

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.17

ЗУБОВ

Андрей Семенович

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ПРИ АНАЛИЗЕ РЕАКЦИЙ С ТЯЖЕЛЫМИ
ИОНАМИ В РАМКАХ МОДЕЛИ ДВОЙНОЙ ЯДЕРНОЙ
СИСТЕМЫ**

Специальность: 01.04.16

"Физика ядра и элементарных частиц"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент,

Иванова С. П.

кандидат физико-математических наук, с.н.с.,

Антоненко Н. В.

Дубна 2008

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
доцент, С. П. Иванова
кандидат физико-математических наук
с.н.с., Н. В. Антоненко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А. В. Игнатюк (ГНЦ РФ ФИЭ, Обнинск)
доктор физико-математических наук,
Ю. М. Чувильский (НИИ ЯФ им. Д.В.Скобельцына МГУ)

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт
(Государственный Университет)

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2008 г. в “ _____ ” на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 при Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

А. Б. Арбузов

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы. Предметом диссертации является описание реакций с тяжелыми ионами, представляющих интерес для современной экспериментальной и теоретической ядерной физики: синтеза сверхтяжелых элементов, получения нейтронодефицитных изотопов в области актининов, реакций неполного слияния, а также реакций квазиделения, сопровождающихся эмиссией предразрывных нейтронов. Для анализа этих процессов мы предлагаем подход, основанный на статистических методах, в рамках модели двойной ядерной системы (ДЯС). Важным является исследование применимости различных способов описания плотности уровней (на основе модели ферми-газа и модели с коллективным усилением плотности уровней) и учета оболочечных эффектов, а также изучение зависимости результатов от вариации параметров модели и ядерных характеристик (энергий связи, барьеров деления, оболочечных поправок и т.д.).

Синтез сверхтяжелых ядер в настоящее время является одним из главных направлений исследований в физике тяжелых ионов. Особый интерес представляют ядра вблизи т.н. "острова стабильности в котором оболочечная структура оказывает существенное стабилизирующее влияние на их времена жизни. Сечения образования и функции возбуждения испарительных остатков, рассчитанные в рамках описанного нами подхода хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет предложить оптимальные реакции холодного, горячего и неполного слияния, ведущие к образованию еще неизвестных сверхтяжелых элементов. Сравнивая результаты, полученные на основе различных теоретических моделей, предсказывающих ядерные свойства, мы можем ответить на вопрос об их применимости и точности предсказания ими магических чисел в данной области.

Экспериментальный интерес представляют также реакции слияния с тяжелыми ионами, в которых в качестве составных ядер образуются нейтронодефицитные изотопы. Поскольку энергия отрыва нейтрона в них достаточно высока, в процессе их девозбуждения возможно испускание не только нескольких нейтронов, но и заряженных частиц, что ведет к увеличению числа наблюдаемых испарительных каналов и образованию испарительных остатков с разными значениями Z . Предложенный нами подход позволяет описать конкуренцию этих каналов с хорошей точностью. На основе анализа экспериментальных данных можно изучить влияние оболочечных эффектов в этих реакциях, особенно в

области изотопов вблизи магического числа $N=126$ (последняя замкнутая оболочка перед областью сверхтяжелых элементов). Важную информацию о механизме слияния можно получить, исследуя образование одного и того же возбужденного составного ядра в реакциях с различной массовой и зарядовой асимметрией во входном канале. Кроме того, востребована теоретическая оценка сечений образования нейтронодефицитных изотопов бария, которые являются кандидатами для поиска кластерной радиактивности.

Существует целый ряд экспериментальных исследований эмиссии нейтронов в реакциях слияния-деления с тяжелыми ионами при достаточно высоких энергиях возбуждения промежуточных составных ядер (≥ 70 МэВ). В этих работах определяется множественность послеразрывных нейтронов, испущенных фрагментами деления, и предразрывных, вылетевших из системы до того, как произошел процесс деления. При более низких энергиях возбуждения исследование нейтронной эмиссии в реакциях слияния и квазиделения сопряжено с определенными сложностями, поскольку число испаряемых частиц мало. Мы предлагаем увеличить это число, выбрав в качестве налетающих ядер изотопы с большим числом нейтронов. Нами предложено теоретическое описание вылета предразрывных нейтронов в реакциях квазиделения $^{62-73}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ и произведена оценка вероятности этого процесса на основе модели ДЯС.

