

Отзыв официального оппонента
на диссертацию **А.В. Карпова**
**«Теоретический анализ основных механизмов образования и распада
тяжёлых и сверхтяжёлых ядер»,**
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.04.16.

Рецензируемая диссертация посвящена решению актуальной фундаментальной проблемы – разработке теории ядерных реакций при столкновении сложных ядер и теоретических методов расчета сечений образования тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. В ней представлены теоретико-расчётные методы описания ядерных реакций между сложными ядрами при энергиях столкновения вблизи кулоновского барьера. Разработанные автором теоретические модели и программы расчётов использованы для интерпретации экспериментальных результатов и планирования экспериментов для синтеза сверхтяжёлых ядер с целью приближения к острову стабильности и линии нейтронной стабильности атомных ядер.

Диссертация изложена на 226 стр., состоит из Введения, 5 глав, Заключение, Приложения и списка литературы, включающего 386 наименований.

В диссертации детально разработана квазиклассическая динамическая модель столкновения сложных ядер, включающая каналы квазиделения и деления. Многомерная поверхность потенциальной энергии динамической системы в процессе эволюции от момента контакта ядер во входном канале до момента деления на осколки рассчитывается в расширенной макромикроскопической модели, основанной на методе оболочечной поправки В.М. Струтинского. Во входном канале используется ядро-ядерный фолдинг-потенциал, рассчитанный с эффективным нуклон-нуклонным потенциалом нулевого радиуса Мигдала. Оболочечные поправки деформированной ядерной системы рассчитываются, используя

двухцентровую оболочечную модель. В разработанной модели рассчитаны поверхности потенциальной энергии для различных пар сталкивающихся ядер, на которых возможно выделение траекторий, соответствующих глубоконеупругому рассеянию, квазиделению и делению.

Важным результатом диссертации является разработка трёхцентровой оболочечной модели и исследование тройного деления со сравнимыми массами для коллинеарной конфигурации трёх фрагментов. Было показано, что свойства макроскопической поверхности потенциальной энергии препятствует истинному тройному делению актинидных ядер. Учёт оболочечной структуры осколков, например, для комбинации $^{132}\text{Sn} + ^{48}\text{Ca} + ^{72}\text{Ni}$ при делении ^{252}Cf приводит к появлению долины, хорошо отделённой от долины двойного деления. Расчёты приводят к заключению, что наиболее вероятным каналом тройного деления ^{252}Cf является комбинация «Sn + S + Ge». В случае деления сверхтяжёлых ядер вероятность тройного деления может резко возрасти из-за появления каналов «Sn + X + Sn». Вероятность фрагментации на три магических осколка может резко возрасти при квазиделении в случае комбинации сталкивающихся ядер типа $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$. Показана также возможность процесса тройного квазиделения гигантских ядерных систем «U + U».

Во второй главе диссертации представлена разработанная автором расширенная квазиклассическая динамическая модель ядро-ядерных столкновений, основанная на уравнениях Ланжевена. В разработанный обобщённый вариант модели введены существенные усовершенствования, которые касаются числа степеней свободы, расчёта потенциальной энергии, вычисления консервативных и диссипативных сил. Динамика процесса столкновения сложных ядер описывается от стадии сближения через стадию образования моноядра до стадии формирования продуктов реакции. Консервативная сила вычисляется через градиент энтропии, для расчёта тензора трения используется однопольный механизм ядерного трения. Девозбуждение образовавшихся первичных фрагментов описываются в

стандартной статистической модели. Проведено сравнение предсказаний разработанной модели массовых, зарядовых, энергетических и угловых распределений снарядоподобных и мишенеподобных продуктов реакции при столкновениях ^{136}Xe с ядрами ^{198}Pt , ^{208}Pb и ^{209}Bi при нескольких надбарьерных энергиях. Показана перспективность подобного типа реакций для получения и исследования нейтроноизбыточных ядер вблизи замкнутой нейтронной оболочки $N=126$.

Важным результатом диссертации является исследование совместного влияния каналов перераспределения нейтронов между сталкивающимися ядрами и низколежащих коллективных возбуждений на увеличение сечения слияния при энергиях ниже кулоновского барьера. Учёт коллективных возбуждений проводится в рамках квантовой модели сильной связи каналов, что позволяет хорошо описывать экспериментальные данные по слиянию в большинстве случаев. Для случаев столкновений пар ядер с положительными значениями энергии перераспределения нейтронов был разработан квазиклассический способ учёта перераспределения нейтронов и включён в квантовый метод связи каналов. Разработанная комбинированная модель успешно объясняет основные закономерности энергетической зависимости сечений околобарьерного слияния ядер.

