

C - 149

7-2020-39
На правах рукописи

САЙКО

Вячеслав Владимирович

ПОЛУЧЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ
ЯДЕР В РЕАКЦИЯХ МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2020

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

Научный руководитель *Карпов Александр Владимирович*
доктор физико-математических наук,
Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ,
ученый секретарь

Официальные оппоненты *Джолос Ростислав Владимирович*
доктор физико-математических наук,
профессор, Лаборатория теоретической
физики ОИЯИ, главный научный
сотрудник

Еременко Дмитрий Олегович
доктор физико-математических наук,
доцент, Научно-исследовательский
институт ядерной физики МГУ,
заместитель директора


Защита состоится «___» _____ 2021 г. в _____ часов на засе-
дании диссертационного совета ОИЯИ.03.01.2019.П при международной
межправительственной организации Объединённом институте ядерных
исследований (ОИЯИ) по адресу: 141980, ул. Жолио-Кюри 6, г. Дубна,
Московская область.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на офи-
циальном сайте Объединенного института ядерных исследований в
информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:
<https://dissertations.jinr.ru/ru/Dissertations/CalendarThesisDefenses>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-
технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул.
Жолио-Кюри, д. 6).

Автореферат разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

 А.Г. Попеко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Столкновения тяжёлых ионов являются одним из основных инструментов исследований в ядерной физике. Большой выбор возможных комбинаций сталкивающихся ядер и разнообразие наблюдаемых процессов стимулировало проведение множества ядерно-физических экспериментов. Одной из основных их целью является искусственное получение и идентификация различных нуклидов. За всю историю ядерной физики было найдено более 3000 ядер, большинство из которых является протоноизбыточными. Предсказывается существование ещё около 3000 преимущественно нейтроноизбыточных ядер, поэтому поиск методов их получения остаётся достаточно актуальной задачей современной ядерной физики.

Основными методами получения нейтроноизбыточных ядер являются реакции фрагментации, деления и многонуклонных передач. Первые два метода применяются для синтеза нуклидов в широком диапазоне масс, но не пригодны для получения ядер тяжелее урана. Для исследования области неизвестных нейтроноизбыточных изотопов тяжёлых элементов предлагается использовать реакции многонуклонных передач, происходящие в глубоконеупругих столкновениях тяжёлых ионов. Они характеризуются значительным нуклонным обменом и диссипацией кинетической энергии фрагментов. В результате открывается множество выходных каналов реакции, и в качестве продуктов образуются десятки и сотни ядер вблизи исходных снаряда и мишени.

В первых экспериментах по исследованию реакций глубоконеупругих передач были обнаружены и идентифицированы несколько десятков новых ядер, обладающих нейтронным избытком [1]. Стало ясно, что процессы многонуклонных передач, происходящие в данных реакциях, представляют собой перспективный метод получения как лёгких [2], так и тяжёлых [3] нейтроноизбыточных ядер. Кроме этого, реакции глубоконеупругих передач являются уникальным методом получения труднозаселяемых высокоспиновых неколлективных состояний в тяжёлых ядрах, которые важны для спектроскопических измерений [4].

Исследование нейтроноизбыточных ядер тесно связано с проблемой образования тяжёлых элементов во Вселенной. Согласно современным представлениям, одним из основных источников образования химических элементов тяжелее железа во Вселенной является r-процесс

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

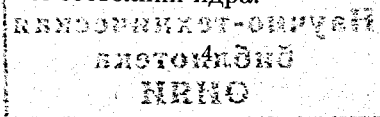
астрофизического нуклеосинтеза. Тяжёлые химические элементы синтезируются из лёгких за счёт быстрого захвата нейтронов, сопровождающегося β -распадом образующихся нейтроноизбыточных ядер. Данные о массах, периодах полураспада и других характеристиках нейтроноизбыточных ядер, особенно обладающих магическим числом нейтронов ($N = 50, 82, 126$), очень важны для определения детального сценария g -процесса. Наименее изученной является область вблизи заполненной нейтронной оболочки $N = 126$.

Для проведения экспериментов по получению нейтроноизбыточных ядер в реакциях многонуклонных передач необходимо создание надёжных теоретических моделей, способных не только описать основные характеристики данного типа реакций, но и достаточно точно рассчитать сечения образования конкретных продуктов. Одной из моделей, удовлетворяющих этим требованиям является многомерный динамический подход на основе уравнений Ланжевена. Более того, частично благодаря теоретическим работам, выполненным в рамках данного подхода [5-8], в настоящее время широко обсуждается и экспериментально исследуется возможность получения нейтроноизбыточных изотопов тяжёлых и сверхтяжёлых элементов в реакциях многонуклонных передач [9-12].

Целью данной работы является исследование реакций многонуклонных передач, происходящих в глубоконеупругих столкновениях тяжёлых ионов, как метода получения нейтроноизбыточных изотопов тяжёлых и сверхтяжёлых элементов, в том числе ещё неисследованных, в рамках многомерной модели ядро-ядерных столкновений, основанной на уравнениях Ланжевена.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Реализовать в рамках динамической модели возможность моделирования столкновений ядер, имеющих деформированную форму в основном состоянии, при их различной взаимной ориентации.
2. Определить глобальные параметры разработанной динамической модели на основе анализа экспериментальных данных по сечениям образования продуктов реакций глубоконеупругих передач в различных системах, включающих как сферические, так и деформированные в основном состоянии ядра.



3. Исследовать особенности протекания процессов многонуклонных передач в системах, которые состоят из ядер, различных по массе, изоспину, форме в основном состоянии, при разных энергиях столкновения.
4. Исследовать возможность получения нейтроноизбыточных изотопов тяжёлых и сверхтяжёлых элементов, в том числе ещё неисследованных, в реакциях многонуклонных передач. Рассчитать сечения образования этих нуклидов и установить их зависимость от энергии столкновения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Динамическая модель ядро-ядерных столкновений, основанная на уравнениях Ланжевена, обобщенная на случай моделирования реакций с участием ядер, деформированных в основном состоянии.
2. Выбор оптимальных параметров динамической модели для описания реакций многонуклонных (глубоконеупругих) передач в широком диапазоне масс сталкивающихся ядер.
3. Анализ влияния взаимной ориентации ядер, деформированных в основном состоянии, на динамику их взаимодействия.
4. Результаты расчётов экспериментально-наблюдаемых характеристик реакций многонуклонных передач для широкого набора сталкивающихся ядер и энергий реакции.
5. Теоретическое обоснование выбора оптимальной комбинации снаряд-мишень и энергии реакции для увеличения выхода нейтроноизбыточных тяжёлых и сверхтяжёлых ядер.

