

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 720.001.06
в Международной межправительственной организации
Объединенный институт ядерных исследований

№248 от 29 июня 2018 года

Присутствовали:

Председатель совета:	Оганесян Ю.Ц.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Зам. председателя совета	Аксёнов В.Л.	доктор физ-мат наук	01.04.07
Ученый секретарь совета:	Попеко А.Г.	кандидат физ-мат. наук	01.04.16

Члены совета:

Авдеев М.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Апель П.Ю.	доктор хим. Наук	01.04.01
Балагуров А.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Гикал Б.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Гледенов Ю.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Головков М.С.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Джолос Р.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Дмитриев С.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Изосимов И.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Иткис М.Г.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Пенионжкевич Ю.Э.	Доктор физ.мат наук	01.04.16
Плакида Н.М.	Доктор физ-иат наук	01.04.07
Реутов В.Ф.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Скуратов В.А.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Тер-Акопьян Г.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Утенков В.К.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Шабалин Е.П.	доктор физ-мат. наук	01.04.01

Оганесян Ю.Ц.: Начинается защита Александром Владимировичем Карповым диссертации «Теоретический анализ основных механизмов образования и распада тяжелых и сверхтяжелых ядер» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Работа выполнена Лаборатории ядерных реакций.

Официальные оппоненты: Грудзевич Олег Теофильевич, доктор физико-математических наук, профессор Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского», заместитель генерального директора – директор отделения перспективных исследований, Курепин Алексей Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, главный научный сотрудник, Рубченя Валерий Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, Радиевый институт имени В. Г. Хлопина, ведущий научный сотрудник. Ведущее предприятие - Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Присутствуют 20 из 23 членов совета, в том числе 7 докторов наук по профилю диссертации. Слово предоставляется ученому секретарю совета для оглашения личного дела соискателя.

Попеко А.Г.: К сожалению, из трех оппонентов один – Олег Теофильевич Грудзевич отсутствует. По производственной необходимости он не смог приехать, он прислал положительный отзыв. Два оппонента: Курепин Алексей Борисович и Рубченя Валерий Андреевич, присутствуют на защите. Карпов Александр Владимирович 1977 года рождения кандидатскую диссертацию «Описание распределений осколков деления возбужденных составных ядер в рамках трехмерной ланжевеновской динамики» по специальности 01.04.02 и 01.04.16 защитил в Омском государственном университете. В настоящее время работает в должности ученого секретаря в Лаборатории ядерных реакций. Авторефераты разосланы своевременно, диссертация передана в библиотеку ОИЯИ также своевременно. Все документы представлены, размещены, когда положено.

Оганесян Ю.Ц.: Вопросы? Ну раз в порядке, то вопросов нет. Слово предоставляется соискателю. Пожалуйста Александр Владимирович, Вам 40 минут.

Карпов А.В.: Уважаемый председатель, уважаемые члены диссертационного совета, коллеги! Разрешите мне представить мою работу «Теоретический анализ основных механизмов образования и распада тяжелых и сверхтяжелых ядер».

Среди основных задач ядерной физики можно выделить как наиболее актуальную задачу изучения и синтеза сверхтяжелых элементов. В этом вопросе в последние 20 лет удалось серьезно продвинуться благодаря успешным экспериментам, выполненным,

прежде всего, в ЛЯР ОИЯИ, в реакциях синтеза с ^{48}Ca . Сегодня, когда завершается создание новых экспериментальных установок, обсуждается программа будущих исследований на этих установках, актуальность приобретает теоретический анализ реакций, ведущих к образованию сверхтяжелых элементов, изучение свойств их распада, а также новых способов получения и изучения еще неизвестных сверхтяжелых ядер, в частности, в районе центра острова стабильности.

Другой важной проблемой для ядерной физики является понимание процессов образования тяжелых элементов во Вселенной. Эта задача связана со знанием свойств нейтроноизбыточных ядер, расположенных вблизи так называемых точек ожидания астрофизического r -процесса, вблизи нейтронных замкнутых оболочек. Наименее изученной такой областью ядер на карте является область нейтронной оболочки $N=126$. Реакции фрагментации, которые традиционно используются для получения этих ядер, имеют чрезвычайно низкие сечения при значительном удалении от линии бета-стабильности. Поэтому обсуждение альтернативных способов получения таких ядер, я имею в виду, прежде всего, реакции многонуклонных передач, также является актуальной и важной задачей.

Таким образом, главной научной проблемой, на решение которой направлена данная диссертация, является анализ основных механизмов образования и распада тяжелых и сверхтяжелых ядер. В работе ставится и решается ряд задач:

- Построение многомерной потенциальной энергии тяжелой ядерной системы.
- Разработка динамической модели ядро-ядерных столкновений.
- Анализ реакций слияния ядер при энергиях вблизи кулоновского барьера.
- Анализ свойств радиоактивного распада тяжелых и сверхтяжелых ядер.
- И, наконец, создание общедоступного инструментария для анализа свойств ядер и ядерных реакций.

В первой главе диссертации обсуждаются подходы, которые в дальнейшем в работе используются для расчета потенциальной энергии ядерной системы. Перед нами стояла задача разработки способа описания потенциальной энергии, как в случае бинарного выходного канала, так и в случае трех фрагментов в выходном канале реакции. Для этого была разработана трехцентровая оболочечная модель. Для проведения динамических расчетов предлагается использовать времязависимый потенциал, на началь-

ном этапе определяемый diabатической составляющей, и соответствующий diabатический потенциал рассчитывался в методе двойной свертки с силами Мигдала.

