



FAIR/GSI · Planckstraße 1 · 64291 Darmstadt · Deutschland

**Карпова Наталья Владимировна**  
**Отдел по обеспечению деятельности**  
**диссертационных советов СПбГУ**

**FAIR - Facility for Antiproton and  
Ion Research in Europe GmbH**

**GSI Helmholtzzentrum für  
Schwerionenforschung GmbH**

Planckstraße 1  
64291 Darmstadt

**SHE Chemie**  
Bereichsleiter  
Prof. Dr. Ch.E. Düllmann

Dr. Alexander Yakushev

Telefon +49 6159 71 - 2460  
Fax +49 6159 71 - 3463

E-Mail a.yakushev@gsi.de

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Якушева Александра Борисовича на диссертацию Симоновски Димитара на тему: «Метод экспрессной газовой транспортировки продуктов ядерных реакций и распадов в различных газовых ячейках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Прогрессивное развитие методологий исследований экзотических нуклидов, охватывающих широкий спектр нестабильных ядер, включая как изотопы с экстремальным нейтронным или протонным избытком, так и сверхтяжелые элементы, имеет решающее значение для углубленного понимания ключевых процессов как в ядерной физике, так и в астрофизике, и способствует расширению наших знаний о структуре материи на микроскопическом уровне и эволюции Вселенной после Большого Взрыва. В настоящее время одним из фокусов физических и химических исследований экзотических нуклидов являются так называемые сверхтяжелые элементы, которые существуют исключительно благодаря эффектам стабилизации ядерных оболочек. Так, искусственно созданные сверхтяжелые элементы, следующие за рядом актинидов, на протяжении последних десятилетий находятся в центре теоретических и экспериментальных исследований. Недавно с открытием 118-го элемента, оганесон, завершена 7-я строка в периодической таблице элементов. Сверхтяжелые элементы как объекты экстремальной материи привлекательны для изучения ядерных, атомных и химических свойств, несмотря на то, что они характеризуются малыми сечения образования в ядерных реакциях и короткими временами жизни, что требует для их экспериментального изучения разработки эффективных методов получения, сепарации и доставки до детектирующего устройства. Исследование того или иного свойства сверхтяжелого элемента, его свойств радиоактивного распада, измерения массы, измерения энергий уровней атомной оболочки или химических свойств, требует как правило комплексного подхода и использования комбинации ряда методов сепарации и детектирования. Так, продукты реакций полного слияния, отделяют от первичного пучка ионов и продуктов реакций многонуклонной передачи с помощью заполненного газом или вакуумного электромагнитного сепаратора и направляют в фокальную

Geschäftsführung:  
Professor Dr. Thomas Nilsson  
Dr. Katharina Stummeyer  
Jörg Blaurock

FAIR:  
Sitz: Darmstadt  
Amtsgericht Darmstadt HRB 89372

USt-IdNr.: DE 275 595 927

Commerzbank Darmstadt  
IBAN DE03 5084 0005 0132 6305 00  
BIC COBADEFF508

GSI:  
Vorsitzender des Aufsichtsrates:  
Ministerialdirigent Dr. Volkmar Dietz

Sitz: Darmstadt  
Amtsgericht Darmstadt HRB 1528

USt-IdNr.: DE 111 671 917

Landesbank Hessen/Thüringen  
IBAN DE56 5005 0000 5001 8650 04  
BIC HELADEF3

плоскость для измерений в фокальном кремниевом детекторе, или выводят через тонкое входное окно в газовую ячейку. Термализованные до тепловых энергий за счет множества столкновений с атомами буферного газа ионы, извлеченные из газовой ячейки, могут затем использоваться для различных исследований в условиях высокого вакуума, таких как прецизионные измерения ядерной массы их основного или изомерных состояний, измерения подвижности ионов. Нейтрализованные атомы извлекаются из газовой ячейки для измерения их химических взаимодействий, а также для измерений электронных переходов методом лазерной спектроскопии. Для прецизионного измерения ядерной массы и лазерной спектроскопии изотопы сверхтяжелых элементов с периодом полураспада в несколько десятков миллисекунд могут быть доступны при скорости производства в несколько атомов в час, и в настоящее время этим методам доступны только изотопы элементов с порядковыми номерами 102-105. Так как сечения образования более тяжелых элементов стремительно уменьшаются, критически важно искать пути повышения эффективности эксперимента, в том числе повышения эффективности экспрессной газовой транспортировки.

Таким образом, с помощью изучения и усовершенствования данного метода, экспериментальные исследования по определению элементарных физических свойств становятся возможными для ранее недоступных экзотических нуклидов, а в том числе и для загадочных сверхтяжелых нуклидов. В первую очередь большой научный интерес представляет прецизионное определение их массы, измерения их времени жизни, изомерных состояний, свойств радиоактивного распада, включая устойчивость к спонтанному делению и измерение массового распределения осколков деления. Результаты данных экспериментальных исследований, могут быть использованы в астрофизике при моделировании процессов нуклеосинтеза и разработке физической теории синтеза и стабильности сверхтяжелых элементов и нуклидов на границах протонной и нейтронной стабильности.

