

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Безбах Анна Николаевна

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР  
НА ИХ ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПАД

Специальность: 01.04.16  
Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна  
2014

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

Научные руководители: доктор физико-математических наук, в.н.с. Антоненко Николай Викторович, доктор физико-математических наук, в.н.с. Адамян Гурген Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, в.н.с. Чувильский Юрий Михайлович (Москва, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ)  
доктор физико-математических наук, профессор Косенко Григорий Иванович (Омск, Омский автобронетанковый инженерный институт филиала Военной академии материально-технического обеспечения)

Ведущая организация: НИЦ "Курчатовский институт"

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2015 года в \_\_ часов \_\_ минут на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединённого института ядерных исследований по адресу: ул. Жолио-Кюри 6, 141980, г. Дубна Московской области РФ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Объединённого института ядерных исследований.

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации, просьба направлять по указанному адресу в двух экземплярах не позднее, чем за 15 дней до защиты.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Арбузов Андрей Борисович

# 1 Общая характеристика работы

## 1.1 Актуальность темы

Синтез и определение свойств сверхтяжелых элементов "острова стабильности" около  $Z = 114$  является одной из важнейших задач современной ядерной физики. Для выбора оптимальных условий синтеза необходимо найти наилучший баланс между увеличением вероятности слияния ядер с ростом энергии столкновения и уменьшением при этом вероятности выживания образовавшегося возбужденного составного ядра. Для описания процесса полного слияния двух сталкивающихся массивных ядер и процесса выживания образовавшегося составного сверхтяжелого ядра необходимо дальнейшее развитие теоретических моделей. Также требуется изучение возможных мод распада испарительных остатков и роли изомерных состояний в этих распадах. Структура сверхтяжелых ядер оказывает сильное влияние на сечения их образования и на моды их распада.

В экспериментах по синтезу новых сверхтяжелых изотопов с  $Z = 112 - 118$ , которые проводились в ЛЯР ОИЯИ (Дубна), GSI (Дармштадт) и LBNL (Беркли) с использованием пучков  $^{48}\text{Ca}$ , получены указания на усиление оболочечных эффектов при  $Z = 114$ , как и предсказывалось в расчетах по микроскопическо-макроскопическим моделям ядра. Однако, самосогласованные микроскопические модели ядра предсказывают более сильные оболочечные эффекты при  $Z = 120 - 126$ . Результаты этих моделей позволяют надеяться на успех синтеза новых сверхтяжелых элементов с  $Z \geq 120$  в реакциях слияния с актинидами мишенями и налетающими ядрами тяжелее, чем  $^{48}\text{Ca}$ . В настоящее время предпринимаются попытки синтеза изотопов с  $Z \geq 119$  в реакциях "горячего" слияния с пучками ионов  $^{50}\text{Ti}$  и  $^{54}\text{Cr}$ . Сделаны попытки синтеза элемента с  $Z = 120$  в реакциях  $^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu}$  и  $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ .

Один из основных методов идентификации химических элементов новых нуклидов – это идентификация изотопов неизвестных элементов в коррелированных  $\alpha$ -распадных цепочках. Если  $\alpha$ -распад испарительного остатка преобладает над спонтанным делением, то изучаются последовательные  $\alpha$ -распады ядер, оканчивающиеся спонтанным делением изотопов известных или неизвестных ядер. Для анализа характеристик  $\alpha$ -распада необходимы знание структуры материнского и дочернего ядер и оценки конкуренции  $\alpha$ -распада со спонтанным делением. Исследуя структуру тяжелых ядер, мы получаем информацию о характеристиках среднего поля ядер, свойства которого являются определяющими для ядерной стабильности.

Для изучения структуры ядра вблизи его основного состояния можно использовать различные микроскопическо-макроскопические модели, от-

личающиеся параметризацией формы ядра. Выбор удачной параметризации позволяет уменьшить количество коллективных переменных и упростить микроскопическое рассмотрение. В диссертационной работе приводятся расчеты на основе модифицированной двухцентральной оболочечной модели.

## 1.2 Целью работы

было изучение влияния структуры сверхтяжелых ядер на характеристики их образования и распада, и проведение расчетов на основе модифицированной двухцентральной оболочечной модели с использованием метода Струтинского и модели двойной ядерной системы.

## 1.3 Научная новизна работы

С помощью модифицированной двухцентральной оболочечной модели проведены исследования свойств уже полученных и сделаны предсказания свойств еще неизвестных сверхтяжелых элементов.

