

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Вечернина Владимира Викторовича 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 научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертационная работа Димитара Симоновски посвящена всестороннему, экспериментальному и теоретическому изучению и разработке методов газовой транспортировки продуктов ядерных реакций и распадов в различных газовых ячейках. Целью диссертации являлось исследование метода газовой транспортировки экзотических нуклидов, реализуемого в разных передовых установках в мире, и перенос полученных результатов на предлагаемый вариант газовой мишенной камеры для проекта PITRAP, который предполагается реализовать на высокопоточном исследовательский реакторе ПИК в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» - ПИЯФ в России.

Кроме прикладного значения, проведенные в диссертационной работе исследования имеют также принципиально важное значение для изучения фундаментальных проблем ядерной физики. Развитие и оптимизация экспрессного метода транспортировки газовой струи позволяет обеспечить высокоэффективный и сверхбыстрый вынос исследуемых короткоживущих ядер из газовой ячейки, прежде всего для экспериментальной спектроскопии распада и масс-спектрометрии, что дает возможность проводить экспериментальное изучение фундаментальных физических свойств экзотических нуклидов в расширенной области, в частности, в области нейтроноизбыточных изотопов. Результаты таких исследований необходимы для моделирования процессов нуклеосинтеза в астрофизических исследованиях, а также при изучении свойств сверхтяжелых элементов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Во введении подчеркивается научная значимость темы исследования. В частности, отмечается, что на данный момент метод газовой транспортировки приспособлен для изучения широкого класса экзотических нуклидов, независимо от метода их получения (на ускорителях или реакторах) и метода экспериментального измерения (ядерная спектроскопия распада, масс-спектрометрия), через модификации, оптимизации и усовершенствования газовых ячеек, которые обычно являются основной частью имплементации метода газовой транспортировки.

В первой главе изложены теоретические основания метода газовой струи, подробно рассмотрены последовательные этапы этого процесса: наработка экзотических нуклидов, термализация продуктов ядерных реакций (через электронное и ядерное торможение), теоретическое описание газового потока, осуществляющего процесс транспортировки частиц к выходному отверстию и последующей части экспериментальной установки. Анализ основан на использовании уравнения диффузии с конвекцией. Для его решения предварительно находится решение для скорости газового потока из системы

дифференциальных уравнений Навье-Стокса, которые упрощаются исходя из реальных значений параметров системы. Проводится теоретический анализ эффективности газовой транспортировки.

В главе 2 изложенный общий формализм применяется для теоретического и экспериментального анализа метода газовой транспортировки на реакторе TRIGA-Mainz, который реализован Институтом ядерной химии Майнцкого университета в Германии. Наличие реактора типа TRIGA позволяет проводить исследования ядерных свойств нейтроноизбыточных осколков деления ядер урана-235, получающихся при облучении тепловыми нейтронами. В главе представлены результаты экспериментального измерения кумулятивного времени транспортировки во время одного из экспериментальных сеансов на реакторе TRIGA-Mainz, теоретические выводы формул для оценки времени транспортировки и численные расчёты для определения наличия нуклидов, доступных для исследований в экспериментальных условиях на реакторе TRIGA-Mainz.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальному изучению газовой ячейки проекта MARA-LEB, разрабатываемого в ускорительной лаборатории Университета Ювяскюля в Финляндии. Эта экспериментальная установка работает с низкоэнергетическими пучками радиоактивных ионов. Новый вакуумный сепаратор MARA, состоящий из квадрупольного триплета, электростатического дефлектора и дипольного магнита, будет использован для выведения и фокусирования в новую газовую ячейку MARA-LEB радиоактивного ионного пучка, полученного в реакциях слияние-испарение. Термализованные нуклиды во внутреннем объёме газовой ячейки будут выведены методом газовой транспортировки к следующей части установки (ионовод, дипольный магнит, детекторная станция), которые всё ещё на момент проведения эксперимента не были технически реализованы. Основной целью данного проекта является детальное исследование экзотических явлений ядерной структуры путём изучения, в основном, протоноизбыточной области карты нуклидов, включающей ядра с избытком протонов рядом с линией протонной устойчивости и ядра с очень близким протонным и нейтронным количественным составом, в том числе нуклиды в окрестности изотопа ^{100}Sn . Из-за отсутствия полной технической реализации экспериментальной установки MARA-LEB, экспериментальные изучения метода газовой транспортировки в новой газовой ячейке MARA-LEB были проведены на установке IGISOL-4 в Университете Ювяскюля (Финляндия), которая используется для изучения различных экспериментальных задач, связанных с высокоточной масс-спектрометрией, в основном для определения массы экзотических нуклидов. Диссертантом были проведены измерения и анализ эффективности транспортировки и времени эвакуации тяжелых нуклеидов для этой установки, выполнено моделирование процесса транспортировки ионов в газовой ячейке и получены подгоночные кривые для спектров эвакуации ионов.