Цель работы состоит в статистическом описании целого ряда реакций с тяжелыми ионами в рамках модели ДЯС: реакций полного слияния, приводящих к образованию сверхтяжелых элементов и нейтронодефицитных актинидов, реакций неполного слияния, а также реакций квазиделения, сопровождающихся эмиссией предразрывных нейтронов.

Научная новизна и практическая ценность. Предложен целостный подход для описания различных реакций с тяжелыми ионами на основе статистических методов в рамках модели ДЯС. Для этого в исследуемой области (Z, A) мы предлагаем использовать следующий алгоритм: 1) выбор определенной микроскопическо-макроскопической модели, в рамках которой рассчитаны ядерные характеристики в данной области; 2) определение и проверка параметров статистических моделей в сравнении результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными для нескольких ядер; 3) фиксация параметров во всей рассматриваемой области ядер; 4) описание других экспериментальных

данных и предсказание сечений в реакциях, еще не исследованных экспериментально. В отличие от других теоретических работ наш подход позволяет минимизировать число используемых параметров. Найдена связь между параметрами модели ферми-газа и модели с учетом коллективного усиления плотности уровней.

Выживаемости четных и нечетных сверхтяжелых ядер были получены на основе различных методов расчета плотности уровней, а также энергий отделения нейтрона и барьеров деления, предсказанных в разных теоретических рассуждениях. Анализируя результаты наших расчетов, мы пришли к заключению, что, поскольку экспериментально измеренные величины сечений образования испарительных остатков падают с ростом Z на четыре порядка от $Z = 104$ до $Z = 112$, главной причиной такого падения является уменьшение вероятности полного слияния с ростом Z в реакциях холодного слияния на мишенях Pb и Bi. Сечения образования соответствующих испарительных остатков, рассчитанные в работе, оказались близкими к экспериментальным. Кроме того, наши расчеты показали, что изотопы $^{260,261}\text{Vh}$, ^{263}Hs и ^{265}Mt , еще не найденные экспериментально, могут быть получены с довольно большими сечениями. Анализируя результаты наших расчетов, мы пришли к выводу, что синтез сверхтяжелых изотопов с $Z > 114$ в реакциях на мишенях Pb и Bi представляется маловероятным в настоящее время.

Сечения образования испарительных остатков и функции возбуждения были рассчитаны для различных нейтронодефицитных изотопов. Вблизи максимумов функций возбуждения, которые, главным образом, интересны в теории и эксперименте, рассчитанные величины оказались близкими к экспериментальным практически для всех ядер и каналов девозбуждения при минимальной вариации параметров по сравнению с другими известными работами. Мы также показали, что низкоэнергетические "хвосты" функций возбуждения в некоторых испарительных каналах исследуемых реакций могут быть чувствительны к примесям в мишенях других изотопов или соседних ядер. Нами были предложены несколько реакций для образования с достаточно большими сечениями сильно нейтронодефицитных изотопов бария, которые являются кандидатами для поиска кластерной радиактивности.

На основе модели ДЯС мы впервые предложили теоретическое описание реакций неполного слияния, ведущих к синтезу сверхтяжелых элементов. Пред-

ложенные нами реакции $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$, ^{243}Am , $^{244,246,248}\text{Cm}$ приводят к получению ядер с $101 \leq Z \leq 108$, которые лежат в области масс между сверхтяжелыми изотопами, полученными в реакциях холодного слияния на мишенях Рb и Вi и горячего слияния на актинидах.

На основе модели ДЯС была теоретически описана эмиссия нейтронов в реакциях квазиделения, для экспериментального исследования которой мы предложили реакции $^{62-73}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$, и произвели оценку вероятности этой эмиссии в рамках модели ДЯС. Вероятность эмиссии нейтрона из ДЯС оказалась сильно чувствительной к энергии возбуждения ДЯС. Таким образом, регистрация этих нейтронов и соответствующих продуктов квазиделения может помочь нам определить энергию возбуждения предразрывной конфигурации и установить ее форму. Нейтронная эмиссия из ДЯС уменьшает энергию возбуждения системы и, следовательно, может помочь получить почти холодные и сравнительно долгоживущие ДЯС, которые можно интерпретировать как гипердеформированные ядерные состояния.