- В наших микроскопическо-макроскопических расчетах получены достаточно сильные оболочечные эффекты при  $Z = 120 - 126$  и  $N = 184$ .
- Показано, что можно ожидать образование испарительных остатков с  $Z = 120$  в реакциях  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$  и  $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$  с сечениями 23 и 10 фб соответственно. Для ядра с  $Z = 120$  и  $N = 175 - 179$  ожидаются значения  $Q_\alpha$  12.1 - 11.2 МэВ и времена жизни 1.7 мс - 0.16 с.
- Вычислены микроскопически внутренние плотности уровней в регионе сверхтяжелых ядер. Метод вычисления опробован на более легких ядрах, для которых существуют экспериментальные данные. Параметры плотности уровней, которые часто используются в модели ферми-газа, были вычислены для ядер альфа-распадных цепочек, содержащих элементы  $^{296}120$ ,  $^{298}120$  и  $^{300}120$ . Было продемонстрировано сильное влияние оболочечных эффектов на параметр плотности уровней при  $Z = 120$  и  $N = 184$ .
- Изучены зависимости параметра плотности уровней от оболочечной поправки и энергии возбуждения. Определен коэффициент затухания оболочечных эффектов с ростом энергии возбуждения -  $E'_D = 27$  МэВ. Для рассмотренных сверхтяжелых ядер параметр плотности уровней:  $A/(12 - 14)$  МэВ для  $Z < 116$  и  $A/(14 - 17)$  МэВ - для  $Z > 116$  при энергии возбуждения, соответствующей испарению (3 - 5) нейтронов.

## 1.4 Практическая ценность работы

Полученные результаты могут быть полезны для подготовки экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов, в частности, 120 элемента.

## 1.5 Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, 3 приложений и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 92 страницы машинописного текста. Библиография содержит 91 наименование. Рисунки и таблицы имеют сквозную нумерацию по тексту диссертации.

## 1.6 Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, были представлены на российских и международных совещаниях:

1. Конференция в Закопане по ядерной физике, Закопане, Польша, 31.08-7.09.2014;
2. Международная летняя школа им. Гельмгольца: Теория ядра и астрофизические приложения, Дубна, Россия, 21.07-1.08.2014;
3. SKLTP-BLTP JINR объединенное совещание по физике сильно взаимодействующих систем, Дубна, Россия, 14-19.07.2014;
4. Школа-конференция для молодых ученых и специалистов, Алушта-2014, Россия, 2-7.06.2014;
5. 11-й международный весенний семинар по ядерной физике, Оболочечная модель и ядерная структура: достижения последних двух десятилетий, о. Икья, Италия, 12-16.05.2014;
6. XVIII Научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов (ОМУС-2014), посвященная 105-летию Н.Н. Боголюбова, Дубна, Россия, 24-28.02.2014;
7. ЯДРО-2013, Москва, международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 8-12.10.2013;
8. FAIRNESS-2013, Берлин, Германия, международная конференция для молодых ученых, интересующихся физикой FAIR, 15-21.09.2013;

9. RANT-2013, Дубна, Россия, международная конференция "Последние достижения в теории ядра", 22-27.07.2013;
10. NSRT-2012, Дубна, Россия, международная конференция "Структура ядра и смежные проблемы", 2-6.08.2012;
11. ЯДРО-2012, Воронеж, Россия, международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 26-30.06.2012;
12. Школа-конференция для молодых ученых и специалистов, Алушта-2012, Украина, 1-8.06.2012;
13. XVI Научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов (ОМУС-2012), Дубна, Россия, 6-11.02.2012;
14. 35-я сессия ПКК по ядерной физике, Дубна, Россия, 26-27.01.2012;
15. 18-я Еврошкола по ядерной физике на пучках экзотических ядер, Ювяскюля, Финляндия, 20-26.08.2011.

## 1.7 Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 работ:

- [1] A.N. Kuzmina, G.G. Adamian, N.V. Antonenko *Impact of nuclear structure on production and identification of new superheavy nuclei // Eur. Phys. J. A.* -2011. -v.47 -p.145 (7 pages).
- [2] A.N. Kuzmina, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W.Scheid *Influence of proton shell closure on production and identification of new superheavy nuclei // Phys. Rev. C.* -2012. -v.85. -p.014319 (11 pages).
- [3] A.N. Kuzmina, G.G. Adamian, N.V. Antonenko *Structures of nuclei in  $\alpha$ -decay chains of  $^{291,293}117$  // Phys. Rev. C.* -2012. -v.85. -p.017302 (4 pages).
- [4] A.N. Kuzmina, G.G. Adamian, N.V. Antonenko *Role of quasiparticle structure in  $\alpha$ -decays of the heaviest nuclei // Phys. Rev. C.* -2012. -v.85. -p.027308 (5 pages).
- [5] А.Н. Кузьмина, Г.Г. Адамян, Н.В. Антоненко *Роль квазичастичной структуры в альфа-распадах сверхтяжелых ядер // Известия РАН, Серия физическая.* -2013. -Т.77 -№4. -с.453-457.
- [6] A.N. Vezbakh, T.M. Shneidman, G.G. Adamian, and N.V. Antonenko *Level densities of heaviest nuclei // Eur. Phys. J. A.* -2014. -v.50. -p.97 (8 pages).

