодействия вблизи (темные треугольники) и выше (светлые кружки) Басс барьера вместе с потенциальными энергиями систем в точке контакта (толстые линии). Энергии взаимодействия ($E_{c.m.}/E_{Bass}$) указаны на каждом графике.

Для реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ фрагменты, образованные в процессе асимметричного квазиделения, имеют максимальный выход около масс 200 а.е.м., а для $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ - более тяжелой массы 215 а.е.м.

В реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ экспериментальная ширина распределения фрагментов, образованных в процессе квазиделения, составляет около 27 а.е.м. при энергии взаимодействия вблизи кулоновского барьера и увеличивается до 38 а.е.м. при энергии 6% над кулоновским барьером, тогда как в реакциях с ионами ^{48}Ti и ^{64}Ni ширины пиков для фрагментов, образованных в процессе асимметричного квазиделения, примерно одинаковы для обеих энергий взаимодействия и составляют около 25 и 12 а.е.м., соответственно. Как

уже было сказано, число перенесенных нуклонов для процесса квазиделения связано со временем протекания реакции [5].

Масштаб времени для процесса асимметричного квазиделения составляет для реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ – примерно 6.5 зс, $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ – примерно 5.5 зс, для реакции $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$ – примерно 5 зс, для реакции $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ – примерно 4 зс.

Относительный выход фрагментов с массами $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$ а.е.м. по отношению к сечению захвата для реакций ^{238}U с ионами ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и ^{64}Ni показан на рис. 7.

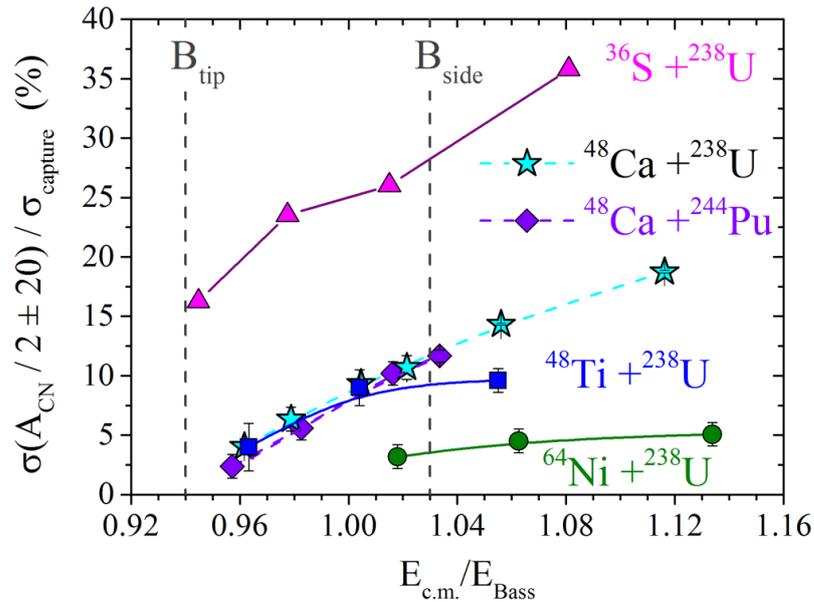


Рисунок. 7. Вклады симметричных фрагментов с массами $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$ а.е.м. в сечения захвата для исследуемых систем в зависимости от энергии взаимодействия.

Распределения полной кинетической энергии для симметричных фрагментов с массами $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$ а.е.м. для реакций ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ показаны на рис. 8.

Хорошо видно, что распределения полной кинетической энергии заметно меняются и имеют почти гауссову форму в случае реакций с ионами ^{36}S и ^{48}Ca и двугорбую форму для реакций с ионами ^{48}Ti и ^{64}Ni . Такое распределение полной кинетической энергии указывает на наличие других процессов наряду со слиянием-делением составного ядра в области симметричной массы $A_{\text{CN}}/2 \pm 20$ а.е.м. для реакций ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$.