В работе предлагается параметризация распределения ядерной плотности, которая позволяет рассчитывать этот потенциал с достаточной степенью точности. Поскольку diabатический потенциал не является равновесным, то после контакта ядер во входном канале происходит процесс релаксации к равновесному адиабатическому потенциалу, для расчета которого нами использовалась макромикроскопическая модель, основанная на двухцентровой оболочечной модели.

В работе предлагается расширенная версия макромикроскопической модели, которая позволяет рассчитывать потенциал в асимптотике системы разделенных ядер. Таким образом, потенциальная энергия является многомерной функцией коллективных степеней свободы, определяющих геометрические параметры системы. Это различные деформационные степени свободы и углы ориентации. Также потенциальная энергия зависит от распределения зарядовой плотности между составными частями системы.

Во второй главе диссертации выполнено построение многомерной модели ядро-ядерных столкновений и проводится анализ реакций многонуклонных передач, как метода получения новых ядер. Разработанная модель основана на уравнениях Ланжевена и использует понятие формы ядра. Вводятся степени свободы, которые наиболее важны для столкновения двух ядер. Таких степеней в нашей модели учитывается восемь.

Это расстояние между центрами масс ядер, эллипсоидальные деформации двух частей системы, массовая асимметрия, которая задает отношение объемов двух частей, три угла взаимной ориентации двух частей системы, а также распределение зарядовой плотности между ними.

Указанным восемью степеням свободы ставятся в соответствие восемь коллективных импульсов, и для полученных величин записывается система из шестнадцати уравнений Ланжевена. Изменение импульса во времени определяется суммой трех слагаемых: консервативная сила, которая в основном задается градиентом потенциальной энергии, диссипативная сила определяется соответствующим тензором трения и случайная сила, задающая флуктуации по коллективным степеням свободы, рассчитывается, исходя из соотношения Эйнштейна, которое связывает амплитуды случайной силы и тензор трения.

Решение уравнений Ланжевена начинается со стадии сближения двух ядер, когда они

находятся на достаточно большом расстоянии между их центрами, порядка 50 ферми. Сближаясь на расстояние порядка 12-15 ферми (это в районе точки контакта), начинается диссипация энергии и одновременно флуктуации по коллективным степеням свободы, что определяет перенос массы и заряда между взаимодействующими ядрами, изменение их деформации, углов ориентации и т.д. Заканчивается моделирование в момент, когда образуются конечные продукты реакции, и они опять разлетаются на расстояние порядка 50 ферми.

Таким образом, одно решение уравнений Ланжевена представляет из себя траекторию в многомерном пространстве, которое несет полную информацию об одном столкновении двух ядер. Для каждого такого события мы знаем: заряды и массы обоих фрагментов, углы их разлета, кинетические энергии, время реакции, энергии возбуждения и т.д.

Для того чтобы рассчитать сечения, решение уравнений Ланжевена повторяется многократно, таким образом набирается статистика в заданном диапазоне прицельных параметров. Далее в соответствии с условиями анализируемого эксперимента накладываются ограничения на полученные события относительно углов вылета фрагментов, их энергий, зарядов, масс и т.д. И, наконец, сечение находится достаточно традиционным способом через интеграл по прицельным параметрам.

Нашей первой целью была проверка работоспособности модели, для чего результаты моделирования сравнивались с разнообразными экспериментальными данными. Пример такого сравнения показан на слайде. Сравнение выполнено для системы $^{136}\text{Xe} + ^{208}\text{Pb}$. Эксперимент выполнен в ЛЯР ОИЯИ. Представлены энергетические распределения продуктов реакции, массовые распределения, угловые распределения для легких фрагментов и для тяжелых фрагментов. Сравнение выполнено при двух энергиях столкновения во входном канале. Мы видим, что для всех изучаемых величин удалось получить достаточно хорошее согласие с экспериментом. Результаты показаны для первичных фрагментов (возбужденных).

Для того чтобы рассчитать характеристики конечных продуктов, мы дополнительно привлекаем статистическую модель распада возбужденного ядра. Пример такого расчета показан синей кривой. Это конечные продукты реакции, образованные после де-возбуждения первичных осколков. В частности, мы здесь видим «плечо» в области легких масс, которое связано с делением тяжелых возбужденных продуктов реакции.

Другим примером сравнения экспериментальных данных с расчетом является сравнение изотопических распределений, полученных в реакции Хе+Pt. Здесь приведено сравнение расчетов с экспериментом для ксеноноподобных продуктов, для элементов легче ксенона и для элементов тяжелее ксенона. Расчеты демонстрируют хорошее согласие с экспериментом, что позволяет нам приступить к анализу реакций многонуклонных передач, как метода получения новых ядер.

Прежде всего, нами было выполнено сравнение возможностей реакций многонуклонных передач по сравнению с реакциями фрагментации, которые традиционно используются для получения нейтроноизбыточных тяжелых ядер. Представлены экспериментальные данные для фрагментации ^{208}Pb , ^{238}U и расчеты сечений образования изотопов осмия в реакциях многонуклонных передач для реакции Хе+Pt.