Научная новизна:

1. Доработана многомерная динамическая модель ядро-ядерных столкновений, применяемая к описанию реакций многонуклонных (глубоконеупругих) передач. Область применения модели была расширена от частного случая столкновений сферических ядер к общему случаю столкновений с участием ядер, имеющих деформированную форму в основном состоянии. Предложен универсальный набор параметров динамической модели, позволяющий достаточно

хорошо описать имеющиеся экспериментальные данные по энергетическим, угловым, зарядовым и массовым распределениям продуктов реакций глубоконеупругих передач для целого ряда систем, от $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ до $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$.

2. Впервые в едином подходе изучен широкий спектр вопросов, касающихся возможности получения новых тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в реакциях многонуклонных передач, а именно:

- Влияние массы и нейтронного избытка снаряда в реакциях многонуклонных передач с тяжёлой нейтроноизбыточной мишенью на сечения образования мишенеподобных продуктов.
- Выбор мишени для синтеза тяжёлых и сверхтяжёлых элементов в реакциях многонуклонных передач.
- Влияние процесса вынужденного деления на образование тяжёлых продуктов в реакциях многонуклонных передач. Зависимость выхода тяжёлых продуктов от энергии реакции.

Практическая значимость. Разработанная многомерная динамическая модель низкоэнергетических ядро-ядерных столкновений с универсальным набором параметров может быть использована для надёжного расчёта различных дифференциальных сечений процессов многонуклонных передач, протекающих в глубоконеупругих столкновениях тяжёлых ядер. Это может быть крайне важно при постановке соответствующих экспериментов.

В частности, результаты расчётов, выполненные в рамках разработанной модели, были учтены для проектирования экспериментальных установок, при постановке экспериментов по реакциям многонуклонных передач, а также при анализе их результатов, в ведущих мировых ядро-физических лабораториях: ЛЯР ОИЯИ (Дубна), GSI (Германия), GANIL (Франция) и Университет Ювяскюля (Финляндия).

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается достаточно точным их согласием с уже имеющимися экспериментально-измеренными характеристиками реакций глубоконеупругих передач. Отдельные результаты динамической модели, основанной на уравнениях Ланжевена, находятся в соответствии с выводами, полученными в рамках других теоретических подходов к описанию столк-

новений тяжёлых ионов таких, как GRAZING, модель двойной ядерной системы и нестационарный метод Хартри-Фока.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях:

1. 35th Mazurian Lakes Conference on Physics (Piaski, Poland, September, 2017);
2. Заседание программно-консультативного комитета ОИЯИ по ядерной физике (Дубна, Россия, Июнь 2018);
3. 53rd Zakopane Conference on Nuclear Physics (Zakopane, Poland, August, 2018);
4. 9й Международный симпозиум по экзотическим ядрам EXON18 (Петрозаводск, Россия, Сентябрь 2018);
5. 4th International Conference on Nuclear Structure and Dynamics NSD2019 (Venice, Italy, May, 2019);
6. 69я Международная конференция по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2019» (Дубна, Россия, Июль 2019).

Личный вклад. Автор принимал активное участие в постановке научных задач диссертации, разработке вычислительных алгоритмов, проведении расчётов, анализе полученных результатов, написании статей и их подготовке к публикации. Лично автором была обобщена многомерная динамическая модель ядро-ядерных столкновений на случай моделирования столкновений с участием ядер, имеющих деформированную форму в основном состоянии, предложен способ распределения энергии возбуждения между продуктами реакции в зависимости от времени её протекания, а также получен набор параметров динамической модели.

Исследования особенностей протекания реакций многонуклонных передач в системах ядер, характеризующихся различной массой, изоспином, а также формой ядра в основном состоянии, были выполнены при определяющей роли автора. Результаты расчётов, представленные в диссертации, и основные положения, выносимые на защиту, получены лично автором.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 9 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, и включённых в системы цитирования Scopus и Web of Science, 2 — в материалах конференций.

Краткое содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена теоретическому подходу к описанию реакций многонуклонных передач — многомерной динамической модели ядро-ядерных столкновений, основанной на уравнениях Ланжевена [8]. В этом подходе система сталкивающихся ядер описывается набором коллективных степеней свободы: расстояние между центрами ядер, параметры эллипсоидальной деформации обоих фрагментов, зарядовая и массовая асимметрии. Эти параметры задают семейство ядерных форм, а также распределение заряда, как для разделённых ядер, так и для составной системы. Также в качестве степеней свободы рассматриваются углы поворота обоих фрагментов и всей системы как целого.

Столкновение двух тяжёлых ядер рассматривается в модели как непрерывный трёхступенчатый процесс. На первом этапе сталкивающиеся ядра приближаются друг к другу, на следующей стадии происходит образование и дальнейшая эволюция единой составной системы. В конечном итоге происходит распад единой системы на два фрагмента, которые разлетаются в противоположные стороны в системе центра масс. В динамическом подходе на основе уравнений Ланжевена коллективная ядерная динамика описывается по аналогии с движением броуновской частицы (коллективные степени свободы), помещённой в термостат, образованный всеми остальными степенями свободы. Система уравнений Ланжевена состоит из классических уравнений движения, учитывающих

силу трения и случайную силу

$$\begin{cases} \dot{q}_i = \sum_j \mu_{ij} p_j, \\ \dot{p}_i = F_{\text{driving}} - \sum_{j,k} \gamma_{ij} \mu_{jk} p_k + \sum_j \theta_{ij} \xi_j(t), \end{cases} \quad (1)$$

которые связаны друг с другом через флуктуационно-диссипационную теорему:

$$\theta_{ik} \theta_{kj} = \gamma_{ij} T_i^*.$$

Здесь q_i и p_i — коллективные степени свободы, рассматриваемые в модели, и соответствующие им импульсы, $\mu_{ij} = |m_{ij}|^{-1}$ представляет собой обратный тензор инерционных коэффициентов, γ_{ij} — тензор трения, θ_{ij} — амплитуда случайной силы, $\xi_i(t)$ — случайная величина, образующая распределение Гаусса, а T_i^* — это эффективная температура ядра, учитывающая нулевые колебания для финитных коллективных мод движения. Движущая сила F_{driving} , входящая в систему уравнений Ланжевена (1), выражается через частные производные от свободной энергии по соответствующим коллективным координатам. Решение уравнений Ланжевена проводится численно с использованием разностной схемы Хьюна.