Апробация работы. Результаты, полученные в работе докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, а также на следующих международных конференциях:

1. International Symposium "Nuclear Clusters: from light exotic to superheavy nuclei" (Rauischholzhausen Castle, Germany) 2002.
2. DPG Conference on Nuclear Physics (Koeln, Germany) 2004.
3. Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Белгород, Россия) 2004.
4. International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2004) (Peterhof, Russia) 2004.
5. International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2006) (Khanty-Mansiysk, Russia) 2006.
6. International Conference "Trends in Nuclear Physics 2006" (Zakopane, Poland) 2006.

7. Helmholtz International Summer School "Nuclear Theory and Astrophysical Applications (Dubna, Russia) 2007.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ в реферируемых журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация, общим объемом 110 страниц, состоит из введения, 4-х глав, заключения и одного приложения, содержит 5 таблиц, 37 рисунков и список цитируемой литературы из 154 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются предмет и цель диссертации, а также излагается краткое содержание диссертации.

В первой главе представлена схема расчета сечения образования испарительного остатка σ_{ER} в реакциях полного слияния в рамках модели ДЯС. Важнейшими величинами, оказывающими влияние на это сечение, являются P_{CN} – вероятность образования составного ядра после захвата и W_{sur} – выживаемость полученного составного ядра относительно деления.

Вероятность образования составного ядра P_{CN} зависит от конкуренции двух каналов: полного слияния, то есть перехода ДЯС через внутренний барьер $B_\eta = B_{fus}^*$ по η в состояние $\eta = \pm 1$, и квазиделения, то есть ее перехода через барьер $B_R = B_{qf}$ по R в сторону $R \rightarrow \infty$. Ширины этих процессов рассчитываются с помощью формулы Крамерса для квазистационарного потока вероятности через барьер. Величины барьеров B_{fus}^* и B_{qf} можно определить, построив поверхность потенциальной энергии ДЯС.

Выживаемость возбужденного составного ядра определяется конкуренцией эмиссии нейтронов и заряженных частиц с делением. Для нахождения соответствующих ширин нужно знать энергии связи и барьеры деления и задать метод расчета плотности уровней. Затухание оболочечных эффектов с энергией возбуждения в модели ферми-газа учитывается в микроскопической части барьера деления. Основными параметрами, влияющими на результаты расчета являются параметр плотности уровней a и отношение a_f/a , которое характеризует усиление плотности уровней в седловой точке. Мы проводим анализ за-

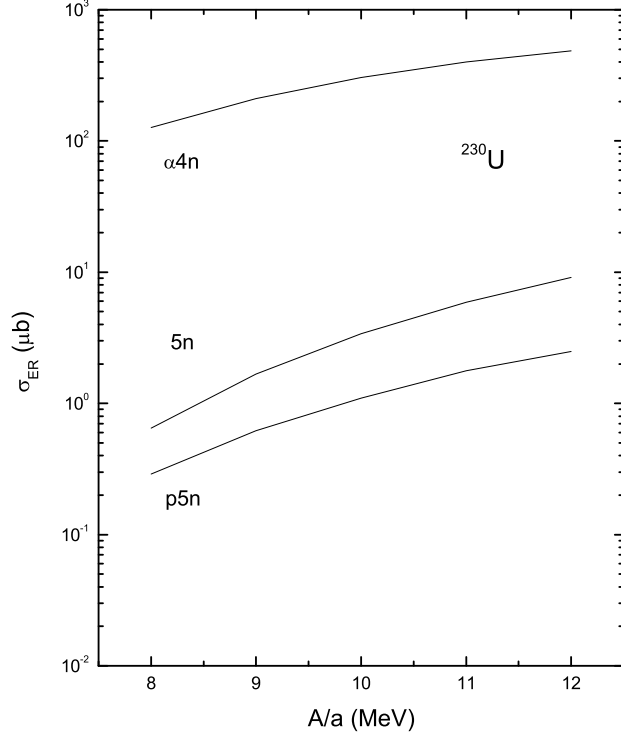


Рис. 1: Зависимость сечений образования испарительных остатков для $5n$, $p5n$, и $\alpha 4n$ каналов от параметра плотности уровней a в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$.