Как мы видим, в реакции фрагментации свинца область $N=126$ достичь в эксперименте не удалось, она была достигнута в реакции фрагментации урана, однако сечение составляет немногим более 4 пб, что на 7 порядков ниже, чем можно ожидать в реакциях многонуклонных передач. Таким образом, мы делаем вывод, что реакции многонуклонных передач являются, действительно, перспективным и эффективным методом получения тяжелых ядер, несмотря на то, что в реакциях фрагментации можно использовать гораздо более толстые мишени.

Также в диссертации анализируются особенности образования нейтроноизбыточных ядер. В частности, анализируются угловые распределения нейтроноизбыточных продуктов и зависимость сечений от энергии столкновения. Показывается, что для энергий вблизи кулоновского барьера, как, например, для реакции Хе+Pb при энергии 450 МэВ, что примерно на 15 МэВ над барьером, угловые распределения широкие и простираются вплоть до передних углов.

С увеличением энергии столкновения (например, для реакции Хе+Pt та же энергия 450 МэВ – это уже примерно 35 МэВ над барьером) угловые распределения видно, что становятся уже, и при энергиях существенно выше барьера угловые распределения фокусируются вблизи угла касательных столкновений, показанного стрелкой. Таким образом, расчеты показывают, что угловые распределения нейтроноизбыточных продуктов реакции являются чрезвычайно чувствительными к энергии столкновения. Напротив, в наших расчетах получено, что зависимость сечения от энергии довольно слабая.

Здесь показаны результаты именно расчетов, а «усы» соответствуют накопленной статистике. Мы видим, что сечения с учетом ошибки расчетов остаются примерно постоянными в широком диапазоне энергий столкновения.

Если теперь суммировать, посмотреть в целом, какие ядра могут быть получены в реакциях многонуклонных передач, например, для реакции $\text{Xe}+\text{Pt}$, то мы видим, что это широкий набор ядер вплоть до границ известной области. А в области $N=126$ с сечением, превышающим 100 нб, можно получить ряд новых неизвестных ядер. Таким образом, мы еще раз делаем вывод о том, что это, действительно, перспективный способ, который может эффективно применяться для решения данной задачи.

Другим широко обсуждаемым в литературе вопросом, связанным с реакциями многонуклонных передач, является возможность получения самых тяжелых ядер, в том числе сверхтяжелых. Здесь речь идет о реакциях столкновения ядер изотопов актинидов.

Нами был выполнен предварительный анализ подобных реакций для реакции $\text{U}+\text{Sm}$. Расчеты показывают, что первичные продукты образуются, действительно, с очень высокими сечениями. Однако, поскольку они являются высоковозбужденными, то выживает лишь малая их часть, показанная здесь сплошными кривыми в сравнении с экспериментальными данными.

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что данный тип реакций имеет немного перспектив в отношении синтеза действительно очень тяжелых ядер, в частности расположенных вблизи острова стабильности, из-за чрезвычайно низких сечений. Однако с высокими сечениями, доступными экспериментально, могут быть получены новые нейтроноизбыточные ядра в области трансуранов.

Когда мы обсуждаем вопросы, связанные со сверхтяжелыми элементами, то одним из важных аспектов являются свойства распада этих ядер. Изучению этого вопроса посвящена третья глава диссертации. Нами рассчитываются и анализируются свойства распада относительно альфа-распада, бета-распада и спонтанного деления. На мой взгляд, наиболее интересным результатом этой главы является обнаруженная область ядер, испытывающих электронный захват. Эта область расположена вблизи острова стабильности, правее тех ядер, которые уже были синтезированы в реакциях с ^{48}Ca . Поскольку данный тип распадов еще не наблюдался экспериментально, то первой задачей было показать качественно, почему такие ядра, испытывающие электронный захват как ос-

новную моду, могут существовать. Это становится понятно из рассмотрения энергетических характеристик.

Дело в том, что при приближении к магическому числу нейтронов $N=184$, и тем самым к центру острова стабильности, увеличиваются барьеры деления, уменьшаются энергии альфа-распада, и это приводит к резкому росту времен альфа-распада и спонтанного деления. Времена электронного захвата тоже увеличиваются, но не такими темпами. Поэтому в определенный момент именно электронный захват может стать доминирующей модой распада.

В диссертации анализируется также насколько вывод относительно существования области электронного захвата чувствителен к используемым в расчетах теоретическим ядерным массам. Нами были выполнены расчеты свойств распада с массами Мёллера, с массами Собичевского и с массами, рассчитанными нами в рамках двухцентровой оболочечной модели. Мы видим, что контуры области «красных» ядер, соответствующих как раз электронному захвату, видоизменяются при смене таблиц ядерных масс. Однако, сам факт ее существования я считаю достаточно надежным результатом.

Почему это важно? Дело в том, что это дает нам шанс, я бы даже сказал уникальный шанс, синтеза нейтроноизбыточных сверхтяжелых ядер и возможно даже при удачном стечении обстоятельств достижения центра острова стабильности. Предлагаемый нами метод заключается в следующем. На первом этапе должно быть получено ядро, которое с достаточной вероятностью испытывает электронный захват. Тогда, уходя в канал электронного захвата, ядро, теряя протоны, увеличивает число нейтронов. То есть по карте ядер мы сдвигаемся вниз и вправо, таким образом уходя в сторону нейтронообогащенных сверхтяжелых ядер. Опять же при удачном, как я сказал, выборе исходного ядра можно приблизиться к центру острова стабильности.