Эволюция ядерной системы определяется ландшафтом потенциальной энергии. Потенциальная энергия взаимодействия сталкивающихся ядер вычисляется в рамках макро-микроскопического подхода, основанного на двухцентровой оболочечной модели [13]. Для системы соприкоснувшихся ядер коэффициенты инерции μ_{ij} вычисляются в гидродинамическом подходе Вернера-Уилера [14], а соответствующие коэффициенты трения γ_{ij} — в модели однотельной вязкости [15]. В модели учитываются процессы нуклонных передач и диссипации кинетической энергии ещё до контакта ядер, которые начинаются на расстоянии действия ядерных сил ~ 2 фм. Транспортные коэффициенты, соответствующие степеням свободы массовой и зарядовой асимметрии для случая разделённых ядер, рассчитывались из скорости нуклонных передач λ , а для учёта диссипации энергии относительного движения вводится форм-фактор радиального трения по аналогии с моделью поверхностного трения [16].

В данной диссертационной работе была усовершенствована исходная версия многомерной динамической модели столкновений тяжёлых ядер, основанной на уравнениях Ланжевена [8].

- Изучен вопрос о распределении энергии возбуждения между продуктами реакции многонуклонных передач. Было обнаружено, что разделение полной энергии возбуждения между фрагментами зависит от времени взаимодействия ядер и изменяется от практически равного разделения для быстрых столкновений до пропорционального массам фрагментов — для длительных реакций. Учёт временной зависимости этого процесса с характерным временем перехода $\tau = 2 \cdot 10^{-21}$ с позволил улучшить согласие расчётов с экспериментально-наблюдаемыми изотопными распределениями продуктов в масс-асимметричных реакциях.
- Обнаружено, что интенсивность нуклонного обмена сильно зависит от массы сталкивающихся ядер. Хорошего описания экспериментальных данных по массовым и зарядовым распределениям продуктов, образующихся в реакциях глубоконеупругих передач от $^{58}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ до $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$, удалось достигнуть путём введения зависимости скорости нуклонных передач от полной массы системы: $\lambda \sim A_{\text{tot}}^2$.
- Предложен способ моделирования реакций с участием ядер, деформированных в основном состоянии. Для решения этой задачи, использовались следующие приближения:
 1. Рассматриваются предельные случаи взаимной ориентации ядер, когда каждый фрагмент может быть ориентирован либо вдоль, либо под прямым углом к оси, соединяющей их центры. Таким образом, в случае, если оба ядра имеют деформированную форму в основном состоянии, возникает четыре начальных взаимных ориентации ядер: $(0,0)$, $(0,\pi/2)$, $(\pi/2,0)$, $(\pi/2,\pi/2)$, при которых моделируются столкновения ядер. Дифференциальное сечение реакции вычисляется путём усреднения по взаимным ориентациям. При этом предполагается, что сечение реакции линейно зависит от ориентаций сталкивающихся ядер.
 2. Релаксация ориентированной ядерной системы к аксиально-симметричной происходит в направлении, перпендикулярном оси, соединяющей центры фрагментов, и не изменяет расстояние между центрами фрагментов. В этом случае семейства ориентированных и аксиально-симметричных форм ядерной систе-

мы могут быть связаны через параметры эллипсоидальной деформации фрагментов. Релаксация ориентированной ядерной системы к аксиально-симметричной реализуется в потенциальной энергии при помощи экспоненциального форм-фактора, зависящего от времени взаимодействия. Характерное время этого процесса, полученное в рамках динамической модели, составляет 10^{-21} с.

В конце главы обсуждается набор параметров модели, которые, главным образом, задают временную зависимость многомерной потенциальной энергии, коэффициенты радиального трения и трения скольжения, скорость нуклонных передач и расстояние между поверхностями ядер, на котором начинается диссипация кинетической энергии и обмен нуклонами. Исследуется их влияние на экспериментально-наблюдаемые характеристики продуктов реакции.

Вторая глава посвящена исследованию процесса уравнивания заряда (charge-equilibration) или величины N/Z (N/Z -equilibration), проявляющегося в реакциях многонуклонных передач. Этот процесс наблюдается в системах, состоящих из ядер с различными значениями N/Z , и заключается в перераспределении нуклонов между фрагментами так, чтобы минимизировать потенциальную энергию их взаимодействия. Было показано, что механизм этого процесса определяется ландшафтом потенциальной энергии в координатах Z и N и заключается в перекрестном обмене нейтронами и протонами между снарядом и мишенью. Длительность уравнивания величины N/Z , извлеченная из расчётов для реакции $^{58}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$, составила $0.5 \cdot 10^{-21}$ с. Эти результаты находятся в хорошем согласии с другими расчётами, выполненными, например, в рамках микроскопического нестационарного подхода Хартри-Фока.

Результаты анализа выходов конечных продуктов в реакциях ^{58}Ni , $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$, показанные на рис. 1, демонстрируют значительное влияние процесса уравнивания заряда на формирование продуктов многонуклонных передач. В реакции $^{58}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$, из-за наличия процесса уравнивания заряда, зарядово-асимметричные продукты (Fe, Cr, Po, Rn) имеют более высокие сечения образования, чем в реакции $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$. Не смотря на это, выходы изотопов с наибольшим нейтронным избытком оказываются больше в реакции $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$.

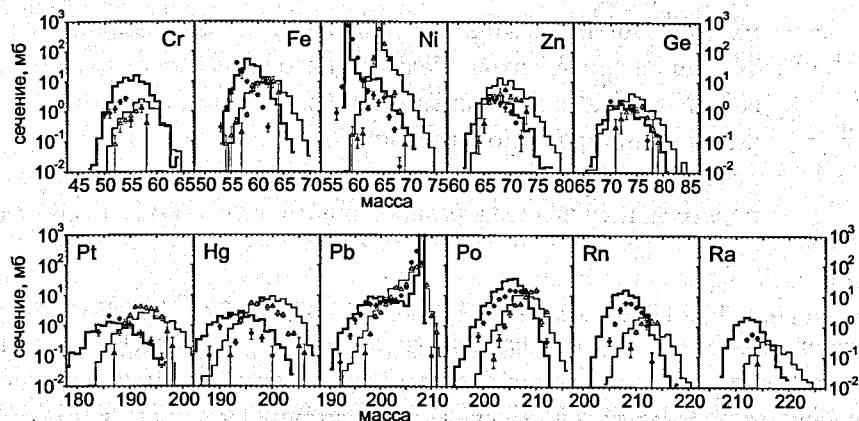


Рис. 1: Изотопные распределения конечных снарядо- и мишенеподобных фрагментов, образующихся в двух реакциях: $^{58}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ при энергии $E_{\text{с.м.}} = 270$ МэВ (сплошные ромбы и толстые гистограммы) и $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ при энергии $E_{\text{с.м.}} = 268$ МэВ (открытые треугольники и тонкие гистограммы). Гистограммы — результаты расчётов, полученные в рамках доработанной модели, а символами обозначены экспериментальные данные из работ [17, 18].