висимости полученных результатов от этих параметров. На рис. 1 представлен пример зависимости максимумов функций возбуждения от параметра плотности уровней в различных испарительных каналах реакции $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$. Как видно из рисунка, при изменении параметра a от $A/8$ до $A/12$ величина σ_{ER} меняется достаточно сильно, в пределах порядка, однако отношение максимумов различных каналов не превосходит фактора 2–3. В модели с коллективным усилением учитывается вклад в плотность уровней коллективных колебательных и вращательных степеней свободы с помощью фактора коллективного усиления $K_{coll} = K_{rot}K_{vib}$. Приводятся характерные величины факторов K_{vib} и K_{rot} для нескольких сверхтяжелых ядер. В этой модели затухание оболочечных эффектов с энергией возбуждения учитывается в параметре плотности уровней. Рассматриваются различные систематики асимптотического параметра уровней $\tilde{a}(A)$, изучается зависимость результатов от этих систематик и параметра затухания оболочечных эффектов E'_D . Устанавливается связь между параметрами

модели ферми-газа и модели с коллективным усилением плотности уровней. Приводится описание метода расчета кулоновского барьера в случае эмиссии заряженных частиц.

Приводится пример расчета функции возбуждения - энергетической зависимости сечения образования составного ядра. Анализируется влияние различных факторов на вид этой функции.

Во второй главе мы рассматриваем реакции, ведущие к образованию сверхтяжелых ядер и нейтронодефицитных актинидов. Сечения образования испарительных остатков и функции возбуждения рассчитываются в рамках модели, описанной в первой главе.

Выживаемости четных и нечетных сверхтяжелых ядер были получены на основе различных методов расчета плотности уровней, а также энергий отделения нейтрона и барьеров деления, предсказанных в разных теоретических моделях. В расчетах с данными из работ [1] и [2] отношение ширин нейтронной эмиссии и деления Γ_n/Γ_f в $1n$ испарительном канале уменьшается с увеличением Z до $Z = 112$, и затем сильно возрастает при $Z = 114$, указывая на увеличение ядерной стабильности. Расчеты, выполненные для $1n$ испарительного канала с теоретическими предсказаниями из работ [1–4] дают близкие результаты для $Z < 114$. Использование данных из работ [3, 4] приводит с теми же параметрами к значениям Γ_n/Γ_f , много меньшим, чем при использовании данных из работ [1] и [2] при $Z \geq 114$. Таким образом, сечения образования испарительных остатков при $Z \geq 114$ больше в случае расчетов с данными из работ [1] и [2], чем с данными из работ [3, 4]. При изменении заряда составного ядра от $Z = 102$ до $Z = 120$ величина W_{sur} изменяется в пределах двух порядков. При $104 < Z < 112$ рассчитанные выживаемости практически одни и те же. Таким образом, поскольку экспериментально измеренные величины сечений образования испарительных остатков падают с ростом Z на четыре порядка от $Z = 104$ до $Z = 112$, мы можем прийти к заключению, что главной причиной такого падения является уменьшение вероятности полного слияния с ростом Z в реакциях холодного слияния на мишенях РЬ и ВІ. Выживаемости, рассчитанные для xn испарительных каналов ($x > 2$), оказались очень чувствительными к методу расчета плотности уровней и выбору параметров.

Выживаемости сверхтяжелых ядер рассчитывались на основе недавних тео-

Таблица 1: Экспериментальные σ_{ER}^{exp} и теоретические σ_{ER}^{th} значения сечений образования испарительных остатков в $2n$ и $3n$ испарительных каналах для реакций с тяжелыми ионами при указанной энергии возбуждения E_{CN}^* составного ядра. Результаты были получены с выживаемостями, рассчитанными по модели ферми-газа (ферми) и модели с коллективным усилением плотности уровней (колл).