Один из вопросов заключается в том, как могут быть получены вот эти вот первоначальные сверхтяжелые ядра, которые могут испытывать электронный захват. Это можно рассмотреть на примере изотопов москочия. Так москочий с массовым числом 288 может быть получен в реакции $^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$ в 3п испарительном канале. Можно сдвинуться на 2 нейтрона и получить москочий с массовым числом 290 опять же в 3п испарительном канале, но уже в реакции $^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Bk}$ после испускания одной альфа-частицы. Потеряв примерно порядок в сечении, можно попробовать экспериментально

зарегистрировать события образования сверхтяжелого ядра в $2n$ канале в той же реакции $\text{Ca}+\text{Vк}$ и тем самым сдвинуться еще на один нейтрон вправо.

Однако более перспективный способ был предложен недавно Юрием Цолаковичем Оганесяном, который заключается в том, что необходимо регистрировать события сверхтяжелых ядер не в xn испарительных каналах, а в каналах с испусканием заряженных частиц, например, протонов. Тогда, например, в реакции $^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Cm}$ можно получить изотоп московия 293 в $1p2n$ испарительном канале, тем самым сдвинуться на целых три нейтрона в сторону нейтроноизбыточных ядер.

Такой тип реакций с вылетом заряженных частиц уже наблюдался экспериментально в области дубния. Эксперименты выполнены в ЛЯР ОИЯИ. Однако в области наиболее тяжелых ядер пока таких событий зарегистрировано не было, и в диссертации мы анализируем относительную вероятность выживания ядра в rxn испарительных каналах по отношению к вероятности выживания этого же ядра в каналах с испусканием только нейтронов.

Аналогичные расчеты были выполнены относительно вероятности выживания в αxn каналах. Расчеты выполнены для реакций с ^{48}Ca для различных актинидных мишеней. Мы видим, что относительная вероятность выживания в rxn и αxn каналах увеличивается с ростом энергии возбуждения и при околбарьерных энергиях, соответствующих энергиям возбуждения 40-45 МэВ, эта вероятность, а, следовательно, и сечение составляет порядка 1-10% от сечения образования в xn каналах. Близкий результат получен и относительно αxn каналов. Таким образом, эти сечения экспериментально могут быть достигнуты с использованием ускорительных комплексов будущего. Я имею в виду, прежде всего, это Фабрика сверхтяжелых элементов.

В четвертой главе диссертации нами анализируются реакции слияния, ведущие к образованию средних по массе ядер. Здесь основным вопросом является роль и взаимосвязь различных степеней свободы ядра, и их проявление при слиянии ядер при энергиях ниже кулоновского барьера. Суть выполненных исследований можно продемонстрировать на сравнении двух близких реакций $^{40}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$ и $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$.

Если мы предполагаем, что сближающиеся ядра неизменяемые, то есть с ними ничего не происходит в процессе сближения, то рассчитываемые сечения будут сильно недооценивать эксперимент. Если учесть, что ядра сближаясь могут деформироваться и тем самым будет понижаться барьер слияния, то рассчитываемые сечения для системы

$^{40}\text{Ca}+^{90}\text{Zr}$ уже будут достаточно близки к экспериментальным данным.

Известно, что для того чтобы согласовать результаты расчетов с экспериментом для второй системы необходимо еще дополнительно учесть, что для этой реакции открыт канал передачи нейтронов от циркония к кальцию, который ведет к дополнительному понижению барьера слияния и тем самым росту сечения слияния. Именно роль нейтронных передач при подбарьерном слиянии ядер в последние 10-15 лет является наиболее обсуждаемым вопросом при изучении слияния ядер при энергиях ниже кулоновского барьера, и именно на этом вопросе мы сконцентрировали свой анализ.

Для того, чтобы рассчитать такое сечение слияния нужно определить наиболее важную величину – это коэффициенты проницаемости кулоновского барьера, которые необходимо вычислить как с учетом каналов нейтронных передач, так и с учетом каналов коллективных возбуждений, таких как деформации ядер или их взаимная ориентация. Нам удалось записать соответствующее выражение для коэффициентов проницаемости таким образом, чтобы учет каналов коллективных возбуждений можно было выполнить независимо от учета каналов нейтронных передач. Это позволило выполнить расчеты не только в рамках эмпирического метода связанных каналов, который традиционно использовался уже довольно продолжительное время, так и впервые в рамках квантового метода связи каналов.

В работе анализируется представительный набор экспериментальных данных. Как я сказал, основным здесь вопросом является именно анализ роли каналов нейтронных передач. Нам удалось объяснить, описать экспериментальные данные для всех изученных систем без каких-либо вариаций параметров модели. Показано большое увеличение сечения слияния уже для упомянутой системы $\text{Ca}+\text{Zr}$. Еще больший эффект наблюдается и следует из расчетов для реакций слияния со слабосвязанными легкими ядрами, такими как, например, ^6He в реакции с цинком. Также нам удалось объяснить отсутствие видимого эффекта от нейтронных передач, несмотря на наличие положительных Q для этих самых передач, для таких систем, как, например, $^{60}\text{Ni}+^{100}\text{Mo}$.