Третья глава посвящена исследованию характеристик продуктов, образующихся в реакциях многонуклонных передач с участием ядер, имеющих деформированную форму в основном состоянии. Одной из задач этой главы является апробация разработанного подхода для моделирования столкновений тяжёлых ядер, имеющих деформированную форму в основном состоянии. Вторая цель — это исследование возникающих при этом ориентационных эффектов, которые непременно оказывают влияние на динамику протекания столкновений и, соответственно, на формирование распределений продуктов по углам вылета, кинетической энергии, массам и атомным номерам. Такую информацию можно извлечь из анализа экспериментальных данных, полученных для реакций с участием похожих, но отличающихся своей формой в основном состоянии, ядер. В данной диссертационной работе были проанализированы несколько примеров таких систем: $^{144}\text{Sm} + ^{144}\text{Sm}$, $^{154}\text{Sm} + ^{154}\text{Sm}$ и $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, ^{238}U .

В системах $^{144}\text{Sm} + ^{144}\text{Sm}$ и $^{154}\text{Sm} + ^{154}\text{Sm}$ маловероятны процессы слияния-деления и последовательного деления тяжёлых продуктов, поэтому они очень удобны для изучения реакций глубокоэластичных

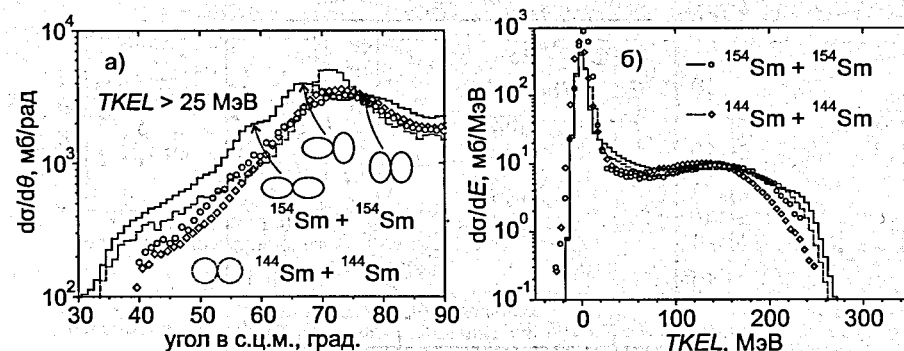


Рис. 2: (а) Угловые и (б) энергетические распределения продуктов реакции, полученные в реакциях $^{144}\text{Sm} + ^{144}\text{Sm}$ и $^{154}\text{Sm} + ^{154}\text{Sm}$ при энергиях $E_{\text{с.м.}} = 500$ и 485 МэВ соответственно. Гистограммами обозначены результаты расчётов, а символы показывают экспериментальные данные [19]. Пунктирная гистограмма и ромбы соответствуют реакции $^{144}\text{Sm} + ^{144}\text{Sm}$, сплошная гистограмма и кружки — реакции $^{154}\text{Sm} + ^{154}\text{Sm}$.

передач [19]. Динамическая модель ядро-ядерных столкновений хорошо описала имеющиеся данные по угловым и энергетическим распределениям продуктов, образованных в реакции $^{144}\text{Sm} + ^{144}\text{Sm}$ (см. рис. 2). При моделировании реакции $^{154}\text{Sm} + ^{154}\text{Sm}$ с учётом взаимной ориентации сталкивающихся ядер удалось хорошо описать энергетическое и зарядовое распределения продуктов реакции, но результаты расчётов углового распределения содержат несколько пиков, не наблюдаемых экспериментально. Они возникают из-за ограниченного числа учитываемых в модели взаимных ориентаций ядер.

Для таких тяжёлых систем, как $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, ^{238}U , значительная доля образовавшихся продуктов распадается с образованием осколков деления. Процессу последовательного деления подвержены наиболее тяжёлые первичные продукты, сечение образования которых резко падает с увеличением атомного номера продукта. Это проиллюстрировано на рис. 3 на примере зарядового распределения продуктов реакции $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$. Результаты расчётов, соответствующие конечным продуктам, хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными [20]. Экспоненциальный спад сечений образования продуктов тя-

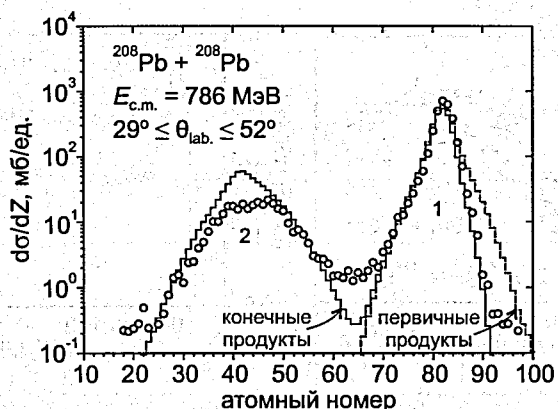


Рис. 3: Зарядовое распределение конечных продуктов, полученных в реакции $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$ при энергии $E_{\text{c.m.}} = 786$ МэВ. Результаты расчётов для первичных и конечных фрагментов обозначены штриховой и сплошной гистограммами. Символы соответствуют экспериментальным данным [20] (показано в масштабе, поскольку исходные данные приведены в произвольных единицах). Показаны вклады глубоконеупругих процессов (1) и последовательного деления (2).

желее мишени в реакциях многонуклонных передач также характерен для более массивных систем.

Большой интерес с точки зрения изучения ориентационных эффектов в рамках разработанной модели представляют столкновения $^{160}\text{Gd} + ^{186}\text{W}$ при околосбарьерных энергиях столкновения, в которых оба партнера имеют вытянутую форму ядра в основном состоянии. На рисунке 4 представлен пример вклада различных начальных ориентаций ядер в массовое распределение первичных продуктов реакции, образующихся при около- и надбарьерных энергиях $E_{\text{c.m.}} = 462, 502$ и 860 МэВ. Первые два значения приближённо соответствуют кулоновскому барьеру для ориентаций «вершина к боку» и «бок к боку». Наибольшая энергия значительно превышает кулоновский барьер.