## 1.8 Личный вклад соискателя

Основные положения и выводы диссертации являются результатом исследований автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах научно-исследовательской работы по теме диссертации: в разработке алгоритмов и написании компьютерных программ, проведении расчетов, обработке, анализе и обсуждении полученных результатов, подготовке статей к публикации.

## 2 Краткое содержание работы

Во **введении** обсуждается актуальность работы и мотивация проводимых исследований, дается краткий обзор по теме, а также делается краткое описание содержания диссертации.

В **первой главе** подробно описывается двухцентровая оболочечная модель ядра, ее модификация и необходимость этой модификации. Рассматриваются изотопы тех сверхтяжелых ядер, которые могут быть получены в реакциях полного слияния с имеющимися налетающими ядрами и мишенями. На основе результатов, полученных при помощи модифицированной двухцентровой оболочечной модели, анализируются свойства сверхтяжелых элементов с  $Z > 105$ . Вычисленные дефекты масс  $M_{th}$ , энергии отделения нейтрона  $S_n$ , оболочечные поправки  $\delta E_{sh}$  и энергии  $Q_\alpha$   $\alpha$ -распада представлены в Таблице 1 (см. Приложение 1). На Рис. 1 представлены вычисленные значения  $Q_\alpha$ . Результаты наших расчетов находятся в хорошем согласии с существующими экспериментальными данными. Отклонение расчета от эксперимента не превышает 0.3 МэВ.

Результаты вычислений величины  $B_f - B_n$  как функции  $N$  представлены на Рис. 2. Хотя наш микроскопическо-макроскопический подход предсказывает подоболочку при  $Z = 114$ , оболочечные эффекты при  $Z = 120 - 126$  сильнее. На Рис. 2 величина барьера деления возрастает при приближении  $N$  к 184, в то время как, для ядер с  $Z = 120 - 126$  значения  $Q_\alpha$  минимальны при  $Z = 120$ , где барьеры деления имеют достаточно большие значения (Рис. 2). Ожидается, что ядра с  $Z = 120$  и  $N = 180 - 184$  будут более стабильными, чем ядра с  $Z = 114$  и  $N = 176 - 178$ .

Во **второй главе** рассматриваются альфа-распадные цепочки, содержащие сверхтяжелые элементы Fl, Lv, 117 и 120. Рассчитанные одно- и двухквaziчастичные спектры ядер в этих цепочках, анализируются на наличие высокоспиновых изомеров. Показано присутствие больших щелей в спектрах ядер  $^{296,298,300}120$ . Предсказаны ядра, на которых будут происходить обрывы  $\alpha$ -распадных цепочек за счет спонтанного деления.