Скажу, что этот вопрос в общем-то был довольно широко обсуждаемым в последние годы, поскольку он противоречил предыдущим экспериментальным наблюдениям. Также благодаря тому, что нам удалось выполнить расчеты с использованием квантового метода связи каналов, мы смогли впервые описать такую тонкую вещь, как функцию распределения по барьерам, которая вычисляется через вторую производную по

энергии от производства энергии на сечение слияния.

В результате выполненных исследований нами был сформулирован ряд критериев, при выполнении которых можно ожидать большой роли в подъеме сечения от каналов нейтронных передач. Итак:

- Система должна иметь большой выигрыш по энергии для передачи одного или двух нейтронов.
- Система должна быть жесткой относительно возбуждения коллективных мод, таких как колебания и вращения. Система должна быть плохо деформируемой.
- В случае реакций и с легкими ядрами, ядро, которое отдает нейтроны, должно иметь малую энергию их связи.

Наконец, в пятой главе диссертации обсуждается база знаний по ядерной физике низких энергий. Данная глава диссертации имеет прикладной характер для работы, поскольку в рамках этой системы нам удалось сделать доступными большинство кодов, большинство моделей, разработанных в диссертации, для широкого пользователя. База знаний создается и продолжает создаваться уже на протяжении порядка 20 лет. Над ней трудилось много авторов. Сама идея принадлежит Валерию Ивановичу Загребаеву. Мой вклад в контексте данной работы заключался, прежде всего, в размещении ряда моделей, которые развивались и использовались для выполнения диссертации. Это оболочечная модель, двухцентровая оболочечная модель, также коды, используемые для расчета адиабатического и диабатического потенциалов – это то, что необходимо для расчета потенциальной энергии ядерной системы. Когда мы говорим о свойствах распада ядер, то это позволило нам реализовать разделы альфа-распад, бета-распад и деление. Статистическая модель распада возбужденного ядра размещена в разделе «распад возбужденного ядра». Наконец, объединение кодов для описания сечения слияния и статистической модели позволило создать раздел, с помощью которого можно анализировать сечения образования остатков испарения в реакциях слияния.

В качестве примера работы системы здесь показан анализ процессов распада возбужденного вращающегося ядра в рамках статистической модели. Анализ выполняется в окне веб-браузера. Мы видим параметры модели, для большинства из которых могут быть выбраны значения по умолчанию и результаты расчетов. Данный ресурс позволяет рассчитывать: плотность уровней возбужденного ядра, ширины испускания лег-

ких частиц, а также вероятности выживания ядра во всевозможных каналах. Все результаты расчетов доступны для скачивания пользователем как в графическом виде, так и в табличном виде.

Важным показателем востребованности системы является количество обращений к ее ресурсам. В частности, мы наблюдаем в последние годы уверенный рост числа запусков вычислительных кодов. Так в предыдущем 2017 году с помощью базы знаний было выполнено 170 тысяч расчетов. Это примерно 460 расчетов в день, и мне особенно приятно, что 350 из 460 – это были расчеты, которые были выполнены с использованием моделей, развитых в диссертации.

Итак, на защиту выносятся следующие результаты положения:

- Макромикроскопическая модель потенциальной энергии двойной тяжелой ядерной системы.
- Трехцентровая оболочечная модель потенциальной энергии тройной ядерной системы.
- Многомерная динамическая модель ядро-ядерных столкновений, позволяющая в едином подходе описывать экспериментально наблюдаемые характеристики ядерных реакций с тяжелыми ионами.
- Результаты расчетов сечений образования нейтроноизбыточных ядер, в том числе вблизи нейтронной оболочки $N=126$, а также условия их наиболее эффективной экспериментальной идентификации.
- Результаты расчетов свойств распада тяжелых и сверхтяжелых ядер относительно α -распада, β -распада и спонтанного деления.
- Теоретическое обоснование существования области сверхтяжелых ядер, расположенных вблизи острова стабильности сверхтяжелых элементов и испытывающих электронный захват в качестве основной моды распада.
- Способ получения наиболее стабильных СТЯ с использованием реакций слияния и последующей серии электронных захватов.
- Критерии наблюдения усиления сечения слияния за счет связи с каналами передачи нейтронов при энергиях ниже кулоновского барьера. Способ учета процессов нейтронных передач при использовании квантового метода связанных каналов.
- База знаний по ядерной физике низких энергий NRV <http://nrv.jinr.ru>, доступная

через сеть Интернет и объединяющая большое количество экспериментальных данных с вычислительными кодами для моделирования свойств ядер и динамики ядерных реакций.

По материалам диссертации опубликовано 45 работ. 22 относятся к списку ВАК, они на слайдах показаны красным цветом. У меня все, спасибо за внимание!

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо. Вопросы, пожалуйста.

Джолос Р.В. Саша, вот реакция никель на молебдене-100, где учет передачи нейтронов должен бы привести к эффекту, а не привел. Это что, следствие того, что молибден деформированный и поэтому вращательная мода легко возбуждается?

Карпов А.В. Эффект, который дает как раз деформация этого ядра, он настолько сильный, что он просто перекрывает эффект от нейтронных передач, и на этом фоне мы просто ничего не видим. Нейтронные передачи, безусловно происходят, но вот их влияние оно не проявляется в сечении.