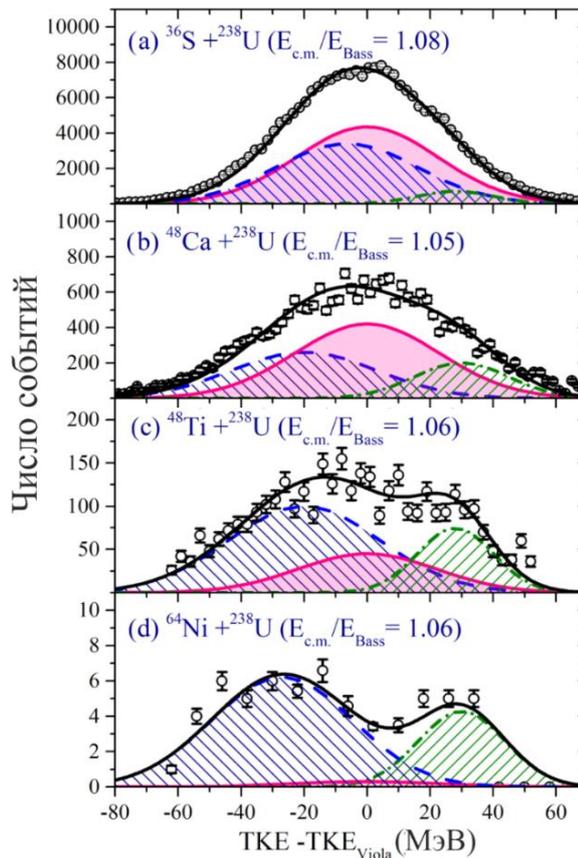


Рисунок. 8. Распределения полной кинетической энергии фрагментов с массами $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. для реакций ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ при энергиях взаимодействия выше Барьера Басса. Заштрихованная область соответствует распределению полной кинетической энергии для процесса слияния-деления составного ядра. Штриховые и штрихпунктирные кривые соответствуют процессам асимметричного и симметричного квазиделения, соответственно.

Как и в случае анализа распределений фрагментов реакций, приводящих к образованию составных систем с $Z=114$, предполагается, что масс-симметричные фрагменты могут быть образованы тремя различными процессами: процессом слияния-деления составного ядра, процессом симметричного квазиделения и «хвостом» процесса асимметричного квазиделения.

В пятой главе приводятся экспериментальные данные, полученные в реакциях $^{52,54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{68}\text{Zn}+^{232}\text{Th}$ при энергиях взаимодействия вблизи кулоновского барьера, приводящих к образованию составной системы с $Z = 120$. Приводится детальный анализ, а также сравнение экспериментальных данных, полученных в реакциях, указанных выше, и данных, полученных ранее в реакции $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ [6]. Дается анализ времени протекания процесса асимметричного квазиделения для всего комплекса исследованных реакций. Сделаны выводы о соотношении вкладов процессов слияния-деления и квазиделения в

протекание ядерной реакции в зависимости от кулоновского фактора (Z_1Z_2) и среднего параметра делимости (x_m).