Влияние ориентации ядер на динамику столкновений наиболее сильно проявляется при наименьшей энергии $E_{\text{c.m.}} = 462$ МэВ (см. рис. 4а). Сталкивающиеся ядра интенсивно взаимодействуют при начальной ориентации «вершина к вершине» (см. гистограмму 1 на рис. 4а), а столкновения «бок к боку», являющиеся подбарьерными для этой энергии, характеризуется сильно подавленными нуклонными пе-

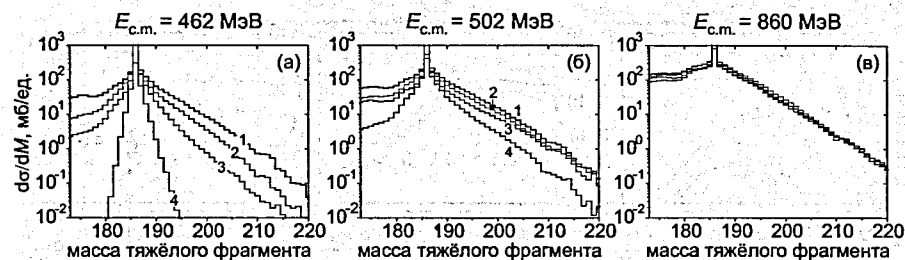


Рис. 4: Массовые распределения первичных продуктов реакции $^{160}\text{Gd} + ^{186}\text{W}$, рассчитанные для трёх энергий $E_{\text{c.m.}} = 462, 502$ и 860 МэВ. Гистограммами показаны результаты для столкновений «вершина к вершине» (1), «вершина к боку» (2), «бок к вершине» (3) и «бок к боку» (4).

редачами (см. гистограмму 4 на рис. 4а). При увеличении энергии реакции на 40 МэВ, интенсивные нуклонные передачи наблюдаются для всех начальных ориентаций (см. рис. 4б) и соответствующие результаты расчётов становятся ближе друг к другу, и следовательно, менее чувствительными к начальным ориентациям ядер. При наибольшей энергии $E_{\text{c.m.}} = 860$ МэВ (10 МэВ/нуклон) ориентационные эффекты исчезают (см. рис. 4в). Подобным образом начальные ориентации сталкивающихся ядер влияют на энергетические и угловые распределения продуктов, определяемые высотой кулоновского барьера и углом касательных столкновений (не показано).

Реакция $^{160}\text{Gd} + ^{186}\text{W}$ была изучена экспериментально на установке CORSET в ЛЯР ОИЯИ при энергиях $E_{\text{c.m.}} = 462, 502$ МэВ [12]. Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными показано на рис. 5. Расчётные данные, приведённые на рис. 5, учитывают условия экспериментальной регистрации продуктов как по углам вылета, так и по энергетическому и массовому разрешению.

Предложенная схема моделирования столкновений с участием деформированных в основном состоянии ядер позволяет достаточно точно описать экспериментальные данные по энергетическим, массовым и угловым распределениям продуктов реакций глубоконеупругих передач.

В **четвертой главе** проведено исследование реакций многонуклонных передач с участием актинидов. Ядра актинидов имеют вытянутую форму в основном состоянии и их взаимная ориентация оказывает существенное влияние на динамику протекания реакций с их участием.

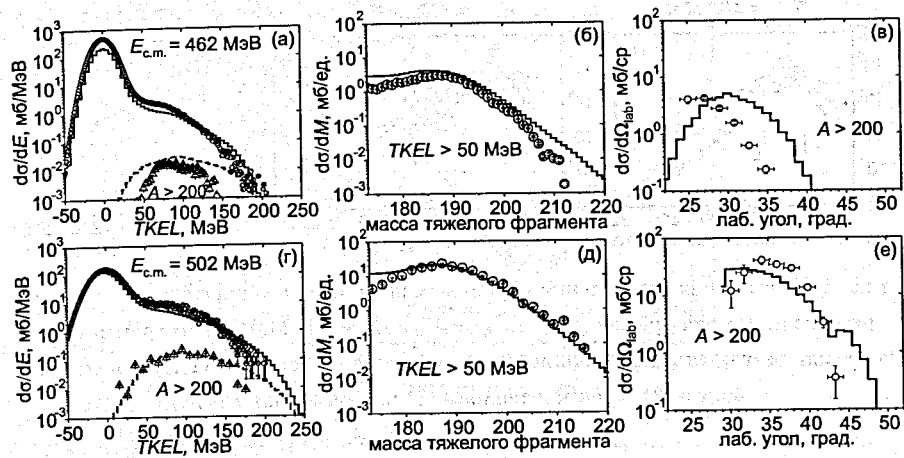


Рис. 5: Энергетические, массовые и угловые распределения первичных продуктов, полученных в реакции $^{160}\text{Gd} + ^{186}\text{W}$ при двух энергиях $E_{\text{с.м.}} = 462$ и 502 МэВ. Символами обозначены экспериментальные данные [12], жирные гистограммы показывают результаты расчётов, усреднённые по взаимным ориентациям ядер снаряда и мишени. Треугольниками и штриховыми гистограммами обозначены энергетические распределения, соответствующие мишенеподобным фрагментам с $A > 200$. В расчётах учитывалось экспериментальное разрешение (FWHM) 12 МэВ по энергии и 3 единицы по массе.

Более того, в актинидной группе находятся наиболее тяжёлые химические элементы, доступные для эксперимента. Поэтому реакции с участием актинидов представляют особый интерес для исследования возможности получения нейтроноизбыточных изотопов тяжёлых и сверхтяжёлых элементов в процессах многонуклонных передач.