Используя полученные нами предсказания ядерных свойств, мы рассчи-

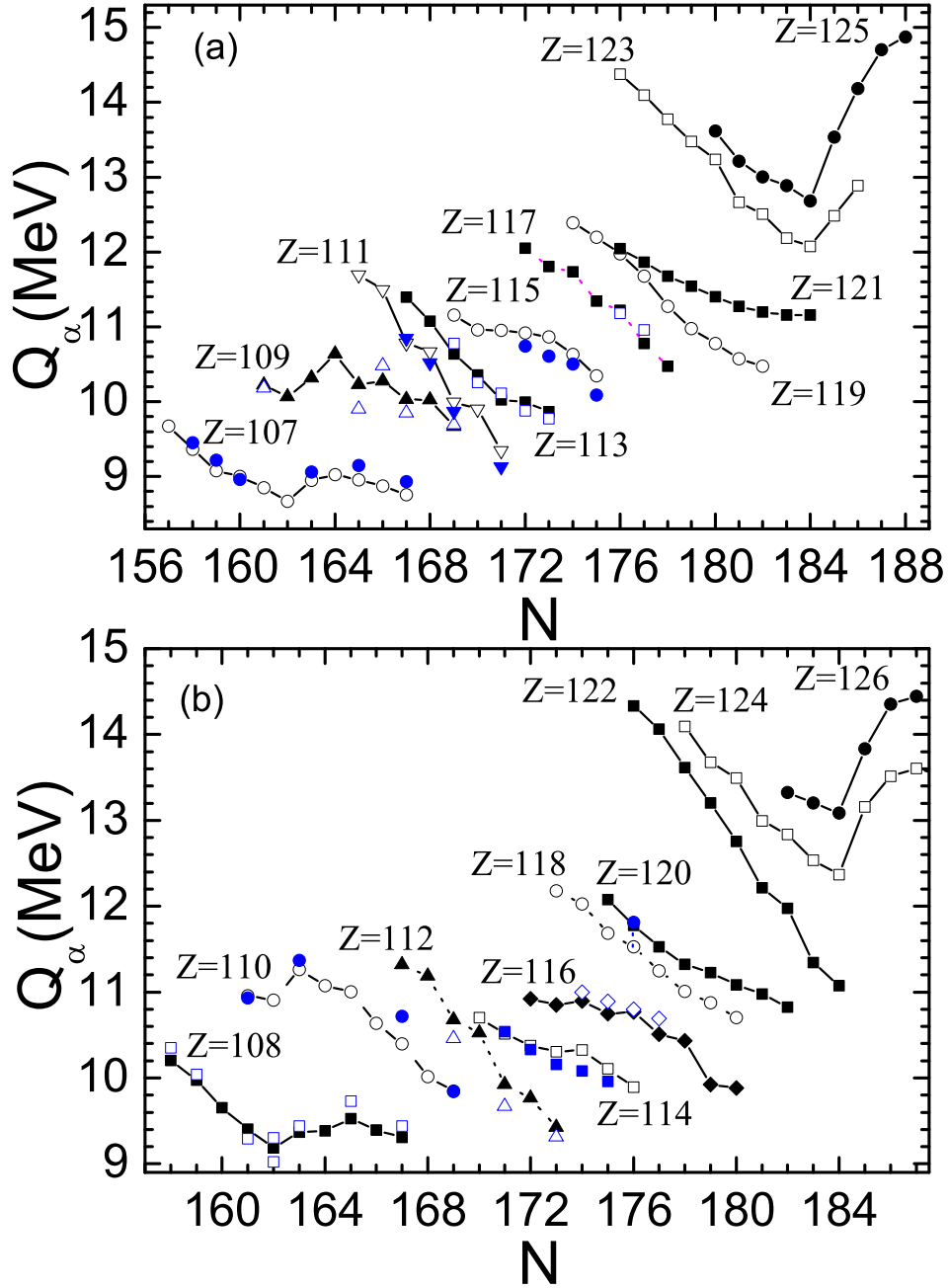


Рис. 1: Вычисленные энергии  $\alpha$ -распадов (символы, соединенные линиями) сравниваются с имеющимися экспериментальными данными (символы) для четных- $Z$  (b) и нечетных- $Z$  (a) ядер с  $107 \leq Z \leq 126$ .

тали сечения образования испарительных остатков в реакциях  $^{50}\text{Ti} + {}^A\text{Cf}$  и  $^{54}\text{Cr} + {}^A\text{Cm}$  (Рис. 3 и 4). При нулевой энергии возбуждения предсказанные значения барьеров деления находятся в интервале (8.1–10.1) МэВ. Ожидается, что в реакции  $^{50}\text{Ti} + {}^{249}\text{Cf}$  ( $Q = -194.75$  МэВ) ядро  $^{295}120$  будет получено в  $3n$  испарительном канале с сечением  $\sigma_{ER} = 23$  фб. В реакции  $^{54}\text{Cr} + {}^{248}\text{Cm}$  ( $Q = -205.59$  МэВ) составное ядро будет иметь на 3 нейтрона больше, чем в реакции  $^{50}\text{Ti} + {}^{249}\text{Cf}$ . Поэтому убывание вероятности