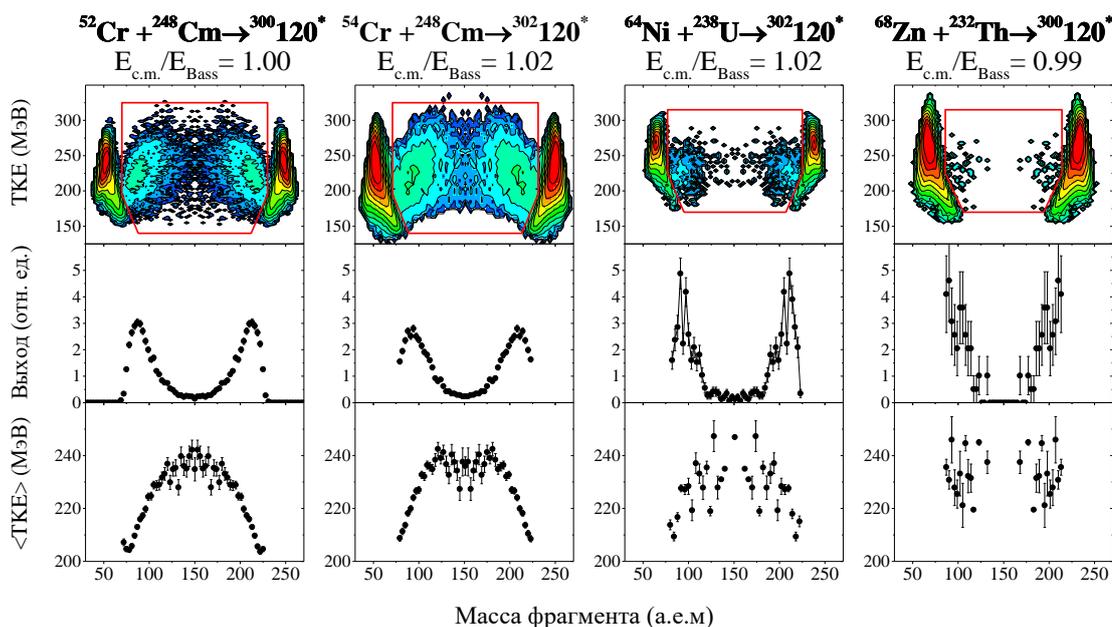


Рисунок. 9. Массовое и энергетическое распределения бинарных фрагментов, образующихся в реакциях $^{52,54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ и $^{68}\text{Zn}+^{232}\text{Th}$, приводящих к образованию составных систем с $Z = 120$ при энергиях взаимодействия вблизи кулоновского барьера.

Массово-энергетические распределения первичных бинарных фрагментов, полученных в реакциях $^{52,54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ и $^{68}\text{Zn}+^{232}\text{Th}$ при энергиях взаимодействия вблизи кулоновского барьера, представлены на рис. 9.

Массово-энергетические распределения для реакций с ионами $^{52,54}\text{Cr}$ аналогичны распределениям, получаемым в реакциях с ионами ^{48}Ca при взаимодействии с актинидными ядрами-мишенями [2]. Отчетливо наблюдается ярко выраженная компонента асимметричного квазиделения с выходом тяжелого фрагмента вблизи дважды магического свинца. Массовые распределения для реакций с использованием ионов ^{64}Ni и ^{68}Zn также асимметричны. Наиболее вероятные массы тяжелых фрагментов, образующихся в процессе квазиделения, составляют 210–212 а.е.м. Однако пики фрагментов, образованных в процессе квазиделения в реакциях с использованием ионов ^{64}Ni и ^{68}Zn , заметно уже по сравнению с фрагментами, образованными в реакциях с ионами $^{52,54}\text{Cr}$. Для реакций с использованием ионов ^{68}Zn фрагменты квазиделения еще сильнее перекрываются с квазиупругими событиями, а пик тяжелых фрагментов квазиделения смещается в сторону более асимметричных масс. Оценка времени протекания процесса квазиделения была сделана, как и в предыдущих главах и для реакций $^{52}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ и $^{68}\text{Zn}+^{232}\text{Th}$ составила около 5.3, 5.7, 4 и 3 зс соответственно.