Реакции	E_{CN}^* (МэВ)	σ_{ER}^{th} (ферми)	σ_{ER}^{th} (колл)	σ_{ER}^{exp}
$^{48}\text{Ca}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{255}103+2n$	20	0.5 мкб	0.15 мкб	
$^{48}\text{Ca}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{254}103+3n$	30.5	25 нб	14 нб	
$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{256}104+2n$	21.5	44 нб	44 нб	$18.5_{-1.42}^{+1.42}$ нб
$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{255}104+3n$	29.5	2.3 нб	4.5 нб	$0.993_{-0.21}^{+0.21}$ нб
$^{50}\text{Ti}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{257}105+2n$	21.9	1.7 нб	0.6 нб	$2.4_{-0.3}^{+0.3}$ нб
$^{50}\text{Ti}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{256}105+3n$	31	150 пб	70 пб	190_{-40}^{+40} пб
$^{54}\text{Cr}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{260}106+2n$	22	0.27 нб	0.16 нб	$0.5_{-0.069}^{+0.069}$ нб
$^{54}\text{Cr}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{259}106+3n$	32	27 пб	41 пб	10_{-8}^{+23} пб
$^{54}\text{Cr}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{261}107+2n$	22	14.5 пб	3 пб	
$^{54}\text{Cr}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{260}107+3n$	32	3.2 пб	0.8 пб	
$^{58}\text{Fe}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{264}108+2n$	20.5	4.7 пб	5.1 пб	$4.54_{-2.9}^{+5.7}$ пб
$^{58}\text{Fe}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{263}108+3n$	32	0.96 пб	1.5 пб	
$^{58}\text{Fe}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{265}109+2n$	22	5 пб	1.2 пб	

ретических предсказаний их свойств в работе [5]. В вычислениях использовались два разных метода расчета плотности уровней. Сечения образования испарительных остатков разных сверхтяжелых ядер были получены для реакций $^{48}\text{Ca}+^{204,206,208}\text{Pb}$ и ^{50}Ti , ^{54}Cr , $^{58}\text{Fe}+^{208}\text{Pb}$, ^{209}Bi . Результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. В табл. 1, например, сравниваются рассчитанные нами и полученные экспериментально сечения σ_{ER} в $2n$ и $3n$ испарительных каналах. Предсказанные нами сечения образования $^{260,261}\text{Vh}$, ^{263}Ns и ^{267}Mt достаточно большие, так что они могут быть получены экспериментально в приведенных реакциях. В случае $1n$ испарительного канала, результаты, полученные с использованием теоретических предсказаний из работ [5] близки к величинам, полученным с использованием данных из работы [1]. Для xn испарительных каналов два рассмотренных нами метода расчета плотности уровней приводят к близким значениям W_{sur} для большинства сверхтяжелых ядер.

Сечения образования испарительных остатков и функции возбуждения были

рассчитаны для нескольких нейтронодефицитных изотопов. Результаты расчетов для различных испарительных каналов девозбуждения ^{230}U , ^{228}U , ^{224}U оказались близкими к экспериментальным значениям, при этом благодаря должному рассмотрению эмиссии заряженных частиц нам не пришлось искусственно изменять барьер деления, чтобы получить лучшее согласие между теорией и экспериментом, как это было сделано в других работах. Нами были также рассчитаны функции возбуждения различных испарительных каналов реакций $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{Hf}$ и $^{124}\text{Sn}+^{96}\text{Zr}$, ведущих к образованию составного ядра ^{220}Th . Экспериментально измеренные сечения образования одних и тех же испарительных остатков различаются для этих реакций примерно на порядок из-за разницы в зарядовых и массовых асимметриях во входном канале. Это соотношение воспроизводится и в наших расчетах, что позволяет сделать вывод об успешном описании процесса слияния в рамках модели ДЯС. Нами было также показано, что низкоэнергетические "хвосты" функций возбуждения в $6n + 7n$, $p3n$ и $\alpha 2n + \alpha 3n$ испарительных каналах этих реакций чувствительны к примесям в мишенях других изотопов или соседних ядер. Рассчитанные нами выходы различных испарительных остатков в реакции $^{110}\text{Pd}+^{110}\text{Pd}$ отличаются от экспериментальных данных в сторону подавления вероятности 2α канала. При этом выходы для реакции $^{110}\text{Pd}+^{100}\text{Mo}$, рассчитанные с тем же набором параметров, близки к экспериментальным величинам. Это различие можно объяснить тем, что в реакции $^{110}\text{Pd}+^{110}\text{Pd}$ одна из α -частиц вылетает в процессе эволюции ДЯС до стадии образования составного ядра. Нами были предложены несколько реакций для образования сильно нейтронодефицитных изотопов бария с довольно большими сечениями (см. табл. 2).