Проблема образования наиболее массивных ядер в столкновениях двух актинидов исследовалась экспериментально для реакций $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}/^{248}\text{Cm}$ [21–23]. Сечения образования продуктов тяжелее мишени, идентифицированные радиохимическими методами, показаны на рис. 6. Соответствующие результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными. В этих реакциях сечение образования ядер тяжелее мишени экспоненциально уменьшается с увеличением их атомного номера. Для получения конкретного ядра система $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ имеет преимущество приблизительно в четыре порядка по сечению в сравнении с комбинацией $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$. Согласно расчётам, реакция $^{238}\text{U} + ^{254}\text{Es}$

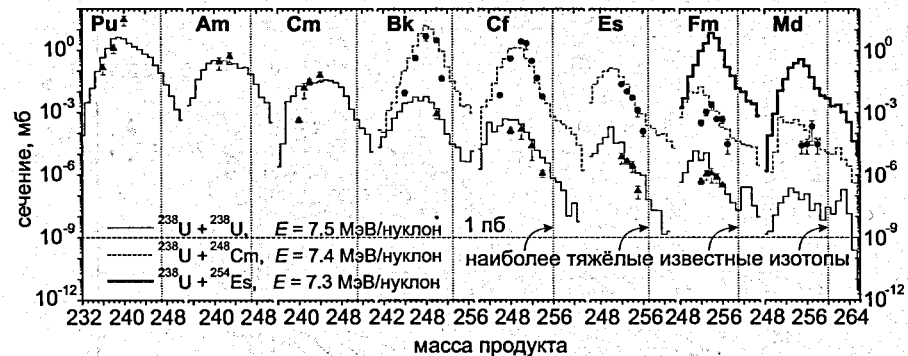


Рис. 6: Изотопные распределения конечных продуктов тяжелее мишени, полученные в столкновениях актинидов. Тонкие, пунктирные и толстые гистограммы соответствуют результатам расчётов для реакций $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ ($E = 7.5$ МэВ/нуклон), $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ ($E = 7.4$ МэВ/нуклон) и $^{238}\text{U} + ^{254}\text{Es}$ ($E = 7.3$ МэВ/нуклон). Экспериментальные данные для реакции $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ (треугольники) взяты из [21], а для $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ (круги) — из работы [22]. Наиболее тяжёлые известные изотопы данных химических элементов обозначены вертикальными пунктирными линиями.

приводит к дополнительному фактору увеличения выходов продуктов с $Z > 99$ ещё на три порядка. Тем не менее, сечения образования сверхтяжёлых элементов в данной реакции остаются чрезвычайно малыми для экспериментальной идентификации на современных установках (не показаны на рис. 6).

В то же время, сечения образования неисследованных нейтроноизбыточных изотопов трансурановых элементов в этих реакциях достаточно высоки для проведения соответствующих опытов на современной экспериментальной аппаратуре. Так, согласно расчётам, в столкновениях $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ могут быть получены несколько новых нейтроноизбыточных изотопов берклия с сечениями, превышающими 1 мкб, а для синтеза нескольких новых изотопов калифорния и эйнштейния понадобится достигнуть сечения порядка 0.1 мкб. На рисунке 7 показаны сечения образования продуктов реакции $^{238}\text{U} + ^{254}\text{Es}$ с $Z > 91$, наложенные на карту известных нуклидов. Видно, что в данной реакции может быть исследована достаточно большая область неизвестных нейтроноизбыточных изотопов тяжёлых элементов, начиная от урана и вплоть до менделевия, с сечениями более 1 мкб.

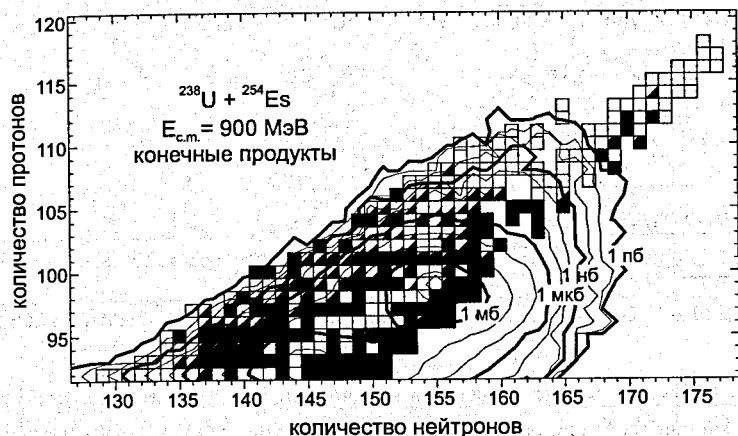


Рис. 7: Сечения образования конечных продуктов в реакции $^{238}\text{U} + ^{254}\text{Es}$ при $E_{c.m.} = 900$ МэВ, изображённые поверх карты известных нуклидов. Контурные линии показывают величину сечения в логарифмическом масштабе с шагом в один порядок.

На примере реакции $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ было показано, что выходы тяжёлых нейтроноизбыточных ядер слабо зависят от энергии столкновения. Аналогичное поведение было получено ранее [8] для сечений образования нейтроноизбыточных ядер с заполненной нейтронной оболочкой $N = 126$ в реакциях $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$, ^{208}Pb . В то же время, сечения образования химических элементов тяжелее мишени для реакции $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ имеют энергетическую зависимость с характерным максимумом при энергии, соответствующей высоте потенциального барьера взаимодействия для ориентации «бок-к-боку».

Моделирование реакций многонуклонных передач в различных комбинациях сталкивающихся ядер с актинидной мишенью позволило установить, что выбор наиболее массивного снаряда обеспечивает образование конечных продуктов тяжелее мишени с наибольшим нейтронным избытком. На рисунке 8 показаны результаты расчётов сечений образования тяжёлых ядер с числом нейтронов $N = 162$, образованных в реакциях ^{48}Ca , ^{136}Xe , $^{238}\text{U} + ^{251}\text{Cf}$.

Отметим, что только два ядра из этой группы — ^{267}Db и ^{270}Nh были синтезированы как продукты распада остатков испарения, образованных в реакциях слияния [24, 25]. Остальные ядра с $N = 162$ пока

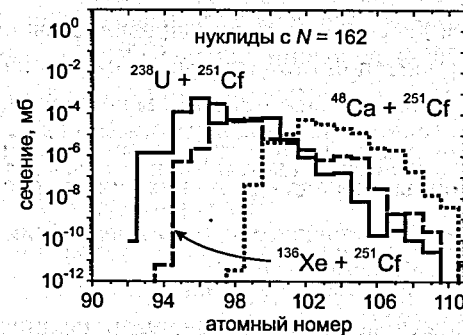


Рис. 8: Расчётные сечения образования ядер с числом нейтронов $N = 162$, образованных в столкновениях различных снарядов с мишенью ^{251}Cf . Точечными, пунктирными и сплошными гистограммами показаны результаты, полученные для реакций $^{48}\text{Ca} + ^{251}\text{Cf}$, $^{136}\text{Xe} + ^{251}\text{Cf}$ и $^{238}\text{U} + ^{251}\text{Cf}$ соответственно.