**Актуальность** данной работы также подтверждается активным созданием и улучшением экспериментальных установок в целом ряде исследовательских центров в разных странах, как на реакторе ПИК (Россия), комплекс NICA (Россия), фабрика сверхтяжелых элементов (SHE Factory, Россия), FAIR (Германия), FRIB (США), GANIL (Франция), ускорительный комплекс HIAF (КНР), которые в том числе сфокусированы на исследование свойств именно таких редких экзотических нуклидов.

Представленное диссертационное исследование акцентировано на изучении, анализе и усовершенствовании методологии газовой транспортировки термализованных ионов и атомов, направляемых к детектирующим установкам, с учетом многообразия конфигураций газовых ячеек и камер, применяемых в различных известных экспериментальных установках по всему миру. Непрерывное развитие и оптимизация данного метода газовой транспортировки традиционно играют первостепенную роль в повышении эффективности изучения фундаментальных ядерных и атомных свойств, а также в расширении горизонтов доступности экзотических нуклидов

для современной ядерной физики. В этом контексте работа Симоновского Димитара приобретает существенную значимость, поскольку предложенные им результаты моделирования обладают потенциалом для интеграции и применения как в действующих, так и в будущих установках, предназначенных для экспериментального исследования редких экзотических нуклидов, находящихся на границе возможностей современных исследований.

Ключевой целью настоящего диссертационного исследования является создания аналитических подходов, модели и математического аппарата для оценки эффективности различных систем газовой транспортировки, применяемых в экспериментах, направленных на изучение ядерных, атомных и химических свойств труднодоступных экзотических радиоактивных изотопов и сверхтяжелых элементов. Автором проведено исследование теоретических и экспериментальных аспектов метода газовой транспортировки, успешно реализованного на настоящих установках TRIGA-SPEC и IGISOL-4, что позволило осуществить оптимизацию параметров, идентифицировать критические параметры газотранспортного процесса и предложить стратегии для повышения эффективности данного метода. **Новизной** данного диссертационного исследования является не только разработка математических моделей, описывающих процессы газовой транспортировки в различных газовых ячейках, но также и оптимизация критически важных экспериментальных параметров этих установок, подтвержденное участием диссертанта в впервые проведенных экспериментальных исследований по изучению мишенной камере TRIGA-Mainz на установке TRIGA-SPEC и газовой ячейке MARA-LEB на установке IGISOL-4. Итогом этой работы стало успешное подключение установки TRIGA-SPEC к установке TRIGA-TRAP и подготовка газовой ячейки для проведения экспериментов на установке MARA-LEB. Дополнительная **практическая ценность** диссертации заключается в потенциальной возможности применения разработанных методологий при реализации метода газовой транспортировки и создании установок для физических исследований короткоживущих нуклидов на базе ведущих мировых научных центров, таких как TRIGA-SPEC, IGISOL-4 и PITRAP. Представленные математические модели и экспериментальные данные также могут служить основой для проектирования новых типов газовых ячеек и мишенных камер для будущих экспериментов на более мощных ускорительных комплексах и высокопоточных реакторах.

Основные научные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, были представлены на десяти международных и российских научных конференциях. Кроме того, ключевые положения работы нашли отражение в четырех научных статьях, **опубликованных** в рецензируемых журналах, индексируемых в авторитетных базах данных Scopus и Web of Science.

Представленные в диссертации **результаты** базируются на экспериментальных данных, полученных на передовых европейских ядерно-физических установках, а также на строгом математическом анализе, что

обеспечивает их высокую **степень достоверности** и научной значимости. Автор принимал непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований, включая работы на установке TRIGA-SPEC, где проводился анализ скорости газовой транспортировки, а также в испытаниях новой газовой ячейки MARA-LEB на установке IGISOL-4, что позволило определить ее ключевые характеристики. Данный факт подтверждается его соавторством в публикациях, прошедших процедуру рецензирования, и докладах на международных научных конференциях и форумах.

**Содержание** данной диссертационной работы имеет следующую структуру: Введение, пять глав, составляющих основную часть работы, Заключение и Приложение.