Таблица 2: Сечения образования нейтронодефицитных изотопов бария.

Реакции	E_{CN}^* , МэВ	σ_{exp} (мкб)	σ_{th} (мкб)
$^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}\rightarrow^{114}\text{Ba}+2n$	43	$0.2^{+0.13}_{-0.09}$	0.21
$^{58}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}\rightarrow^{116}\text{Ba}+2n$	40	3(1)	5.1
$^{58}\text{Ni}+^{63}\text{Cu}\rightarrow^{118}\text{Ba}+p2n$	46	19(6)	11
$^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}\rightarrow^{112}\text{Ba}+4n$	80	-	6.4×10^{-7}
$^{56}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}\rightarrow^{112}\text{Ba}+2n$	45	-	0.013
$^{58}\text{Ni}+^{64}\text{Zn}\rightarrow^{117}\text{Ba}+\alpha n$	40	-	900
$^{58}\text{Ni}+^{64}\text{Zn}\rightarrow^{116}\text{Ba}+\alpha 2n$	58	-	6.8
$^{58}\text{Ni}+^{64}\text{Zn}\rightarrow^{115}\text{Ba}+\alpha 3n$	74	-	0.016

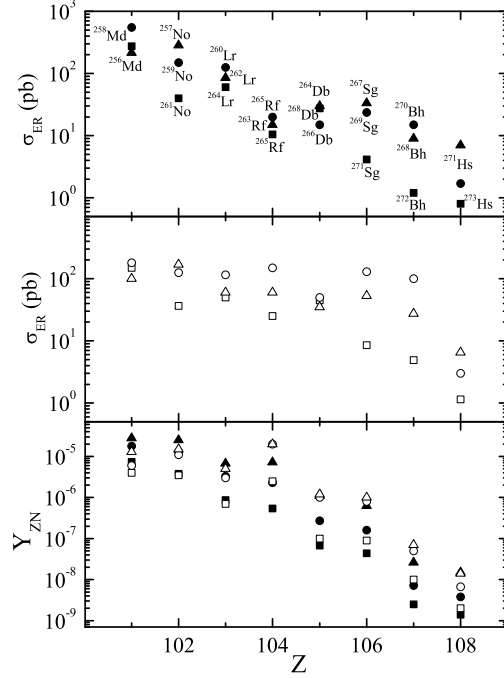


Рис. 2: Рассчитанные первичные выходы $Y_{Z,N}$ (нижняя часть) и сечения образования испарительных остатков σ_{ER} (средняя и верхняя части) обозначены треугольниками, кругами и квадратами для реакций $^{48}\text{Ca} + ^{244,246,248}\text{Cm}$ ($E_{c.m.} = 207, 205.5, 204$ МэВ) соответственно. Тяжелые фрагменты, образованные после испарения одного нейтрона, указаны в верхней части. Результаты, полученные на основе динамического и статистического подходов, представлены темными и светлыми символами соответственно.

В третьей главе рассматриваются реакции неполного слияния (квазиделения из асимметричного выходного канала), в которых заряд одного из фрагментов больше заряда мишени. Мы описываем получение ядер с $101 \leq Z \leq 108$ в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, ^{243}Am , $^{244,246,248}\text{Cm}$ на основе модели ДЯС. Большая часть испарительных остатков, которые образуются в этих реакциях, еще не была получена в экспериментах, поскольку они лежат в области масс между сверхтяжелыми изотопами, полученными в реакциях холодного слияния с мишенями РЬ и ВІ, и реакциях горячего слияния с актинидными мишенями. Выход $Y_{Z,N}$ первичного тяжелого ядра, образованного при распаде ДЯС, рассчитывается двумя способами: на основе динамического подхода с помощью мастер-уравнения и на основе статистического подхода с помощью формулы Крамерса. Расчет выживаемости возбужденного тяжелого ядра производился на основе метода, описанного в первой главе, с плотностью уровней, вычислен-