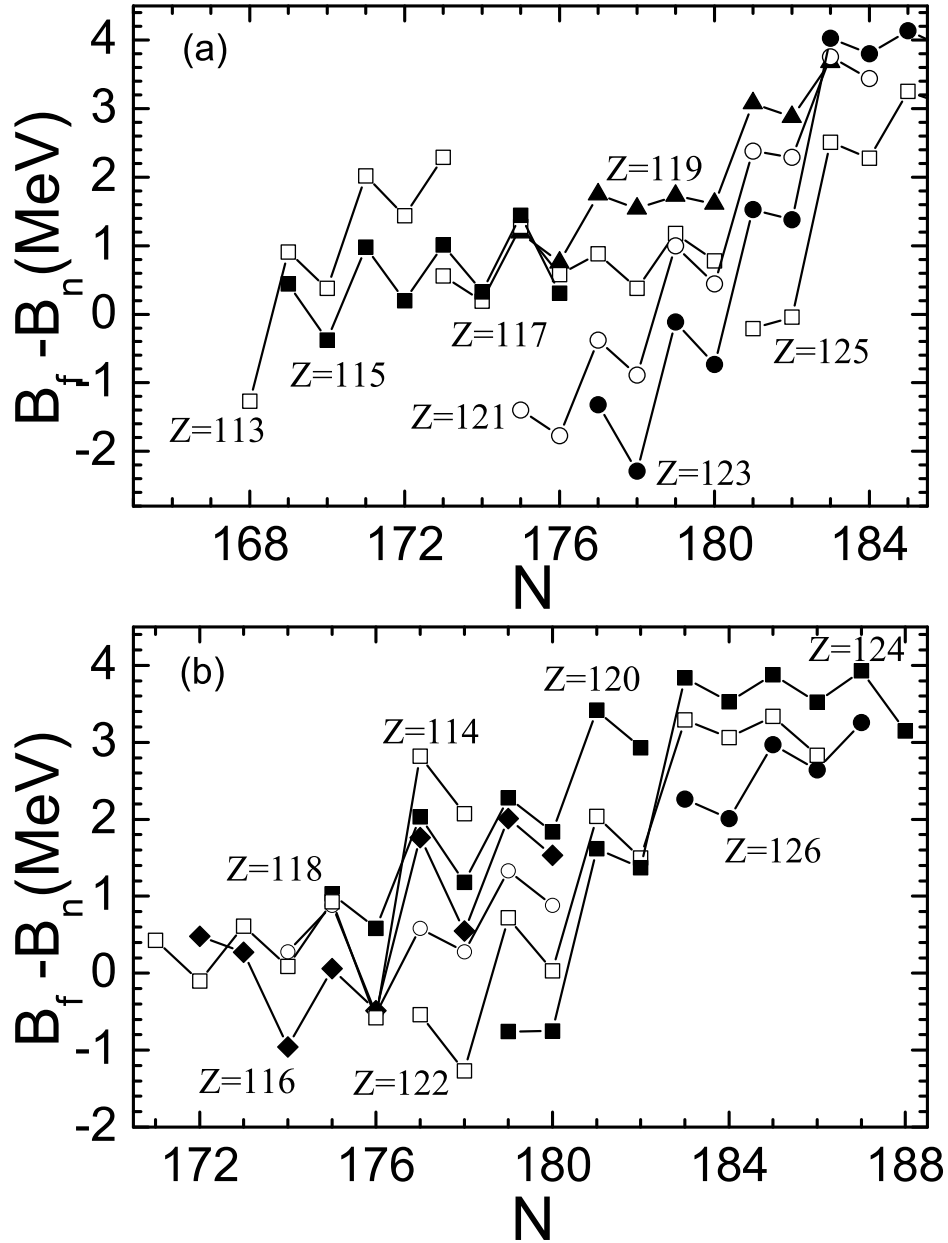


Рис. 2: Изотопическая зависимость величины  $B_f - B_n$  взятых из Таблицы 1. Барьер деления  $B_f$  считается равным абсолютному значению оболочечной поправки в основном состоянии ядра. Результаты для изотопов, связанных с указанными четными- $Z$  (b) и нечетными- $Z$  (a), представлены символами, соединенными линиями.

слияния  $P_{CN}$  частично компенсируется возрастанием выживаемости  $W_{sur}$  и ожидается, что ядро  $^{298}120$  будет получено с сечением 10 фб ( $4n$  испарительный канал). Изотопическая зависимость  $\sigma_{ER}$  довольно слабая в рассматриваемом интервале массовых чисел  $A$ . Существует определенный интервал для  $A$ , где произведение  $P_{CN}W_{sur}$  изменяется слабо. Значения  $\sigma_{ER}$  почти одинаковые, когда в роли мишени рассматриваются ядра  $^{246}\text{Cm}$

