

## ОТЗЫВ

научного руководителя, кандидата физико-математических наук Кузнецова Александра Александровича на диссертационную работу Фурсовой Надежды Юрьевны «Фотоядерные реакции на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Н.Ю. Фурсова окончила с отличием бакалавриат (2019 г.) и магистратуру (2021 г.) физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В период с 1 октября 2021 г. по 30 сентября 2025 г. являлась аспирантом физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. За время обучения в аспирантуре успешно выполнила учебный план и на «отлично» сдала кандидатские экзамены. В настоящий момент Н.Ю. Фурсова работает программистом 1 категории в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ.

Диссертационная работа Фурсовой Н.Ю. посвящена получению новых экспериментальных данных о фотоядерных реакциях на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Работа направлена на решение крайне актуальной для современной ядерной физики задачи – попытке описания фотоядерных реакций различной множественности на средних и тяжелых ядрах на основе новых непротиворечивых экспериментальных данных. Фотоядерные реакции являются важнейшим инструментом для изучения структуры атомных ядер и их принципиальным отличием от ядерных реакций под действием других частиц является ограниченный спектр передаваемых угловых моментов и возможность изучать ядерные возбуждения непосредственно. Информация о сечениях, угловых распределениях и спектрах конечных продуктов важна для таких задач ядерной физики как: исследование механизмов образования обойденных ядер в процессе звездного нуклеосинтеза, вопросы, связанные с возможным триггерингом изомерных состояний ядер, трансмутация ядерных отходов, создание пучков радиоактивных ядер, создание бустеров для подкритических реакторов, исследование различных мод возбуждений атомных ядер, в том числе пигми резонансов, спин-флиповых и ножничных мод возбуждения. Современное теоретическое описание фотоядерных реакций крайне разнообразно, начиная с феноменологических подходов и заканчивая подходами, связанными с использованием функционала плотности или релятивистского среднего поля. Область возбуждений до 20 МэВ, т.е. область, где доминирует гигантский дипольный резонанс изучена наилучшим образом, экспериментальная информация о фотоядерных реакциях ограничена в основном реакциями с вылетом одного-двух нейтронов. Однако и в этой области есть серьезные расхождения, например, в сечениях фотонейтронных реакций, измеренных в разных лабораториях. Различия для главных каналов с вылетом одного нейтрона доходят до двух раз. Область за гигантским резонансом, от 20-ти до 50-ти МэВ, где основной механизм реакций – квазидейтронный, практически не изучена. Информация о фотоядерных реакциях (в том числе многонуклонных) в этой области энергий зачастую отсутствует в литературе. С помощью гамма-активационной методики в работе были измерены выходы и сечения фотоядерных реакций (в том числе многонуклонных) на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Большая часть экспериментов была проведена на пучках тормозного излучения импульсного разрезного микротрона НИИЯФ МГУ с максимальной энергией 55 МэВ. Применение гамма-активационной методики позволило в одном эксперименте на естественных изотопных мишенях определить сечения реакций сразу на нескольких стабильных изотопах. Сравнение теоретических расчетов с полученными новыми данными по фотоядерным реакциям позволило проанализировать вклады различных механизмов фотоядерных реакций (квазидейтронного механизма поглощения, обертона гигантского дипольного резонанса и квадрупольного резонанса) в зависимости от выбранного изотопа.

В диссертационной работе также впервые получены сечения на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах эрбия и диспрозия. На основании анализа данных измерений обнаружено уменьшение сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций с ростом массового числа в пределах одного изотопного ряда и общего уменьшения с ростом  $N/Z$ . В диссертационной работе также представлены результаты теоретических расчетов сечений фотоядерных реакций, выполненных на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и с использованием программного кода TALYS. Проведенное сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант с теоретическими данными указало на необходимость учета изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса для корректного описания фотопротонных реакций.