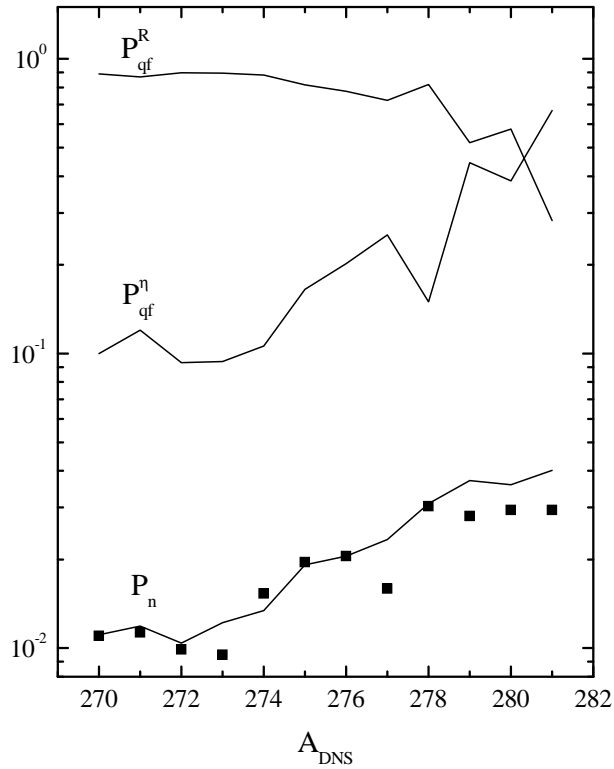


Рис. 3: Вероятности эмиссии нейтрона и квазиделения по R и η_Z для ДЯС, образованных в реакциях $^{62-73}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ при энергии возбуждения $E_{in}^* = 30$ МэВ. Значения P_n , вычисленные с учетом и без учета изотопического распределения вблизи потенциального минимума представлены квадратами и сплошной линией соответственно.

ной по модели ферми-газа. Как видно из рис. 2, сечения образования испарительных остатков лежат в пределах 1 пб – 1 нб, что делает возможным экспериментальное получение этих изотопов. Результаты, полученные на основе динамического и статистического подходов в описании выходов первичных тяжелых ядер, оказались близкими. Мы также установили, что увеличение числа нейтронов в мишени ведет к уменьшению сечений образования испарительных остатков неполного слияния, поскольку величина $Y_{Z,N}$ уменьшается из-за большего числа нуклонов, которых необходимо передать.

В четвертой главе мы предложили модель для описания эмиссии нейтрона из ДЯС. Этот процесс конкурирует с переходом ДЯС через барьер по R (относительному расстоянию между центрами масс ядер) и ее диффузией по η_Z ($\eta_Z = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2)$) в сторону более симметричной конфигурации с дальнейшим квазиделением. Определив соответствующие ширины на основе

статистического подхода, мы рассчитали вероятность P_n этого процесса. Исследовалась изотопическая зависимость эмиссии нейтрона для ДЯС, образованных во входном канале реакций $^{62-73}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$. При использовании изотопов никеля с еще большим числом нейтронов потенциальный минимум, в котором находится ДЯС, исчезает. Рассчитанная вероятность эмиссии нейтрона из ДЯС имеет порядок 10^{-2} и возрастает примерно в 3 раза при увеличении A_{DNS} от 270 до 281 (рис. 3). В случае разных температур ядер ДЯС эмиссия нейтронов из системы существенно усиливается, если большая часть энергии сконцентрирована в легком ядре. Зависимость величины P_n от энергии возбуждения ДЯС оказалась похожей на известную зависимость для возбужденных составных ядер. Нами также был предложен метод, с помощью которого можно на эксперименте различить нейтроны, испущенные из ДЯС (предразрывные), и нейтроны, испущенные из свободных фрагментов (послеразрывные). По нашим оценкам вклад эмиссии нейтрона из ДЯС в общую нейтронную множественность составляет несколько процентов.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. На основе статистического подхода предложена схема расчета сечения образования испарительного остатка в реакциях полного слияния в рамках модели ДЯС. Произведен анализ различных подходов к описанию плотности уровней (на основе модели ферми-газа и модели с коллективным усилением плотности уровней) и учету оболочечных эффектов.
2. Анализируя выживаемости сверхтяжелых ядер, полученных в реакциях холодного слияния на мишенях Pb и Bi, мы показали, что главной причиной падения сечений образования испарительных остатков с ростом Z является уменьшение вероятности полного слияния. Рассчитанные нами величины этих сечений оказались близкими к экспериментальным. Произведена оценка сечений образования изотопов $^{260,261}\text{Vh}$, ^{263}Hs и ^{265}Mt , еще не полученных экспериментально.
3. Рассчитаны сечения образования испарительных остатков и функции возбуждения для различных нейтронодефицитных изотопов. Результаты расчета находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными

данными. Показано, что низкоэнергетические "хвосты" функций возбуждения в некоторых испарительных каналах исследуемых реакций могут быть чувствительны к примесям в мишенях других изотопов или соседних ядер. Оценены сечения образования сильно нейтронодефицитных изотопов бария, которые являются кандидатами для поиска кластерной радиактивности.

4. Предложена схема расчета сечения образования испарительного остатка в реакциях неполного слияния в рамках модели ДЯС. Предложены реакции для получения изотопов сверхтяжелых ядер с $101 \leq Z \leq 108$, еще не найденных экспериментально, и рассчитаны сечения образования этих изотопов.
5. Предложена модель для описания вылета нейтрона из ДЯС. Произведена оценка вероятности этого процесса и установлена ее изотопическая зависимость для ДЯС, образованных во входном канале реакций $^{62-73}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$. Рассмотрены случаи одинаковых и разных температур ядер ДЯС. Предложен экспериментальный метод установления формы предразрывной конфигурации.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. A. S. Zubov, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, S. P. Ivanova, W. Scheid, *Survival probability of superheavy nuclei*, Phys. Rev. **C65** (2002) 024308
2. А. С. Зубов, Г. Г. Адамян, Н. В. Антоненко, С. П. Иванова, В. Шайд, *Выживаемость возбужденных сверхтяжелых ядер*, ЯФ **66** (2003) 242
3. A. S. Zubov, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, S. P. Ivanova, W. Scheid, *Survival probability of excited heavy nuclei*, Acta Phys. Pol. **B34** (2003) 2083
4. A. S. Zubov, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, S. P. Ivanova, W. Scheid, *Competition between evaporation channels in neutron-deficient nuclei*, Phys. Rev. **C68** (2003) 014616
5. A. S. Zubov, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, S. P. Ivanova, W. Scheid, *Survival probabilities of superheavy nuclei based on recent predictions of nuclear properties*, Eur. Phys. J. **A23** (2005) 249

6. G. G. Adamian, N. V. Antonenko, A. S. Zubov, *Production of unknown trans-actinides in asymmetry-exit-channel quasifission reactions*, Phys. Rev. **C71** (2005) 034603
7. A. S. Zubov, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, S. P. Ivanova, W. Scheid, *Isotopic dependence of neutron emission from dinuclear system*, Acta Phys. Pol. **B38** (2007) 1595
8. A. S. Zubov, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, S. P. Ivanova, W. Scheid, *Isotopic dependence of neutron emission from dinuclear system*, Eur. Phys. J. **A33** (2007) 223

Список литературы

- [1] P. Möller, R. Nix, At. Data Nucl. Data Tables **39** (1988) 213
- [2] P. Möller *et al.*, At. Data Nucl. Data Tables **59** (1995) 185
- [3] R. Smolanczuk, J. Skalski, A. Sobiczewski, Phys. Rev. **C52** (1995) 1871
- [4] R. Smolanczuk, Phys. Rev. **C59** (1999) 2634
- [5] O. Parkhomenko, I. Muntian, Z. Patyk, A. Sobiczewski, Acta Phys. Pol. **B34** (2003) 2153; I. Muntian, S. Hofmann, Z. Patyk, A. Sobiczewski, Acta Phys. Pol. **B34** (2003) 2073; I. Muntian, Z. Patyk, A. Sobiczewski, Acta Phys. Pol. **B34** (2003) 2141; I. Muntian, Z. Patyk, A. Sobiczewski, Acta Phys. Pol. **B32** (2001) 691