Джолос Р.В.: А вот то, что форма ядра то-ли аксиальная, то-ли триаксиальная имеет какое-то значение или нет?

Карпов А.В. Возможно к каким-то тонким эффектам это будет приводить. Мы этот вопрос не изучали. Мы предполагали аксиально-симметричную форму ядра. Потом это очень небольшие деформации. Это не деформации в районе седловой точки, т.е. триаксиальность еще не настолько важна.

Джолос Р.В.: В самом начале ты говорил о потенциалах: диабатический и адиабатический. Как описывалось изменение потенциала, переход в течении реакции от одного к другому?

Карпов А.В. Мы использовали вот это достаточно простое выражение. Есть время этой самой релаксации. Оно подбиралось из сравнения с экспериментом. Есть предыдущие теоретические оценки этого времени порядка 10^{-22} - 10^{-21} секунды. У нас получилось, что, для того чтобы согласовать результаты расчетов с экспериментом, это время есть 10^{-22} секунды.

Джолос Р.В.: Трение откуда бралось? Одна из тех моделей, которые обычно используются?

Карпов А.В. Это прежде всего однотельный механизм вязкости. Без всякой редукиции. Наши расчеты показали, что этого не нужно и даже приводит к ухудшению согласия с

экспериментом. Дополнительно, для разделенных ядер, поскольку диссипация начинается еще на подлете, еще до контакта ядер, то дополнительно мы вводили некие факторы с параметрами, которые также довольно надежно подбираются из сравнения с экспериментом. Фиксирование параметров модели было выполнено для одной реакции для одной энергии, и далее все расчеты выполнялись уже с неизменными параметрами модели. Мы наблюдали, что этого достаточно: подобрать параметры модели для одной реакции.

Джолос Р.В.: Коэффициент трения примерно такой, какой используют в этой области ядер?

Карпов А.В. Да, это достаточно стандартный способ расчета коэффициентов трения в одностепенном механизме.

Изосимов И.Н.: Недавние эксперименты в нашей лаборатории на сепараторе SHELS, результаты были опубликованы в майском номере Phys. Rev C показали, что на распаднвые характеристики тяжелых ядер очень сильно влияют октупольные моды. Можно сильно промахнуться на много порядков в гамма и электронном захвате если их не учитывать. Октупольные моды - мягкость по отношению к ним - у вас учитывались?

Карпов А.В. Нет, мы предполагали только разрешенные типы переходов из основного состояния в основное. Основной параметр, коэффициент f_{ot} , подбирался под экспериментальные данные. Естественно мы сравнили наши результаты расчетов со всеми доступными экспериментальными данными и точность, которую мы наблюдали – это плюс - минус два порядка величины. Это то, что мы имеем. На мой взгляд, по сравнению с той точностью, с которой могут быть рассчитаны времена альфа-распадов и спонтанного деления, этого в общем достаточно.

Тер-Акопьян Г.М.: Вы показывали угловые распределения тяжелых продуктов реакций, в частности, где число нейтронов 126, и они довольно широкие. Как вы бы видели подходы методические к их исследованию?

Карпов А.В. Те подходы, которые в мире развиваются, это торможение продуктов реакции в газе. При этом пучок, поскольку он летит под малыми углами (под нулевым углом), то он не тормозится, а продукты реакций глубоко неупругих передач, летящие в широкие углы, они тормозятся в газе, а затем используется (то, что мне известно) это либо лазерная ионизация для сепарации полученных ядер, либо MR-TOF спектрометры. Дальше с уже отсепарированными ядрами можно что-то делать: либо новые

реакции, либо изучать их свойства. Ну и так далее.

Насиров А.К.: Александр, у меня вот такой вопрос. Когда вы проводите вычисления в реакциях многонуклонных передач, то немного переоцениваете выходы некоторых фрагментов. Скорее всего, когда такие тяжелые ядра сталкиваются, у вас время контакта больше, чем в самом деле происходит. Может в этом причина?

Карпов А.В. Вы имеете в виду вот эту картинку?

Насиров А.К.: Да и еще другие были, когда вы ваш подход использовали для оценки выхода.

Карпов А.В. Если говорить о конкретном этом примере, то здесь есть небольшая сдвигка, примерно на один нейтрон. Могу сказать, что результаты расчетов, безусловно, можно практически идеально согласовать с экспериментом, если немного пошевелить параметры модели. Мы этого специально не делали, поскольку цель наша была не столько описание экспериментальных данных, сколько расчеты в неизвестной области. Здесь нужно иметь достаточно ясную картину по параметрам модели для того, чтобы делать предсказания. Безусловно, они имеют какую-то точность.

Насиров А.К.: Спасибо.

Оганесян Ю.Ц.: Пожалуйста, еще. Хорошо, если нет вопросов, спасибо. Садитесь. А мы перейдем к отзывам.

Попеко А.Г.: Имеется заключение Лаборатории ядерных реакций, утвержденное директором лаборатории профессором С.Н. Дмитриевым. Оно положительное и замечаний не содержит. Есть заключение ведущей организации, Московского государственного университета. Оно положительное и также замечаний не содержит. Других отзывов не поступало.

Оганесян Ю.Ц.: Предоставляю слово первому оппоненту. Алексей Борисович, пожалуйста.