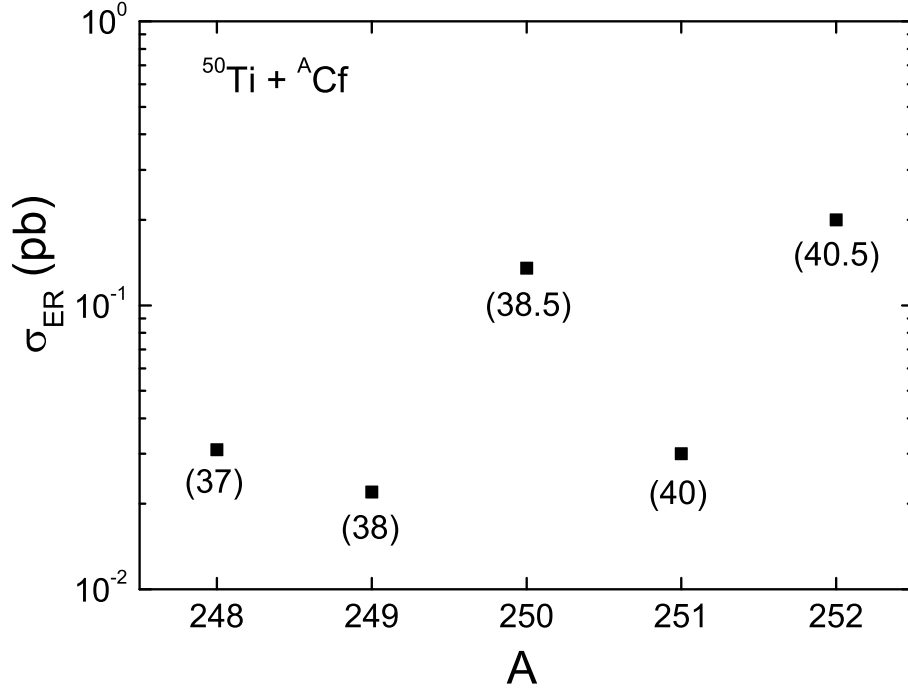


Рис. 3: Рассчитанные максимальные сечения образования испарительных остатков в реакциях  $^{50}\text{Ti} + {}^A\text{Cf}$  в зависимости от  $A$ . В скобках даны энергии возбуждения составного ядра. В вычислениях были использованы дефекты массы основного состояния  $M_{\text{th}} = 211.8, 213.05, 213.76, 215.15$  и  $216.05$  МэВ для ядер  $^{298}120, ^{299}120, ^{300}120, ^{301}120$  и  $^{302}120$  соответственно.

( $Q = -208.07$  МэВ) и  $^{248}\text{Cm}$ .

В **третьей главе** изучается плотность состояний при помощи статистического подхода. Эффекты спаривания рассчитываются в БКШ приближении. Параметры плотности уровней извлекаются из сравнения полученного численного решения с результатами расчетов по модели ферми-газа. Определяются зависимости параметра плотности уровней от массового числа, оболочечных эффектов и энергии возбуждения. А также устанавливается наличие зависимости параметра плотности уровней от числа нейтронов и протонов. Минимумы в такой зависимости соответствуют замкнутым оболочкам или подоболочкам.

Поведение параметра плотности уровней  $a$  при низкой энергии возбуждения сильно зависит от оболочечной структуры соответствующего ядра. Это показано на Рис. 5. Нижняя и средняя части этих графиков представляют соответственно зависимости оболочечной поправки  $\delta E_{sh}$  и параметра плотности уровней  $a$  от атомного номера  $A$  для указанных сверхтяжелых ядер. Можно видеть тесную взаимосвязь этих зависимостей. Наибольшие отрицательные оболочечные поправки приводят к снижению величины  $a$  по отношению к  $a$  соседних ядер. При  $Z = 120$  параметр плотности уровней

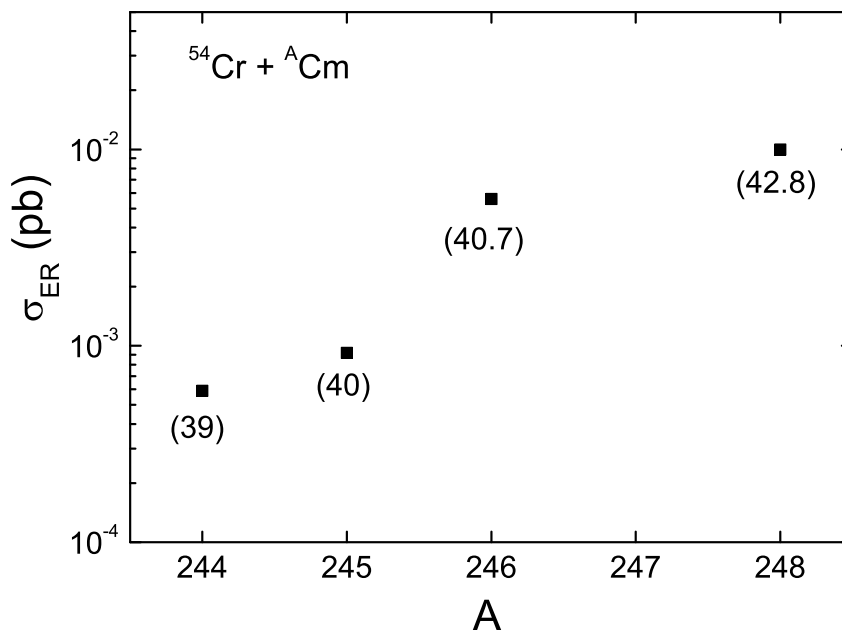


Рис. 4: То же, что на Рис. 3, но для реакций  $^{54}\text{Cr} + {}^A\text{Cm}$ .

