

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Северюхина Алексея Павловича на диссертацию Фурсовой Надежды Юрьевны «Фотоядерные реакции на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Новые экспериментальные данные о структуре гигантских резонансов способствуют дальнейшему развитию как теоретических, так и экспериментальных исследований в ведущих лабораториях. Объяснения особенностей формирования и распада изовекторного гигантского дипольного резонанса невозможны без достоверной информации о сечениях фотоядерных реакций. Экспериментальные данные о сечениях фотоядерных реакций собраны в международной базе ядерных данных EXFOR. При этом фотонейтронные сечения для ряда ядер, измеренные в различных лабораториях, могут различаться в несколько раз. Данный разброс может быть обусловлен как погрешностями непрямых методов разделения нейтронов по множественности, так и применением детекторов, эффективность которых сильно зависела от энергии регистрируемых частиц. Информация о сечениях фотопротонных реакций на тяжёлых ядрах весьма ограничена. Целью диссертационной работы Фурсовой Н.Ю. является получение в рамках гамма-активационной методики новых экспериментальных данных о выходах и сечениях фотоядерных реакций различной множественности на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Актуальность этой цели и решения конкретных задач, которые поставил перед собой автор, не вызывает сомнений.

Новизна результатов диссертации очевидна, впервые получены сечения на эквивалентный квант для фотоядерных реакций на смеси естественного изотопного состава из эрбия, диспрозия и молибдена при максимальной энергии тормозного излучения 55 МэВ. Значимость и новизна результатов подтверждается их востребованностью при планировании первых гамма-активационных экспериментов на источнике монохроматического γ -излучения

ИКИ НЦФМ, а также возможности использования полученных сечений на эквивалентный квант для решения задач астрофизики и ядерной медицины.

Диссертационная работа, общим объемом 150 страниц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Список литературы включает 161 наименование и отражает публикации, касающиеся темы исследования.

Во введении обоснована актуальность работы, дан обзор научной литературы по теме исследования, поставлены цель и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава, в основном, является вводной. В этой главе кратко обсуждаются методы получения и последующей обработки экспериментальных данных. Представлены гамма-активационный метод и способы идентификации нуклидов в спектрах остаточной активности облучённых мишеней естественного изотопного состава. Отдельное внимание уделено методике расчёта выходов и сечений на эквивалентный квант для одноканального и двухканального случаев образования конечных ядер.

Во второй главе изложены теоретические подходы к описанию фотоядерных реакций: комбинированная модель фотонуклонных реакций и модели, учтенные в вычислительном коде TALYS 2.0. В рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций показано, что учет изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса является ключевым эффектом, определяющим выход фотопротонов. Кроме того, на примере сечения фотопоглощения на ^{168}Er приведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов десяти моделей, используемых в вычислительном коде TALYS 2.0. Таким образом, обоснована целесообразность выбора параметров кода по умолчанию для дальнейших расчетов.

В третьей главе представлены основные результаты экспериментальных исследований. Приведены сечения на эквивалентный квант для фотоядерных

реакций на смеси естественного изотопного состава из эрбия, диспрозия и молибдена при максимальной энергии тормозного излучения 55 МэВ. Выполнено сравнение экспериментальных значений с расчётами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и модели модифицированной функции Лоренца (вычислительный код TALYS 2.0, параметры по умолчанию). Показана необходимость учёта многонуклонных каналов фотоядерных реакций для образования лёгких изотопов эрбия и диспрозия, а также влияния изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса на фотопротонные реакции. Кроме того, из экспериментальных данных для мишеней естественного изотопного состава на основе весовых коэффициентов, рассчитанных с помощью комбинированной модели фотонуклонных реакций, были определены сечения на эквивалентный квант для реакций на отдельных стабильных изотопах. Использование полученных данных позволило выявить тенденции уменьшения сечений на эквивалентный квант внутри изотопного ряда с ростом массового числа и их общего уменьшения с увеличением отношения N/Z . Установлено, что одной из причин наблюдаемых закономерностей является рост сечений конкурирующих нейтронных каналов $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, что подтверждается экспериментальными данными.