остаются неисследованными и могут быть получены в реакциях многонуклонных передач с тяжёлой актинидной мишенью ^{251}Cf с достаточно большими сечениями, достигающими величин порядка 100 нб.

В работе [8] было установлено, что система $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ является одной из перспективных комбинаций сталкивающихся ядер для получения нейтроноизбыточных ядер с заполненной нейтронной оболочкой $N = 126$ в реакциях многонуклонных передач. Сравнительный анализ выходов данных продуктов в реакциях ^{48}Ca , ^{136}Xe , $^{238}\text{U} + ^{198}\text{Pt}$ показал, что и для этой области ядер более массивный снаряд приводит к увеличению соответствующих сечений. Таким образом, выбор более тяжёлого снаряда в комбинации сталкивающихся ядер приводит к увеличению выходов тяжёлых нейтроноизбыточных продуктов в реакциях многонуклонных передач.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Для выполнения поставленных задач многомерная динамическая модель ядро-ядерных столкновений, основанная на уравнениях Ланжевена, была усовершенствована следующим образом:

- Реализована возможность моделирования столкновений ядер, имеющих деформированную форму в основном состоянии, при фиксированной взаимной ориентации. Результирующее диффе-

ренциальное сечение реакции определяется путём усреднения по углам ориентации сталкивающихся ядер во входном канале, учитывая только четыре предельные ориентации.

- Обнаружена и включена в модель зависимость интенсивности многонуклонных передач от полной массы системы.
 - Учтена временная зависимость распределения энергии возбуждения между фрагментами.
2. На основе анализа основных характеристик реакций глубокоэластичных передач удалось определить набор параметров модели, обеспечивающий достаточно хорошее согласие результатов расчётов с экспериментальными данными в широком диапазоне масс сталкивающихся ядер.
3. Взаимная ориентация ядер, имеющих деформированную форму в основном состоянии, значительно влияет на динамику столкновений с их участием и, следовательно, на распределения продуктов реакции по массам, атомным номерам, энергиям и углам вылета. Влияние взаимной ориентации проявляется наиболее сильно при околобарьерных энергиях из-за большой чувствительности динамики взаимодействия двух ядер к ландшафту потенциальной энергии. С ростом энергии столкновения роль ориентационных эффектов ослабевает.
4. При анализе сечений образования нейтроноизбыточных мишенеподобных продуктов в реакциях многонуклонных передач было обнаружено:
- Процесс уравнивания заряда, наблюдающийся в несимметричных по изоспину комбинациях сталкивающихся ядер с протоноизбыточным снарядом и нейтроноизбыточной мишенью, способствует передаче протонов со снаряда на мишень. Однако, при этом увеличиваются выходы преимущественно протоноизбыточных изотопов химических элементов тяжелее мишени. Показано, что выходы нейтроноизбыточных изотопов этих элементов оказываются больше в случае выбора нейтроноизбыточного снаряда.

- Масса снаряда оказывает большое влияние на сечения образования нейтроноизбыточных мишенеподобных продуктов в реакциях многонуклонных передач. Согласно расчётам, использование максимально тяжёлого (нейтроноизбыточного) снаряда приводит к увеличению выхода наиболее нейтроноизбыточных изотопов тяжёлых элементов.
- Расчёты показали, что процесс вынужденного деления сильно ограничивает выживание тяжёлых ядер, которые образуются в реакциях многонуклонных передач. Моделирование реакций с участием наиболее массивных из доступных актининов показало, что получение этим способом сверхтяжёлых элементов характеризуется чрезвычайно малыми сечениями. В то же время, в таких системах могут быть синтезированы ещё неисследованные нейтроноизбыточные изотопы трансурановых элементов с достаточно большими сечениями (~ 1 мкб).
- Анализ энергетической зависимости выходов тяжёлых продуктов на примере столкновений актининов показал, что для получения наибольшего выхода изотопов трансурановых элементов оптимальная энергия находится вблизи барьера взаимодействия, которым обладает наиболее компактная конфигурация ориентированных ядер.

Список литературы

1. В. В. Волков; Ядерные реакции глубокоэластичных передач. — Москва: Энергоиздат, 1982. — 183 с.
2. A. G. Artukh, V. V. Avdeichikov, G. F. Gridnev et al.; New isotopes $^{29,30}\text{Mg}$, $^{31,32,33}\text{Al}$, $^{33,34,35,36}\text{Si}$, $^{35,36,37,38}\text{P}$, $^{39,40}\text{S}$ and $^{41,42}\text{Cl}$ produced in bombardment of a ^{232}Th target with 290 MeV ^{40}Ar ions // *Nuclear Physics A*. — 1971. — Vol. 176, no. 2. — Pp. 284 – 288.
3. K. J. Moody, W. Bruchle, M. Brugger et al.; New nuclides: Neptunium-243 and neptunium-244 // *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei* — 1987. — Vol. 328, no. 4. — Pp. 417 – 422.

4. R. Broda; Spectroscopic studies with the use of deep-inelastic heavy-ion reactions // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2006. — Vol. 32, no. 6. — Pp. R151 – R192.
5. Valery Zagrebaev, Walter Greiner; Unified consideration of deep inelastic, quasi-fission and fusion-fission phenomena // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2005. — Vol. 31, no. 7. — P. 825.
6. V. Zagrebaev, W. Greiner; Shell effects in damped collisions: a new way to superheavies // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2007. — Vol. 34, no. 11. — P. 2265.
7. V. I. Zagrebaev, Walter Greiner; Production of heavy and superheavy neutron-rich nuclei in transfer reactions // *Phys. Rev. C*. — 2011. — Vol. 83. — P. 044618.
8. A. V. Karpov, V. V. Saiko; Modeling near-barrier collisions of heavy ions based on a Langevin-type approach // *Phys. Rev. C*. — 2017. — Vol. 96. — P. 024618.
9. E. M. Kozulin, E. Vardaci, G. N. Knyazheva et al.; Mass distributions of the system $^{136}\text{Xe} + ^{208}\text{Pb}$ at laboratory energies around the Coulomb barrier: A candidate reaction for the production of neutron-rich nuclei at $N = 126$ // *Phys. Rev. C*. — 2012. — Vol. 86. — P. 044611.
10. J. S. Barrett, W. Loveland, R. Yanez et al.; $^{136}\text{Xe} + ^{208}\text{Pb}$ reaction: A test of models of multinucleon transfer reactions // *Phys. Rev. C*. — 2015. — Vol. 91. — P. 064615.
11. Y. X. Watanabe, Y. H. Kim, S. C. Jeong et al.; Pathway for the Production of Neutron-Rich Isotopes around the $N = 126$ Shell Closure // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Vol. 115. — P. 172503.
12. E. M. Kozulin, V. I. Zagrebaev, G. N. Knyazheva et al.; Inverse quasi-fission in the reactions $^{156,160}\text{Gd} + ^{186}\text{W}$ // *Phys. Rev. C*. — 2017. — Vol. 96. — P. 064621.
13. V. Zagrebaev, A. Karpov, Y. Aritomo et al.; Potential energy of a heavy nuclear system in fusion-fission processes // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2007. — Vol. 38, no. 4. — Pp. 469 – 491.