имеет минимальное значение во всех трех цепочках. Это отражает достаточно сильный эффект протонной оболочки при  $Z = 120$ . Подобное поведение  $a$  наблюдается около  $Z = 82$ . Таким образом, это подтверждает предположение, что замкнутая протонная оболочка ожидается при  $Z = 120$ . В наших расчетах подоболочка при  $Z = 114$  существует, но оболочечные эффекты для ядер с  $Z = 114$  проявляются слабее, чем для ядер с  $Z = 120$ . Для ядер с  $Z = 124 - 128$  минимумы обусловлены нейтронной оболочкой при  $N = 184$ . Протонные и нейтронные оболочечные эффекты еще более очевидны для протонного ( $a_Z$ ) и нейтронного ( $a_N$ ) параметров плотности уровней (Рис. 6).

В **Заключении** работы приведены основные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты.

## Основные результаты, выдвигаемые для защиты:

1. В рамках модифицированной двухцентровой оболочечной модели проанализированы свойства изотопов сверхтяжелых элементов с  $104 < Z < 130$ , которые могут быть получены в реакциях полного слияния с существующими стабильными мишенями и пучками. Для ряда сверхтяжелых элементов вычислены значения энергии связи ядра, избытка массы ядра, энергии отделения нейтрона и оболочечной поправки. Ожидается, что в реакциях  $^{50}\text{Ti} + {}^{249}\text{Cf}$  и  $^{54}\text{Cr} + {}^{248}\text{Cm}$

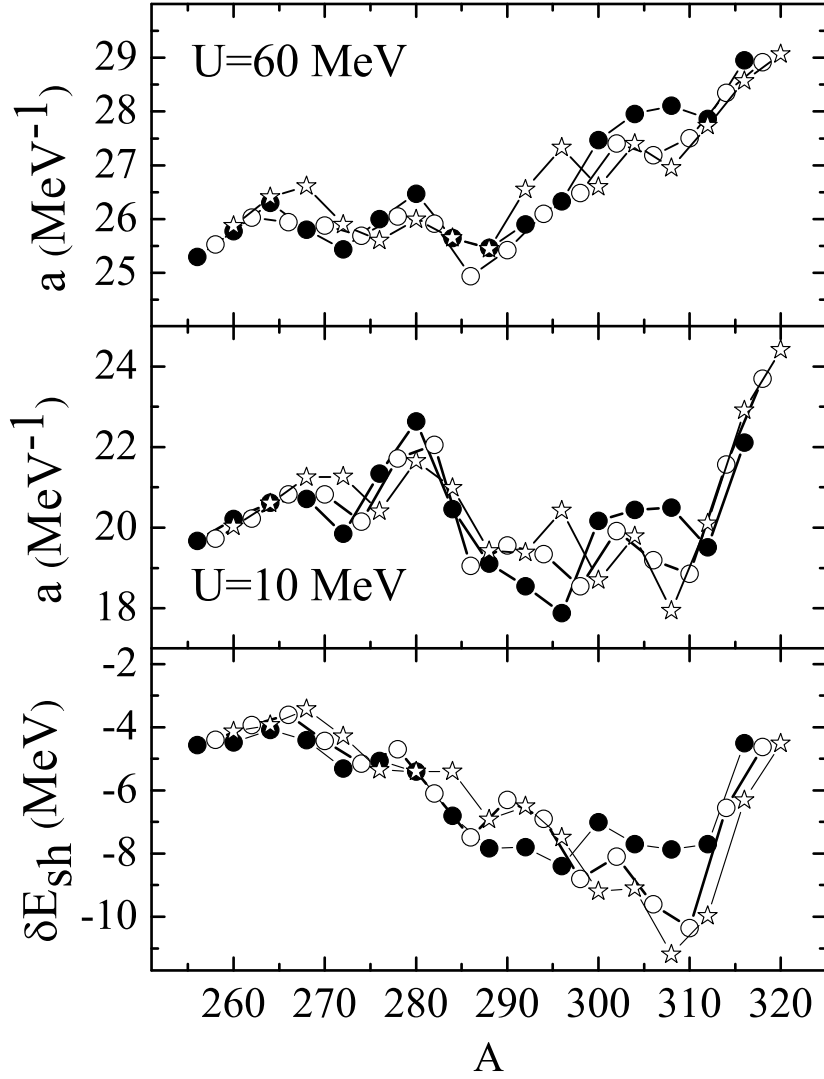


Рис. 5: Вычисленные оболочечные поправки  $\delta E_{sh}$  (нижняя часть) и параметры плотности уровней  $a$  при  $U = 10$  (средняя часть) и при 60 МэВ (верхняя часть) в зависимости от массового числа  $A$ . Ядра альфа-распадных цепочек, содержащих элементы  $^{296}120$ ,  $^{298}120$ ,  $^{300}120$ , отмечены темными кругами, светлыми кругами и звездочками соответственно.