Курепин А.Б.: Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо большое. Прошу Вас ответить на замечания.

Карпов А.В. Я, безусловно, согласен и благодарен за замечания, предложения. Относительно первого замечания я бы хотел сказать, что такие расчеты процессов образования составных ядер из конфигурации двух касающихся ядер мы планируем и уже проводим. В данной диссертации мы при анализе реакций слияния рассматривали слияние средних по массе ядер, и для таких реакций традиционно вероятность образования

компануд-ядра полагается равной единице. Второе замечание также связано с первым. Подобные расчеты на мой взгляд может быть более эффективно проводить как раз с использованием динамической модели, которая могла бы и может учитывать все те неучтенные каналы метода связанных каналов.

Оганесян Ю.Ц.: Второй оппонент - Валерий Андреевич, пожалуйста.

Рубченя В.А. Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо, большое.

Карпов А.В. Я также согласен с замечаниями. Относительно первого пункта (изовекторной моды). Мода, связанная с перераспределением заряда между двумя ядрами, учитывалась. Возможно, этот момент недостаточно хорошо освещен в диссертации.

Второе замечание касалось параметризации ядер. Мы использовали двухцентровую параметризацию, потому что цель, которую мы перед собой ставили, это непрерывное описание столкновения ядер, начиная от стадии сближения ядер во входном канале и до момента образования конечных продуктов реакции в реакциях глубоко неупругих передач, или в реакциях квазиделения, или деления. В этом случае использование разных параметризаций, например, во входном и выходном канале может привести к неким искусственным эффектам. Кроме того, увеличение числа степеней свободы ограничено возможностями вычислительной техники. На данный момент мы смогли включить максимум степеней свободы, которые позволяют выдержать компьютеры, которые нам доступны.

Относительно третьего замечания я также согласен. Такие величины, как спектры, они рассчитывались. Их анализ не проводился и поэтому в диссертации не представлен. Наверное это было бы интересно сделать в будущем.

Оганесян Ю.Ц.: У нас один оппонент отсутствует. Прошу учёного секретаря огласить его отзыв.

Попеко А.Г.: Оглашает отзыв. Текст прилагается.

Оганесян Ю.Ц.: Понятно, пожалуйста Александр Владимирович.

Карпов А.В. Относительно первого замечания, что касается рисунков. Я старался их сделать оптимального размера так, чтобы не раздувать размер работы и так, чтобы на мой взгляд, размер был достаточный, чтобы их можно было анализировать. Видимо не везде это удалось.

То, что касается второго замечания, я согласен с тем, что вторая глава совместно с первой действительно наиболее важные в диссертации. То, что они не равномерные, достаточно естественно. Цели сделать равнозначными главы такой не ставилось. Что касается базы знаний, то она, как я уже сказал, на мой взгляд имеет большое прикладное значение, в том числе для данной диссертации, поскольку важно не только разработать и апробировать какие-то модели, но и сделать их доступными для научного сообщества. База знаний вполне эти цели решает. Я считаю, что это достаточно важная вещь.

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо. Теперь у нас есть некоторое время для того, чтобы устроить дискуссию по диссертации, в которой могут участвовать все. Все присутствующие. Кто хотел бы высказаться? Пожалуйста, но перед тем, как мы это сделаем, я хотел сказать, что это первая диссертация, в основном теоретическая, которую мы защищаем у нас в нашем совете. Обычно я всегда считал, что теоретик должен идти в Лабораторию теоретической физики и там перед своими коллегами защищать. В данном случае то, что рассказывал Саша Карпов очень близко к тому, что мы делаем на ускорителях, это сильно влияет на все наше дело. Поэтому мы решили, что лучше пригласить теоретиков к нам в совет, чтобы все экспериментаторы слушали, что нас грубо говоря ждет. В этом смысле это первая диссертация, необычная в нашей среде. Дальше теоретики будут с экспериментаторами для того, чтобы просто понимали друг друга, моментально реагировали на те результаты, которые получаются, особенно когда новый ускоритель начнёт работать. Теперь, по существу.

Многое было сказано оппонентами. Это и понятно. Алексей Борисович очень быстро понял ситуацию, что будет запущена машина и когда те экзотические атомы, которые мы получали в штучном количестве, они будут получаться сотнями. Поминаете, то, что говорит Карпов, если вы полезете в экзотические каналы, потратив на это сотню по чувствительности, которую мы ожидаем от нового ускорителя, там вас ждет много сюрпризов.

Вот об этих сюрпризах он и говорит, и они на самом деле стоят того, чтобы потратить на это все средства, чтобы уйти в еще больший нейтронный избыток, который дается таким огромным трудом.

Немного, честно сказать, мне не понятно это подбарьерное слияние и связь каналов. Если бы не было связи каналов, то не было бы никакого слияния, так я понимаю. Связь каналов дает возможность ядрам слиться в результате каких-то изменений: или они

возбуждены, или они вращаются, или они колеблются. Это дает им сливаться там, где просто спокойные круглые ядра не сливаются. Но ведь можно это показать на спокойных и круглых ядрах сначала. Возьмите, скажем, кальций и свинец – два дважды магических ядра. Там нет связи каналов или она есть? Есть. Вот это очень интересно. Вот это значит не так оно все просто. Если на таких простых системах это просто показать, то на сложных системах это не так легко показать. Понятно, что они (связанные каналы) будут работать на сложных системах тоже, куда добавляется всякие ограничения: не так повернулось ядро, не такой избыток нейтронов и так далее и тому подобное. Этим придется еще много заниматься, но тут явно есть прогресс, шаг вперед. Только хочу сказать, что это не последний шаг.