14. K. T. R. Davies, A. J. Sierk, J. R. Nix; Effect of viscosity on the dynamics of fission // *Phys. Rev. C*. — 1976. — Vol. 13. — Pp. 2385 – 2403.
15. Arnold J. Sierk, J. Rayford Nix; Fission in a wall-and-window one-body-dissipation model // *Phys. Rev. C*. — 1980. — Vol. 21. — Pp. 982 – 987.
16. P. Fröbrich, I. I. Gontchar; Langevin description of fusion, deep-inelastic collisions and heavy-ion-induced fission // *Physics Reports*. — 1998. — Vol. 292, no. 3. — Pp. 131 – 237.
17. W. Krolas, R. Broda, B. Fornal et al.; Gamma coincidence study of $^{208}\text{Pb} + 350 \text{ MeV } ^{64}\text{Ni}$ collisions // *Nuclear Physics A*. — 2003. — Vol. 724, no. 3. — Pp. 289 – 312.
18. W. Krolas, R. Broda, B. Fornal et al.; Dynamical deformation of nuclei in deep-inelastic collisions: A gamma coincidence study of $^{130}\text{Te} + 275 \text{ MeV } ^{64}\text{Ni}$ and $^{208}\text{Pb} + 345 \text{ MeV } ^{58}\text{Ni}$ heavy ion reactions // *Nuclear Physics A*. — 2010. — Vol. 832, no. 3. — Pp. 170 – 197.
19. K. D. Hildenbrand, H. Freiesleben, A. Gobbi et al.; On the influence of shell structure in dissipative collisions // *Nuclear Physics A*. — 1983. — Vol. 405, no. 1. — Pp. 179 – 204.
20. T. Tanabe, R. Bock, M. Dakowski et al.; The Pb-Pb collision // *Nuclear Physics A*. — 1980. — Vol. 342, no. 1. — Pp. 194 – 212.
21. M. Schädel, J. V. Kratz, H. Ahrens et al.; Isotope Distributions in the Reaction of ^{238}U with ^{238}U // *Phys. Rev. Lett.* — 1978. — Vol. 41. — Pp. 469 – 472.
22. M. Schädel, W. Bröchle, H. Gäggeler et al.; Actinide Production in Collisions of ^{238}U with ^{248}Cm // *Phys. Rev. Lett.* — 1982. — Vol. 48. — Pp. 852 – 855.
23. J. V. Kratz, W. Bröchle, H. Folger et al.; Search for superheavy elements in damped collisions between ^{238}U and ^{248}Cm // *Phys. Rev. C*. — 1986. — Vol. 33. — Pp. 504 – 508.
24. Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkoy, Yu. V. Lobanov et al.; Experiments on the synthesis of element 115 in the reaction

$^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, xn)^{291-x}115$ // *Phys. Rev. C.* — 2004. — Vol. 69. — P. 021601.

25. Ch. E. Düllmann, W. Bruchle, R. Dressler et al.; Chemical investigation of hassium (element 108) // *Nature.* — 2002. — Vol. 418. — Pp. 859 – 862.

Публикации автора по теме диссертации

1. A. V. Karpov, V. V. Saiko. Production of neutron-rich nuclei in $^{136}\text{Xe} + ^{208}\text{Pb}$ multinucleon transfer reaction // *Int. Symp. on Exotic Nuclei, EXON16* / Ed. by Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev; Kanaz', 2016. — Singapore: World Scientific, 2017. — Pp. 249 – 255.

2. A. V. Karpov, V. V. Saiko; Study of deep inelastic collisions within multidimensional dynamical model // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2017. — Т. 14. — С. 584.

3. Alexander Karpov, Vyacheslav Saiko; Production of neutron-rich nuclides in the vicinity of $N = 126$ shell closure in multinucleon transfer reactions // *EPJ Web of Conferences.* — 2017. — Vol. 163. — P. 00027.

4. A. V. Karpov, V. V. Saiko; Modeling near-barrier collisions of heavy ions based on a Langevin-type approach // *Phys. Rev. C.* — 2017. — Vol. 96: — P. 024618.

5. V. Saiko, A. Karpov; Dynamics of near-barrier collisions of statically deformed nuclei // *Acta Physica Polonica B.* — 2018. — Vol. 49. — Pp. 307 – 312.

6. V. V. Saiko, A. V. Karpov. $^{136}\text{Xe}/^{238}\text{U} + ^{251}\text{Cf}$ Collisions at Near-Barrier Energies as Method for Production of Heavy Nuclides // *Int. Symp. on Exotic Nuclei, EXON18* / Ed. by Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev; Petrozavodsk, 2018. — Singapore: World Scientific, 2019. — Pp. 245 – 249.

7. V. V. Saiko, A. V. Karpov; Analysis of Multi-nucleon Transfers in Collisions of Actinides // *Acta Physica Polonica B.* — 2019. — Vol. 50. — Pp. 495 – 500.

8. V. V. Saiko, A. V. Karpov; Analysis of multinucleon transfer reactions with spherical and statically deformed nuclei using a Langevin-type approach // *Phys. Rev. C.* — 2019. — Vol. 99. — P. 014613.

9. V. V. Saiko, A. V. Karpov; Synthesis of Transuranium Nuclei in Multinucleon Transfer Reactions at Near-Barrier Energies // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2019. — Т. 16. — С. 478.

10. Vyacheslav Saiko, Alexander Karpov; Role of charge equilibration in multinucleon transfer in damped collisions of heavy ions // *EPJ Web Conf.* — 2019. — Vol. 223. — P. 01055.

11. В. В. Сайко, А. В. Карпов; Роль уравнивания заряда в реакциях многонуклонных передач // *Известия РАН. Сер. физическая.* — 2020. — Т. 84, № 4. — С. 559 – 564.

Получено 4 декабря 2020 г.