В главе 4 рассмотрены конструктивные особенности и представлены результаты теоретического исследования процесса газовой транспортировки для двух типов газовой ячейки, запланированных для экспериментальной эксплуатации в сопряжении с масс-сепаратором TASCA, который планируется использовать в институте GSI в Дармштадте (Германия) для исследования сверхтяжёлых элементов. Масс-сепаратор TASCA является ключевым инструментом в исследованиях сверхтяжёлых элементов в GSI. Он

используется для предварительной масс-сепарации заряженных продуктов реакции слияния по пути их транспортировки из мишенной камеры до высокоплотной газовой ячейки UniCell или аксиально-симметричной камеры отдачи (RTC). Диссертантом на основе полученных им аналитических формул были проведены численные расчеты, для определения оптимальных параметров работы газовой ячейки UniCell и характерных параметров транспортировки для камеры отдачи RTC.

В главе 5 предлагается вариант газовой мишенной камеры для проекта PITRAP, который предполагается реализовать на высокопоточном исследовательский реакторе ПИК в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» - ПИЯФ в России. Предлагаемый вариант установки для вывода наработанной активности из реактора ПИК методом газовой транспортировки в сочетании со сверхточной масс-спектрометрией (предложенный проект PITRAP) повторяет уже разработанное и успешно экспериментально введенное в эксплуатацию сопряжение установок TRIGA-SPEC и TRIGA-TRAP. Однако, примерно на два порядка большая плотность потока нейтронов в реакторе ПИК, обеспечивающая значительное увеличение скорости наработки короткоживущих экзотических нуклидов, позволит получить новые экспериментальные данные о массах нуклидов, особенно в богатых нейтронами регионах на карте нуклидов. Диссертантом исследованы различные варианты мишенной камеры для реактора ПИК, с учетом возникающего ограничения на ее размеры, в сравнении с установкой Mainz. Проведена оптимизация метода газовой транспортировки. Проведен анализ доступности для экспериментального изучения новых экзотических ядер.

В Заключение суммируются полученные результаты.

В Приложения вынесен вывод аналитических формул, используемых в диссертационной работе.

В целом работа производит очень хорошее впечатление. Она является редким сочетанием взаимодополняющих экспериментальных и теоретических исследований, выполненных на очень высоком уровне. Важно, что теоретический анализ основывается на аналитических расчетах, а не на монте-карловском моделировании. Это позволяет легко отслеживать зависимость результатов расчетов от параметров модели и осуществлять оптимизацию изучаемых процессов. С другой стороны опора на экспериментальные результаты (также полученные самим диссертантом!) позволяет упростить общие аналитические уравнения процессов, исходя из реальных значений параметров системы, и найти их приближенные аналитические решения (см., расчеты, выполненные в Приложении). Сравнение результатов расчетов по полученным аналитическим формулам с экспериментальными результатами для различных экспериментальных установок позволяет зафиксировать модельные параметры и вычленить общие закономерности (см., например, Табл.2.2).

В результате диссертантом были разработаны теоретические модели, описывающие процессы термализации и транспортировки нуклидов в газовой среде, и позволяющие как определить, так и оптимизировать параметры существующих установок газовой транспортировки. Они также могут быть использованы для проектирования новых экспериментальных установок. В частности, на Рис.5.2 диссертации представлены

самые тяжёлые нейтроноизбыточные изотопы осколков деления урана-235 при облучении тепловыми нейтронами, доступные для экспериментального изучения на реакторах TRIGA-Mainz и ПИК после оптимизированной газовой транспортировки из мишенной камеры и капиллярной системы. Показано, что более массивная мишень, высокопоточный реактор ПИК и оптимизация метода газовой транспортировки превосходят возможности, предоставленные на реакторе TRIGA-Mainz, и могут сдвинуть границу возможных изучаемых нуклидов глубже к области предполагаемых нуклидов г-процесса.

Работа написана ясным языком и хорошо оформлена, однако, после ее прочтения все же остаются некоторые вопросы:

На стр. 10, в разделе "Теоретическая и практическая значимость работы", утверждается, что результаты работы могут быть использованы "при имплементации оптимизированного метода газового носителя на один из вариантов осуществления экспериментальной установки для выноса наработанной активности на высокопоточном реакторе ПИК под названием PITRAP". Какие конкретные параметры установки PITRAP могут быть оптимизированы с использованием результатов данной диссертации?

В разделе 1.1, при описании начальной кинетической энергии продуктов деления, используется формула (1.2), которая не учитывает эффекты испускания нейтронов. Как этот эффект влияет на точность расчетов начальной энергии, особенно для легких продуктов деления?

Несмотря на ясное изложение в диссертационной работе присутствуют отдельные стилистические недочеты, в частности, в русскоязычной версии работы не везде согласуются падежи (см., например, стр.19, 80), что возможно является следствием машинного перевода англоязычной версии работы.

Данные замечания никоим образом не умаляют достоинств диссертационной работы, которая представляет собой цельное законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне и содержащее новые результаты, имеющие важное значение для развития ядерной физики. Диссертант провел комплексное исследование теоретических и экспериментальных аспектов метода газового носителя, что позволило как определить, так и оптимизировать параметры существующих установок и предложить улучшение метода газовой транспортировки. Практическая ценность диссертации заключается в возможности применения предложенных методик для исследования короткоживущих нуклидов в ведущих мировых научных комплексах, таких как TRIGA-SPEC, IGISOL-4 и PITRAP. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в четырех статьях в журналах, индексируемых в международных и российских базах данных, и докладывались на научных конференциях, включая международные, что доказывает высокий уровень проведенных теоретических исследований.

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 научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный университет

Handwritten signature in blue ink, reading "Вечернин".

Вечернин В.В.

21.03.2025