Кроме сечений фотоядерных реакций, в ходе работы были измерены изомерные отношения для изотопов палладия, родия, молибдена и ниобия. С фундаментальной точки зрения исследование возбуждения и распада изомерных состояний могут дать ответы на некоторые важные вопросы ядерной физики: во-первых, вклады прямых, полупрямых и статистических механизмов фотоядерных реакций в формирование и распад гигантских резонансов под действием гамма-квантов, далее это – структура возбужденных уровней, построенных на основном и возбужденных состояниях, силовые функции гамма-переходов, и спиновая-энергетическая зависимость возбужденных состояний. Проведенный анализ полученных экспериментальных значений, литературных данных и результатов расчетов по программе TALYS выявил необходимость учета порогового фактора и вклада многонуклонных реакций в формирование изомерных состояний атомных ядер.

Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют важное значение для задач ядерной физики, медицины и астрофизики. В области астрофизики фотоядерные реакции считаются одним из основных сценариев образования и разрушения обойденных ядер в процессе нуклеосинтеза. Н.Ю. Фурсовой получены сечения на эквивалентный квант для основных фотоядерных реакций на обойденных ядрах  $^{92}\text{Mo}$  и  $^{102}\text{Pd}$  и проведено сравнение этих результатов с теоретическими значениями, вычисленными с использованием комбинированной модели фотонуклонных реакций, программного кода TALYS, оцененных ядерных данных библиотеки JENDL. Показано, что расхождение измеренных сечений на эквивалентный квант для реакций  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91}\text{Mo}$  и  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91}\text{Nb}$  и данных моделирования с помощью TALYS и JENDL может быть причиной существенного занижения теоретических оценок распространенности обойденного ядра  $^{92}\text{Mo}$ .

В области ядерной медицины фотоядерные реакции рассматриваются как альтернативный метод наработки как широко используемых, так и перспективных медицинских изотопов. В диссертации представлены радиохимические выходы реакций, приводящих к получению радионуклидов  $^{161}\text{Tb}$  и  $^{166}\text{Ho}$  и побочных продуктов фотоядерного производства, при верхней границе тормозного излучения 55 МэВ. На основе комбинированной модели фотонуклонных реакций рассчитаны оптимальные энергии для получения данных медицинских изотопов в количествах, достаточных для доклинических испытаний.

Актуальность диссертационной работы также связана с созданием в России источника обратного комптоновского рассеяния (ИКИ НЦФМ). Отработка надежных методов определения сечений фотонуклонных реакций различной множественности является ключевой задачей для подготовки первых экспериментов на данной мегасайенс-установке. Сечения и выходы, полученные в работе Н.Ю. Фурсовой, а также отработанные методы проведения гамма-активационного эксперимента уже используются для разработки первоочередных экспериментов на ИКИ НЦФМ.

За время работы над диссертацией Н.Ю. Фурсова принимала активное участие в научных исследованиях лаборатории: подготовке и проведении экспериментов по облучению мишеней на тормозных пучках гамма-квантов разрезного микротрона РМ-55; обработке спектров остаточной активности, наведенной в облученных мишенях;

теоретических расчетах и интерпретации полученных результатов. Кроме того, Н.Ю. Фурсова участвовала в выполнении работ в сотрудничестве с Лабораторией ядерных реакций имени Г.Н. Флерова ОИЯИ. В процессе работы Н.Ю. Фурсова проявила себя как ответственный и компетентный исследователь, способный самостоятельно формулировать и решать научные задачи. Помимо научной работы Н.Ю. Фурсова вела задачи общего ядерного практикума (с 2019 по 2024 г.), преподавала курс «Физика атомного ядра и частиц» (с 2022 по 2024 г.) для студентов 2 курса физического факультета, участвовала в разработке «Нейтронно-активационный анализ» и проводила данную задачу в специальном ядерном практикуме (2025 г.).

Основные методики и результаты работы изложены в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук, а также были представлены в 20 докладах на международных и всероссийских конференциях, школах и семинарах.

Диссертационная работа Н.Ю. Фурсовой «Фотоядерные реакции на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена» выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и рекомендуется к защите по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Научный руководитель:

доцент кафедры общей ядерной физики  
физического факультета ФГБОУ ВО  
«Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова»,  
к.ф.-м.н.

4. 11. 2025

А.А. Кузнецов