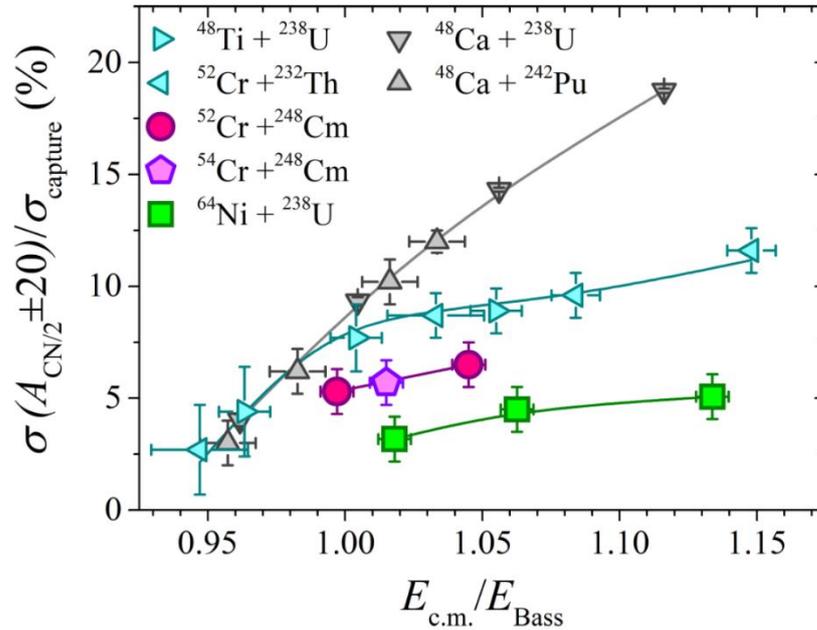


Рисунок. 10. Вклады симметричных фрагментов $A_{CN/2} \pm 20$ а.е.м. в сечения захвата в зависимости от энергии взаимодействия над барьером Басса для исследованных систем в сравнении с реакциями $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$, ^{244}Pu , $^{48}\text{Ti}+^{238}\text{U}$ и $^{52}\text{Cr}+^{232}\text{Th}$.

На рис. 10 представлены вклады симметричных фрагментов $A_{CN/2} \pm 20$ а.е.м. в сечение захвата для реакций $^{52,54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$, $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ и их зависимость от энергии взаимодействия. В реакции $^{68}\text{Zn}+^{232}\text{Th}$ симметричных фрагментов в диапазоне масс $A_{CN/2} \pm 20$ а.е.м. не наблюдалось. На данном рисунке просуммированы все результаты, представленные в рамках данной работы (для систем $Z=114$ и 120). Для сравнения показан выход симметричных фрагментов, образующихся в реакции $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$, приводящей к образованию составной системы с $Z = 112$ [2,5,11]. Как хорошо видно из рис. 10, вклад симметричных фрагментов в реакции $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ монотонно возрастает с ростом энергии взаимодействия, тогда как в случае реакций $^{52}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$ и $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ рост очень медленный.

Оценка вклада фрагментов, образующихся в процессе слияния-деления в общее число делительноподобных фрагментов, делалась аналогично процедуре, используемой в главах 3 и 4. На рисунке 11 показана зависимость вероятности слияния-деления от среднего параметра делимости.