В четвёртой главе обсуждаются возможности использования полученных сечений на эквивалентный квант для решения задач астрофизики и ядерной медицины. Изучаемые нуклиды ^{92}Mo и ^{102}Pd являются так называемыми обойденными ядрами в моделировании астрофизического процесса нуклеосинтеза. В случае фотоядерных реакций на ядрах ^{92}Mo и ^{102}Pd проанализированы каналы, приводящие к распаду указанных ядер. Выполнено сравнение экспериментальных данных, полученных при максимальной энергии тормозного излучения 55 МэВ, с расчётами в рамках различных теоретических моделей, предложенных в базе данных JENDL и при помощи вычислительного кода TALYS 2.0. Продемонстрировано расхождение экспериментальных и теоретических сечений на эквивалентный квант. В области ядерной медицины

на основе полученных экспериментальных радиохимических выходов фотопротонных реакций и расчётов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций проанализированы возможности фотоядерной наработки перспективных медицинских изотопов ^{166}Ho и ^{161}Tb . С учётом требований к высокой активности целевого радионуклида и малой доле побочных нуклидов определены оптимальные энергии для наработки данных медицинских изотопов на ускорителях электронов.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий уровень проведенных исследований, подтверждающий профессиональную квалификацию автора. Выполненная диссертационная работа Фурсовой Н. Ю. представляет собой цельное завершённое исследование. Основные результаты диссертации представляют несомненный интерес. Работа хорошо вписывается в контекст исследований современной ядерной фотоники, актуальна, значима и представляет ценность для исследования фотоядерных реакций при помощи новых источников монохроматического γ -излучения.

Результаты диссертации Фурсовой Н. Ю. представляются достоверными, поскольку в основе диссертационной работы лежат стандартные экспериментальные методики исследования фотоядерных реакций, а также проведено сравнение с результатами расчетов современными теоретическими методами ядерной физики.

Выносимые на защиту положения являются обоснованными, прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях, а основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных журналах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Каких-либо существенных недоработок, сказывающихся на качестве проведенных автором диссертации исследований, мной не обнаружено. В качестве замечаний по диссертации отмечу следующее.

1. При том, что объем проведенных исследований значителен, изложение материала в некоторых местах выглядит излишне лаконично. Это может быть отнесено к описанию формализма комбинированной модели фотонуклонных реакций, а также к обсуждению плотности распределения числа тормозных фотонов с данной энергией на один электрон пучка ускорителя.
2. Определения энергий порогов реакций предполагаются общеизвестными и не представлены в диссертации.
3. В первой главе подробно описан способ получения выходов фотоядерных реакций на один электрон ускорителя в одноканальном и двухканальном случаях на основе использования площадей фотопиков в спектрах остаточной активности. Однако остаётся вопрос, как определялся выход образования изотопа при использовании для его идентификации нескольких гамма-линий: как среднее значение или как выход, рассчитанный по наиболее вероятной гамма-линии?
4. Интересным является не вошедший в представленную диссертационную работу вопрос о роли учета ядерного двойного гамма-распада при получении изомерных отношений.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. В частности, последнее замечание в большей мере носит характер пожеланий, касающихся возможных направлений будущих исследований. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени

доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Фурсова Надежда Юрьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

___ А.П. Северюхин

24.02.2026

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований,
доктор физико-математических наук
(специальность: Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий - 1.3.15),
ул. Жолио-Кюри, д. 6, г. Дубна,
Московская обл., 141980
тел.: +7 (495) 925-11-11
e-mail: sever@theor.jinr.ru

Даю согласие на обработку моих персональных данных любым законодательно разрешенным способом.

Подпись официального оппонента А.П. Северюхина заверяю:

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ,

кандидат физико-математических наук ___

___ А. В. Андреев

24.02.2026