Значительный вклад внесён автором в исследование мод распада тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. Предложены две новые систематики периодов спонтанного деления ядер для широкой области значений зарядов и числа нейтронов $92 \leq Z \leq 120$ и $140 \leq N \leq 190$ при использовании стандартного способа расчёта оболочечной поправки и для двухцентровой оболочечной модели. Проведён анализ стабильности сверхтяжёлых ядер вплоть до $Z = 132$ и перспектив синтеза ядер с $Z = 119 - 124$ в реакциях слияния при переходе от реакций с ^{48}Ca к реакциям с более тяжёлыми частицами. Сделано предсказание, что наиболее долгоживущими ядрами острова стабильности являются β -стабильные изотопы ^{291}Sn и ^{292}Sn с периодами полураспада около 100 лет, для синтеза которых необходимы пучки радиоактивных ядер.

Предложен новый способ синтеза нейтронообогащённых сверхтяжёлых ядер вблизи острова стабильности на основе предсказанной области электронного захвата при значениях заряда ядра $111 \leq Z \leq 115$. В соответствии с расчётами изотопы ^{291}Mc (исходная реакция слияния $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$) и ^{191}Fl (исходная реакция слияния $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cm}$) могут испытывать распады по каналам α -распада и электронного захвата с периодами полураспада в несколько десятков секунд. Поиск электронного захвата при распаде сверхтяжёлых ядер является перспективным направлением исследований на строящемся комплексе «Фабрика СТЭ» в Дубне. Используя разработанные методы расчёта вероятностей распада сверхтяжёлых ядер, автором проведены оценки выходов сверхтяжёлых ядер в астрофизическом r -процессе при сверхвысоких значениях нейтронного потока.

Автор внёс большой и во многом определяющий вклад в разработку и развитие базы знаний NRV по ядерной физике низких энергий в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва ОИЯИ, находящейся в свободном доступе через сеть Интернет. Основная часть результатов диссертации включена в эту базу.

Представленные в диссертации научные результаты относятся к числу наиболее актуальных проблем ядерной физики. Новизна исследований подтверждается влиянием работ А.В. Карпова на разработку теории взаимодействия сложных ядер и научного обоснования работ по синтезу и исследованию свойств сверхтяжёлых ядер.

Практическая значимость полученных А.В. Карповым результатов определяется их широким использованием при планировании работ по физике тяжёлых ионов в мировых научных центрах и интерпретации экспериментальных результатов. Результаты диссертации включены в базу знаний NRV ОИЯИ и широко используются исследователями и студентами.

Учитывая новизну, научную и практическую ценность представленных в диссертации результатов, их совокупность можно квалифицировать как научное направление в физике тяжёлых ионов – разработка теоретических

основ и расчётных методов для синтеза и исследования сверхтяжёлых ядер и нейтроноизбыточных тяжёлых ядер. Результаты диссертации были широко опубликованы в международных научных журналах, доложены на представительных научных конференциях и семинарах.

Автореферат полностью отражает содержание и результаты диссертации.

Представленная к рассмотрению диссертация заслуживает высокой оценки. Можно лишь сделать несколько замечаний общего характера.

(i) Не учтена возможность возбуждения коллективной изовекторной моды колебаний в двойной ядерной системе, которая может привести к уменьшению эффективной энергии во входном канале столкновений сложных ядер.

(ii) Использование параметризации двухцентровой оболочечной модели ограничивает класс фигур вблизи точки разрыва и формы шейки конечной толщины по сравнению с другими известными параметризациями, например, овалоидами Кассини.

(iii) Не приведены рассчитанные множественности и спектры заряженных частиц, которые являются важными пробами динамики процессов на различных стадиях столкновения ядер.

Диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, а её автор А. В. Карпов заслуживает присуждения ему искомой учёной степени.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,

ведущий научный сотрудник

Предприятие Госкорпорации «РОСАТОМ»

Акционерное общество «Радиевый институт имени В. Г. Хлопина»,

Рубченя В. А.

Адрес: Россия, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр-т, д.28

Тел.: +7 906 273 20 77

e-mail: rubkhri@mail.ru

Подпись В. А. Рубченя заверяю,

Акционерное общество «Радиевый институт имени В. Г. Хлопина»,

Учёный секретарь

доктор химических наук, профессор И.В. Смирнов