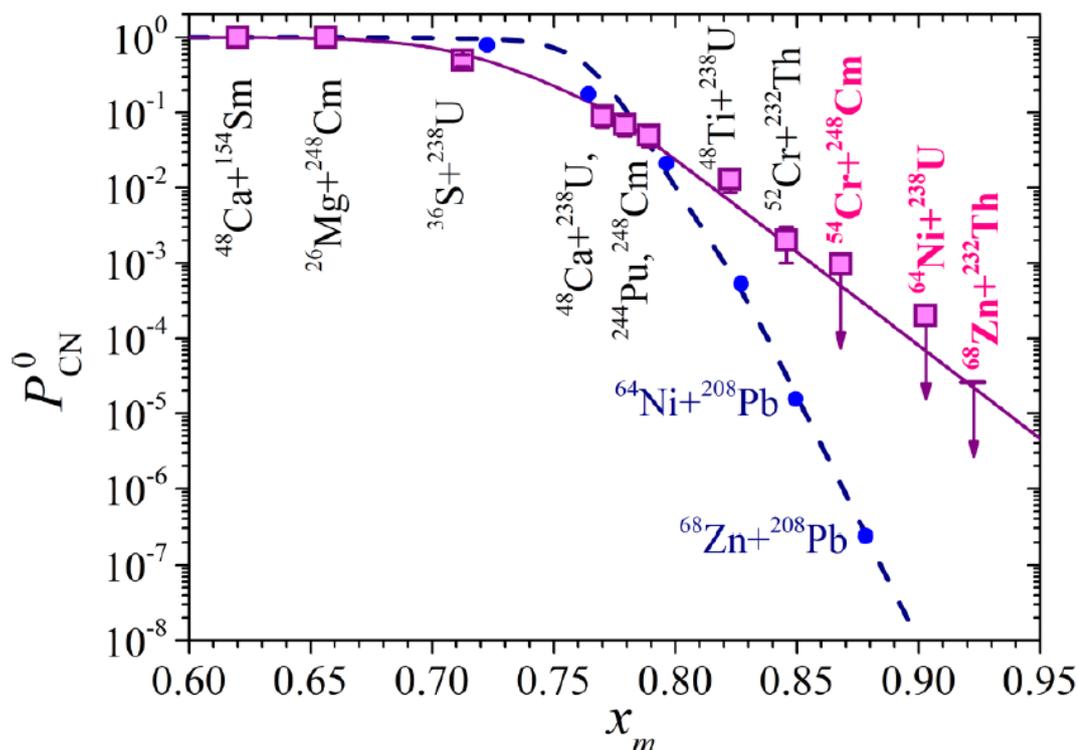


Рисунок. 11. Вероятность образования составного ядра для реакций $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{68}\text{Zn} + ^{232}\text{Th}$ в сравнении с вероятностями слияния в реакциях горячего синтеза (с сильно деформированными ядрами) при энергиях взаимодействия выше кулоновского барьера в зависимости от среднего параметра делимости реакции. Кружками обозначены рассчитанные вероятности слияния для реакций холодного синтеза [9].

На основе анализа массово-энергетических распределений симметричных фрагментов $A_{CN}/2 \pm 20$ а.е.м. реакции сделаны оценки вероятности слияния-деления при энергиях выше кулоновского барьера: около 10^{-3} для реакции $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$, 10^{-4} для реакции $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ и ниже 10^{-5} для реакции $^{68}\text{Zn} + ^{232}\text{Th}$. Заметим, что в случае с участием ионов ^{48}Ca и ядер актинидов вероятности слияния-деления, полученные с использованием того же подхода в [2], составляли около 10^{-1} .

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

- Выполнена модернизация установки CORSET с целью увеличения эффективности регистрации фрагментов реакции, скорости набора данных, надежности и достоверности получаемых данных.
- Получено подтверждение, что при значениях параметров входного канала, таких как кулоновский фактор ($Z_1Z_2 = 2808$) и средний параметр делимости ($x_m = 0.917$), в реакции $^{86}\text{Kr} + ^{198}\text{Pt}$ основным процессом является квазиделение, а вклад компоненты процесса

слияния-деления составного ядра пренебрежимо мал. Эта информация позволяет корректно учитывать вклад фрагментов, образующихся в процессе квазиделения, в массовые и энергетические распределения продуктов реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$, ведущей к образованию той же составной системы ^{284}Fl .

