

7-2008-130

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

СЗ43а

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 " 12 " мая 2008 г. в " 15<sup>00</sup> " 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 " 3 " сентября 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 актиноидов, 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 радиоактивности.

Существует целый ряд экспериментальных исследований эмиссии нейтронов в реакциях слияния-деления с тяжелыми ионами при достаточно высоких энергиях возбуждения промежуточных составных ядер ( $\geq 70$  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 рассмотрениях. 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 Рb и Вi. Сечения образования соответствующих испарительных остатков, рассчитанные в работе, оказались близкими к экспериментальным. Кроме того, наши расчеты показали, что изотопы  $^{260,261}\text{Bh}$ ,  $^{263}\text{Hs}$  и  $^{265}\text{Mt}$ , 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 Рb и Вi 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 радиоактивности.

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

ложешные нами реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244,246,248}\text{Cm}$  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 Pb и Bi 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  $\sigma_{ER}$  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  $\eta$  в состояние  $\eta = \pm 1$ , и квазиделения, то есть ее перехода через барьер  $B_R = B_{df}$  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  $B_{df}$  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-

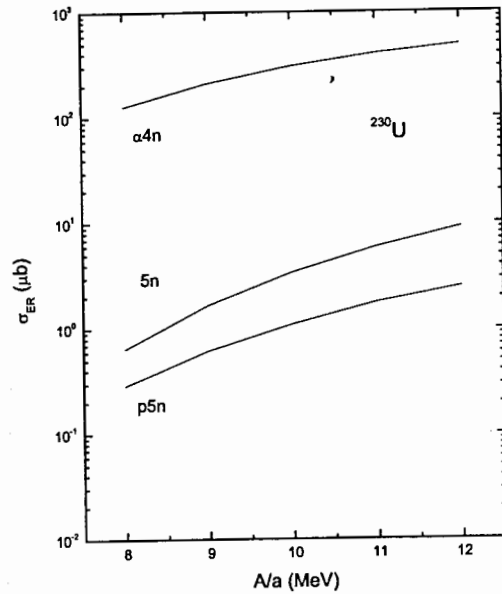


Рис. 1: Зависимость сечений образования испарительных остатков для  $5n$ ,  $p5n$ , и  $\alpha 4n$  каналов от параметра плотности уровней  $a$  в реакции  $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$ .

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  $\sigma_{ER}$  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  $\bar{a}(A)$ , 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  $\Gamma_n/\Gamma_f$  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  $\Gamma_n/\Gamma_f$ , 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 Pb и Bi. 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  $\sigma_{ER}^{exp}$  и теоретические  $\sigma_{ER}^{th}$  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)	$\sigma_{ER}^{th}$ (ферми)	$\sigma_{ER}^{th}$ (колл)	$\sigma_{ER}^{exp}$
$^{48}\text{Ca}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{255}103+2n$	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	$10^{+23}_{-8}$ 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	$4.54^{+5.7}_{-2.9}$ 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  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ ,  $^{58}\text{Fe}+^{208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ . Результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. В табл. 1, например, сравниваются рассчитанные нами и полученные экспериментально сечения  $\sigma_{ER}$  в  $2n$  и  $3n$  испарительных каналах. Предсказанные нами сечения образования  $^{260,261}\text{Vh}$ ,  $^{263}\text{Ns}$  и  $^{267}\text{Mt}$  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  $2n$  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  $^{230}\text{U}$ ,  $^{228}\text{U}$ ,  $^{224}\text{U}$  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  $^{220}\text{Th}$ . 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  $2\alpha$  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  $\alpha$ -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	$\sigma_{exp}$ (мкб)	$\sigma_{th}$ (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	-	$6.4\times 10^{-7}$
$^{56}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}\rightarrow^{112}\text{Ba}+2n$	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

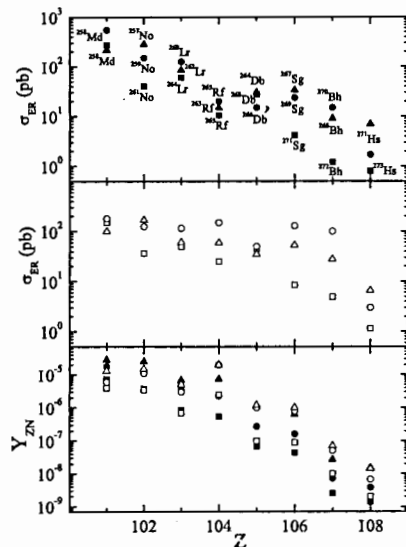


Рис. 2: Рассчитанные первичные выходы  $Y_{Z,N}$  (нижняя часть) и сечения образования испарительных остатков  $\sigma_{ER}$  (средняя и верхняя части) обозначены треугольниками, кругами и квадратами для реакций  $^{48}\text{Ca} + ^{244,246,248}\text{Cm}$  ( $E_{c.m.} = 207, 205.5, 204$  МэВ) соответственно. 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 капала), в которых заряд одного из фрагментов больше заряда мишени. Мы описываем получение ядер с  $101 \leq Z \leq 108$  в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244,246,248}\text{Cm}$  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 Pb и Bi, 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-

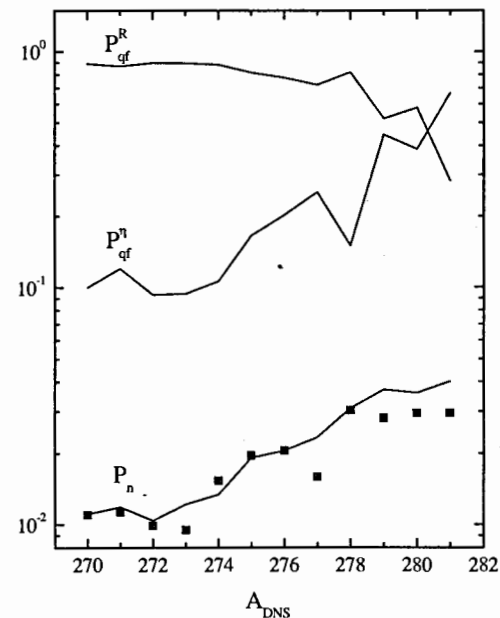


Рис. 3: Вероятности эмиссии нейтрона и квазиделения по  $R$  и  $\eta_Z$  для ДЯС, образованных в реакциях  $^{62-73}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$  при энергии возбуждения  $E_{in}^* = 30$  МэВ. Значения  $P_n$ , вычисленные с учетом и без учета изотопического распределения вблизи потенциального минимума 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 се диффузией по  $\eta_Z$  ( $\eta_Z = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2)$ ) 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  $^{260,261}\text{Bh}$ ,  $^{263}\text{Hs}$  и  $^{265}\text{Mt}$ , 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 transactinides 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

Получено 26 сентября 2008 г.