**Во Введении** предоставлен обзор текущего состояния исследований экзотических нуклидов, обоснована значимость темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования. **Первая глава** посвящена теоретическим основам метода транспортировки газа. В ней приводятся основные уравнения и формулы, описывающие процессы генерации экзотических частиц в реакторном варианте, термализации и пространственного распределения термализованных частиц, ламинарного течения, диффузии и конвекции частиц в газе. **Вторая глава** описывает результаты экспериментальных и теоретических исследований метода газовой транспортировки, проведенных на реакторе TRIGA-Mainz. **В третьей главе** представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований газовой ячейки MARA-LEB на установке IGISOL-4. **Четвертая глава** представляет результаты исследования газовой ячейки UniCell и камеры отдачи RTC, предназначенных для экспериментов по изучению сверхтяжелых элементов в GSI (Дармштадт). Включены аналитические выводы и численные расчеты, выполненные с помощью COMSOL Multiphysics, для определения оптимальных параметров работы и транспортировки. **В пятой главе** рассматриваются результаты исследования газовой мишенной камеры экспериментальной установки ПИТРАП на реакторе ПИК, включая оптимизацию метода газовой транспортировки, анализ геометрии камеры и оценку возможностей для исследования экзотических ядер. **В заключении** представлены основные научные результаты и выводы диссертации. **Приложение** включает аналитические выводы математических формул, использованных в исследовании.

В целом, диссертационное исследование, выполненное Д. Симоновским, представляет собой достойную научную работу и содержит ряд значимых научных результатов, которые были отмечены выше. Тем не менее, в процессе внимательного ознакомления с текстом диссертации возникли следующие **замечания**, требующие дополнительного рассмотрения:

- В разделе 3.1, при описании установки IGISOL-4, не указаны причины выбора именно этой установки для проведения экспериментов. Были

ли проведены предварительные расчеты и анализ работы установки, соответствующие поставленным экспериментальным задачам? Были ли предварительные оценки подтверждены полученными результатами и последующим их анализом?

- В разделе 4.2.1, при оптимизации сеточного электрода, проводились симуляции электрического потенциала в газовой ячейке UniCell для различного числа металлических струн сеточного электрода. Во-первых, насколько критичен выбор правильного потенциала и равномерности электрического поля для организации процесса направленного движения положительно заряженных ионов и для эффективности ячейки? Каким образом проводилась оптимизация?
- В разделе 4.2.1, при оптимизации радиочастотной воронки, критичным является оценка емкости электродной сборки из керамических концентрических электродов. Насколько важна точность такой оценки, что может влиять на отклонения от оценочного значения параметра? Какими другими параметрами возможно скомпенсировать отклонения от оценочного значения емкости для получения желаемого результата по эффективности и скорости транспортировки ионов?

В работе были выявлены некоторые недостатки в изложении материала. Примерами этого могут служить следующие замечания:

- В работе встречаются грамматические и лексические ошибки, такие как несогласованность родов, падежей или употребление лишних слов. Эти поправки вполне понятны и допустимы, учитывая, что автор хоть и превосходно владеет русским языком, все же является иностранцем.
- Для обеспечения более четкого понимания для читателей, не являющимися экспертами в данной проблематике, необходимо было лучше объяснить граничные условия выбора геометрии той или иной газовой ячейки. Так, например, в главе, где представлены результаты симуляций для газовых ячеек UniCell и RTC на газонаполненном сепараторе TASCA, нужно было бы увязать свойства вылетающих из сепаратора продуктов ядерных реакций (их пространственное и энергетическое распределение) с параметрами геометрии газовой ячейки, а также с давлением и составом газа. Свойства продуктов ядерных реакций также диктуют необходимое быстрое действие. Это требует некоторого дополнительного разъяснения в тексте, предваряющем конкретные расчеты параметров ячеек.
- Кроме того, подрисовочные подписи на страницах 67, 68 и 69 английской версии диссертации пронумерованы русскими буквами, которые следует заменить английскими.

Отмеченные недостатки, однако, являются незначительными и не снижают общей высокой оценки диссертации. Представленная работа демонстрирует хорошее понимание темы, сочетает в себе комплексный подход в исследованиях для решения поставленной задачи, характеризуется оригинальностью получения результатов работы, и тем самым вносит значительный вклад в развитие данной научной области.

В **заключении**, следует отметить, что диссертация Симоновского Димитара представляет собой достойное научное исследование, вносящее существенный вклад в развитие метода газовой транспортировки экзотических нуклидов. Научные результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, позволяют повысить эффективность функционирования описанных газовых ячеек и послужат надежной основой для создания новых экспериментальных комплексов, предназначенных для проведения будущих успешных исследований в области фундаментальной физики. Полученные результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований ясно и структурировано представлены в тексте диссертации и иллюстрированы 35 рисунками и 12 таблицами. Вышеизложенные замечания не умаляют значимости основных научных результатов, полученных Д. Симоновским в его диссертационном исследовании. Английская версия текста диссертации в целом соответствует русскоязычному варианту.

Диссертация Симоновски Димитара на тему: «Метод экспрессной газовой транспортировки продуктов ядерных реакций и распадов в различных газовых ячейках», соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете». Соискатель Симоновски Димитар заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета,  
кандидат химических наук,  
приват-доцент Технического Университета Мюнхена  
зам. начальника отдела химии сверхтяжелых элементов  
Центра по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца  
(GSI Darmstadt)

А.Б. Якушев  
10 марта 2025 года

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to the reviewer, A.B. Yakushev.