- По результатам анализа массовых и энергетических распределений сделана оценка вероятности образования составного ядра ^{284}Fl , формирующегося в реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$ при энергии взаимодействия на 15% выше кулоновского барьера. Установлено, что при энергиях взаимодействия выше кулоновского барьера вероятность образования составных ядер уменьшается примерно в 4 раза при переходе от реакции $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ к реакции $^{48}\text{Ti} + ^{238}\text{U}$ и примерно в 25 раз при переходе от реакции $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ к реакции $^{52}\text{Cr} + ^{232}\text{Th}$.
- Из анализа массовых и энергетических распределений фрагментов реакции определены вероятности образования составных ядер. При энергии взаимодействия ниже кулоновского барьера вероятности образования составных ядер сильно подавлены. Подавление тем больше, чем тяжелее система (больше Z_1Z_2 и x_m). Вероятность образования составных ядер при энергиях взаимодействия выше кулоновского барьера также уменьшается при увеличении среднего параметра делимости систем и кулоновского фактора. Эта зависимость носит экспоненциальный характер.
- Установлено, что вклад фрагментов, образующихся в процессе квазиделения, резко уменьшается при переходе от систем с $Z_1Z_2 \approx 2300$ (ионы $^{52,54}\text{Cr}$) к системам с $Z_1Z_2 > 2500$ (ионы ^{64}Ni и особенно ионы ^{68}Zn). Показано, что для реакций с использованием ионов ^{64}Ni и ^{68}Zn основными каналами реакции становятся передача нескольких нуклонов и глубоконеупругие взаимодействия.
- На основе анализа приведенных данных сделана оценка вероятности образования составных ядер в реакциях $^{52,54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$ и $^{68}\text{Zn} + ^{232}\text{Th}$. Полученные вероятности образования составных ядер также хорошо согласуются с зависимостью вероятности слияния от среднего параметра делимости, полученной для реакций деформированных ядер с ионами ^{36}S , ^{48}Ca , ^{48}Ti и ^{64}Ni . Обнаружено уменьшение вероятности образования составного ядра примерно на два порядка (10^2 раз) при переходе от реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ к реакции $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$ и более чем на четыре порядка (10^4 раз) при переходе от реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ к реакции $^{68}\text{Zn} + ^{232}\text{Th}$ при энергиях взаимодействия выше кулоновского барьера. Основываясь на полученной величине вероятности образования составных ядер для реакции $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$, ожидается, что сечение образования сверхтяжелых ядер с $Z = 120$ составит около нескольких десятков фемтобарн. В случае же реакций $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ и $^{68}\text{Zn} + ^{232}\text{Th}$ сечения образования сверхтяжелых ядер как минимум в 10-100 раз ниже.

Перечень публикаций по теме диссертационной работы:

1. E.M. Kozulin, G.N. Knyazheva, K.V. Novikov, I.M. Itkis, M.G. Itkis, S.N. Dmitriev, Yu.Ts. Oganessian, A.A. Bogachev, N.I. Kozulina, I. Harca, W.H. Trzaska, T.K. Ghosh. *Fission and quasifission of composite systems with $Z=108-120$: transition from the reactions with S and Ca ions to Ti and Ni* . // Phys. Rev. C 94, 054613 (2016).
2. E. M. Kozulin, G. N. Knyazheva, T. K. Ghosh, A. Sen, I. M. Itkis, M. G. Itkis, K. V. Novikov, I. N. Diatlov, I. V. Pchelintsev, C. Bhattacharya, S. Bhattacharya, K. Banerjee, E. O. Saveleva, I. V. Vorobiev. *Fission and quasifission of the composite system $Z = 114$ formed in heavy-ion reactions at energies near the Coulomb barrier*. // Phys. Rev. C 99, 014616 (2019).
3. K. V. Novikov, E. M. Kozulin, G. N. Knyazheva, I. M. Itkis, A. V. Karpov, M. G. Itkis, I. N. Diatlov, M. Cheralu, B. Gall, Z. Asfari, N. I. Kozulina, D. Kumar, I. V. Pchelintsev, V. N. Loginov, A. E. Bondarchenko, P. P. Singh, I. V. Vorobiev, S. Heinz, W. H. Trzaska, E. Vardaci, N. Tortorelli, C. Borcea & I. Harca. *Formation and Decay of the Composite System $Z = 120$ in Reactions with Heavy Ions at Energies Near the Coulomb Barrier*. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 84, 495–499 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1062873820040206>.
4. K. V. Novikov, E. M. Kozulin, G. N. Knyazheva, I. M. Itkis, M. G. Itkis, A. A. Bogachev, I. N. Diatlov, M. Cheralu, D. Kumar, N. I. Kozulina, A. N. Pan, I. V. Pchelintsev, I. V. Vorobiev, W. H. Trzaska, S. Heinz, H. M. Devaraja, B. Lommel, E. Vardaci, S. Spinosa, A. Di Nitto, A. Pulcini, S. V. Khlebnikov, Pushpendra P. Singh, Rudra N. Sahoo, B. Gall, Z. Asfari, C. Borcea, I. Harca, and D. M. Filipescu. *Investigation of fusion probabilities in the reactions with $^{52,54}Cr$, ^{64}Ni , and ^{68}Zn ions leading to the formation of $Z = 120$ superheavy composite systems*. // Phys. Rev. C 102, 044605. (2020)