Конечно, есть еще одна вещь. Мы экспериментаторы, работая в лаборатории экспериментальной, всегда читали статьи, делали эксперименты, сравнение с теорией. У нас в Дубне есть одна группа в Лаборатории теоретической физики, Ростислав Джолос – руководитель этой группы. У них один подход, свой. Подход к объяснению сложного процесса взаимодействия массивных ядер, выделения каналов разного типа.

Второй подход был развит уже в самой Лаборатории Валерием Ивановичем Загребавым. У него другой подход. Саша Карпов его ученик. Надо сказать, что Валерий Иванович много вложил в него и то, что сегодня вы слышали, там много того, что было начато Валерием Ивановичем. Я думаю, что, если бы Валерий Иванович присутствовал, он был бы очень доволен, как его молодой ученик прогрессирует в этом направлении. Поэтому, мне кажется, что сегодняшняя защита какая-то ему тоже очень большая. Суммируя выступления оппонентов, и добавляя все, что было сегодня сказано, в том числе и свое мнение, я думаю, что соискатель полностью соответствует требованиям, предъявляемым к доктору наук, способному самостоятельно ставить сложные эксперименты и интерпретировать полученные результаты. Если кто-то хочет что-нибудь добавить, я с удовольствием предоставлю слово.

Насиров А.К.: Сашу я знаю давно и по работам, и по общению. Очень доступный, открытый. Мы с ним часто участвовали в конференциях в разных странах и всегда к нему люди относились хорошо, слушали. Он делал, в самом деле, большой прогресс. У него своеобразный подход. Саше удалось (и это очень сложно) выйти на эксперимент. Получить хорошее согласие. Тем более не много параметров. Это достоинство его работы, его модели. Я надеюсь, что он будет еще больше применять динамическую

модель к раскрытию тайны процессов: влияние оболочек, ядерной диссипации. Я очень поддерживаю, желаю ему дальнейших успехов. От имени нашей группы: мы не конкуренты, мы сообща работаем. У нас много общего. Конечно, у каждого свой подход

Оганесян Ю.Ц.: Спасибо большое. Кто-нибудь еще желает? Если нет, тогда мы пойдем по нашей процедуре. Пожалуйста, Александр Владимирович, Вам заключительное слово.

Перед тем, как тебе дать заключительное слово,

Карпов А.В. Я благодарен всем присутствующим: членам диссертационного совета, коллегам, родным за то, что они пришли, за хорошие отзывы, за внимание к работе. Безусловно я благодарен всем своим коллегам-соавторам. Прежде всего, Валерию Ивановичу Загребяеву, с которым мне посчастливилось чуть более десяти лет проработать и, безусловно, вот этот результат в виде диссертации – это то, что он вложил, во многом это, конечно его заслуга. Я благодарен всем сотрудникам Лаборатории ядерных реакций, с которыми мне пришлось работать. Это и дирекция Лаборатории и сектора за очень полезные обсуждения, за поддержку, стимуляцию и мотивацию к работе. Безусловно, хочу высказать слова признательности семье в широком понимании этого слова, потому что совершенно очевидно, что без семьи, без их поддержки, практически ничего сделать нельзя или очень сложно. Спасибо за внимание!

Оганесян Ю.Ц.: Переходим к голосованию. Я предлагаю войти в комиссию Р.В. Джолос, С.Н. Дмитриев и И.Н. Изосимов провести голосование. Теперь пожалуйста, отдохните и проголосуйте.

ПОСТАНОВИЛИ: Избрать счетную комиссию в составе: Джолос Р.В., Дмитриев С.Н. и Изосимов И.Н.

СЛУШАЛИ: Утверждение протокола счетной комиссии по проведению тайного голосования о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Карпову А.В: Состав совета утвержден в количестве 23 человек, присутствовали на заседании 20 членов совета, по профилю рассматриваемой диссертации – 7. Роздано бюллетеней - 20, оказалось в урне для голосования – 20. Результаты голосования: "за" присуждение ученой степени доктора физико-математических наук Карпову Александру Владимировичу - 20, "против" - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Оганесян Ю.Ц.: Прошу утвердить протокол счетной комиссии. Протокол счетной комиссии утвержден единогласно. На основании изложенного диссертационный совет

Д 720.001.06 в Объединенном институте ядерных исследований принял решение о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Карпову А.В.

Переходим к обсуждению заключения совета по диссертации Карпова А.В. Посмотрите его, пожалуйста. Проект заключения есть у всех членов совета. Текст заключения прилагается.

Оганесян Ю.Ц.: Есть у кого-либо замечания. Если замечаний нет, то давайте за него проголосуем. Кто «за»? Против? Нет. Воздержались? Нет. Единогласно утверждено. На этом заседание нашего совета завершено.

Председатель диссертационного совета,
академик РАН

Оганесян Ю.Ц.

Ученый секретарь
диссертационного совет



Попеко А.Г.

03 июля 2018 г.