сечения образования испарительных остатков будут 23 и 10 фб соответственно.

- Исследованы одно- и двух-квазичастичные состояния в альфа-распадных цепочках нечетно-четных, четно-нечетных и четно-четных ядер. Оценены периоды полураспадов исследуемых ядер и энергии вылета  $\alpha$ -частиц. Проанализированы возможные обрывания  $\alpha$ -распадных цепочек спонтанным делением. Предсказаны высокоспиновые  $K$ -изомеры в ядрах рассмотренных  $\alpha$ -распадных цепочек.

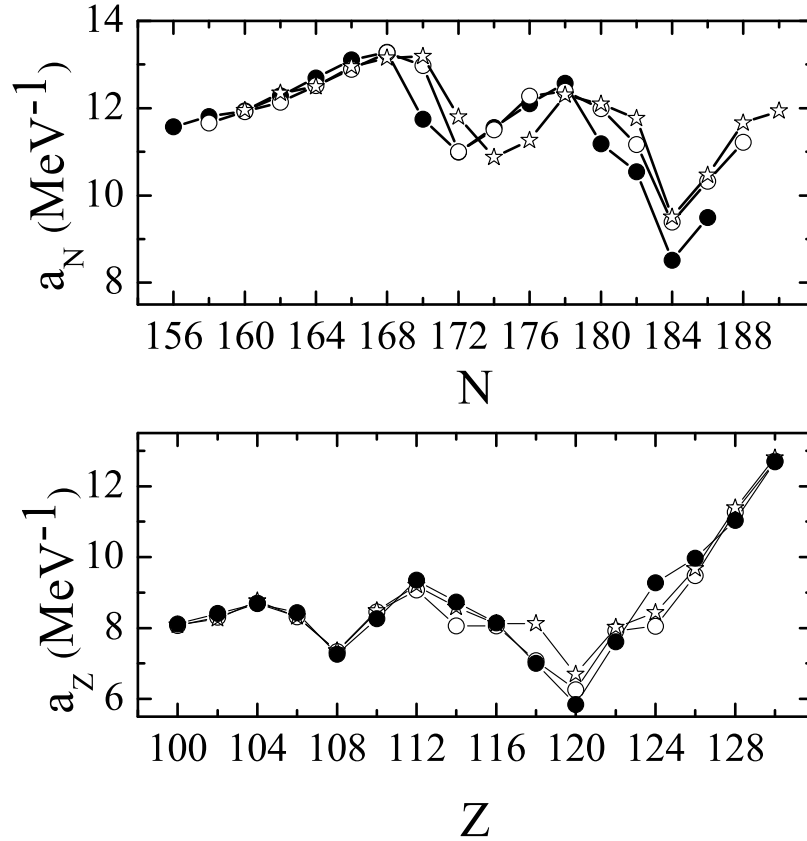


Рис. 6: Зависимости вычисленных параметров плотности уровней  $a_N$  и  $a_Z$  ( $U = 10$  МэВ) от числа нейтронов  $N$  (верхняя часть) и протонов  $Z$  (нижняя часть) соответственно. Ядра альфа-распадных цепочек, содержащих элементы  $^{296}120$ ,  $^{298}120$ ,  $^{300}120$ , отмечены темными кругами, светлыми кругами и звездочками соответственно.

3. Проведены микроскопические расчеты внутренней плотности уровней ядер на основе одночастичного спектра модифицированной двух-центральной оболочечной модели. Метод расчета опробован на ядрах, для которых существуют экспериментальные данные. Параметры плотности уровней вычислены для ядер  $\alpha$ -распадных цепочек, содержащих элементы  $^{296}120$ ,  $^{298}120$  и  $^{300}120$ . Изучены зависимости параметра плотности уровней от оболочечной поправки сверхтяжелых ядер, эффектов спаривания и энергии возбуждения. Коэффициент затухания оболочечных эффектов с увеличением энергии возбуждения найден равным 27 МэВ. Получены следующие оценки для сверхтяжелых ядер: параметр плотности уровней равен приблизительно  $A/(12 - 14)$  МэВ для  $Z < 116$  и  $A/(14 - 17)$  МэВ - для  $Z > 116$  при энергиях возбуждения, соответствующих (3 - 5) нейтронным испарительным каналам.

4. Полученные в ходе работы свойства сверхтяжелых ядер ясно указывают на сильные оболочечные эффекты при  $N = 184$  и  $Z = 120-126$ , что находится в согласии с предсказаниями самосогласованных микроскопических моделей.