Список цитируемой литературы

- [1] Козулин Э.М., Богачев А.А., Иткис М.Г., Иткис Ю.М., Княжева Г.Н., Кондратьев Н.А., Крупа Л., Покровский И.В., Прохорова Е.В. *Времяпролетный спектрометр CORSET для измерения бинарных продуктов ядерных реакций* // ПТЭ, №1 (2008) с. 55-66.
- [2] E.M. Kozulin, G.N. Knyazheva, I.M. Itkis, M.G. Itkis, A.A. Bogachev, E.V. Chernysheva, L. Krupa, F. Hanappe, O. Dorvaux, L. Stuttgé, W. H. Trzaska, C. Schmitt, and G. Chubarian. *Fusion-fission and quasifission of superheavy systems with $Z=110-116$ formed in ^{48}Ca -induced reactions*. // Phys. Rev. C 90 (2014) 054608.

- [3] R. du Rietz, E. Williams, D. J. Hinde, M. Dasgupta, M. Evers, C. J. Lin, D. H. Luong, C. Simenel, and A. Wakhle. *Mapping quasifission characteristics and timescales in heavy element formation reactions* // Phys. Rev. C 88 (2013) 054618.
- [4] R. Bass. *Fusion of heavy nuclei in a classical model* // Nucl. Phys. A231, (1974) 45.
- [5] W.Q. Shen, J. Albinski, A. Gobbi, S. Gralla, K.D. Hildenbrand, N. Herrmann, J. Kuzminski, W.F.J. Müller, A. Olmi, H. Stelzer, B.B. Back, S. Bjrnholm, S.P. Srensen. *Fission and Quasifission in U-induced Reactions* // Phys. Rev. C 36 (1987) 115-142.
- [6] E.M. Kozulin, G.N. Knyazheva, I.M. Itkis, M.G. Itkis, A.A. Bogachev, L. Krupa, T.A. Loktev, S.V. Smirnov, V.I. Zagrebaev, J. Äystö, W.H. Trzaska, V.A. Rubchenya, E. Vardaci, A.M. Stefanini, M. Cinausero, L. Corradi, E. Fioretto, P. Mason, G.F. Prete, R. Silvestri, S. Beghini, G. Montagnoli, F. Scarlassara, F. Hanappe, S.V. Khlebnikov, J. Kliman, A. Brondi, A. Di Nitto, R. Moro, N. Gelli, S. Szilner. *Investigation of the reaction $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ being an option of synthesizing element 120.* // Phys. Lett. B. 686 (2010) 227.
- [7] V.I. Zagrebaev and W. Greiner. *Cross sections for the production of superheavy nuclei* // Nucl. Phys. A 944 (2015) 257.
- [8] V.E. Viola, K. Kwiatkowski and M. Walker. *Systematics of fission fragment total kinetic energy release* // Phys. Rev. C 31, (1985) 1550.
- [9] M.G. Itkis and A. Ya. Rusanov. *The fission of heated nuclei in reactions involving heavy ions: static and dynamical aspects* // Phys. Part. Nucl. 29 (1998) 160.
- [10] I.M. Itkis, E.M. Kozulin, M.G. Itkis, G.N. Knyazheva, A.A. Bogachev, E.V. Chernysheva, L. Krupa, Yu.Ts. Oganessian, and V.I. Zagrebaev. *Fission and quasifission modes in heavy-ion-induced reactions leading to the formation of Hs** // Phys. Rev. C 83 (2011) 064613.
- [11] K. Nishio, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, H. Makii, Y. Wakabayashi, H. Ikezoe, K. Hirose, T. Ohtsuki, Y. Aritomo and S. Hofmann. *Fusion probabilities in the reactions $^{40,48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ at energies around the Coulomb barrier* // Phys. Rev. C 86, (2012) 034608.