

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук Ремизова Павла Дмитриевича  
на тему: «Фотоядерные реакции как инструмент получения изотопа  $^{89}\text{Zr}$   
для целей ядерной медицины»  
по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий**

Использование ядерно-физических методов в области медицины в последние десятилетия развивается бурными темпами в целом ряде направлений. Одним из таких направлений является позитронно-эмиссионная томография с использованием иммунных антител. Иммунным антителам требуется несколько суток, чтобы локализоваться в очагах патологических новообразований, так что изотоп, используемый для визуализации распределения новообразований в организме, должен обладать сопоставимым периодом полураспада. Такими физическими характеристиками обладает изотоп  $^{89}\text{Zr}$ . Как правило,  $^{89}\text{Zr}$  нарабатывается на ядерных реакторах и ускорителях тяжелых заряженных частиц. В диссертации рассматривается альтернативный способ получения этого изотопа – его наработка в фотоядерных реакциях на ускорителях электронов, поскольку такие ускорители технологически проще в эксплуатации и обслуживании по сравнению с циклотронами и реакторами.

В диссертации решается задача получения  $^{89}\text{Zr}$  в фотоядерных реакциях с испусканием протонов и  $\alpha$ -частиц, поскольку в этих реакциях можно применить химические методы для выделения различных радиоизотопов из материала мишени и получить  $^{89}\text{Zr}$  с характеристиками, обусловленными медицинскими целями.

Все вышеизложенные аргументы позволяют утверждать, что новизна, актуальность, научная и практическая ценность диссертации не вызывают сомнений.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 102 страницы, включая 35 рисунков и 14 таблиц. Библиография содержит 169 наименований. Основные

результаты диссертации изложены в 6 статьях автора, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах RCSI, Web of Science и SCOPUS (Q = 2–4), рекомендованных для защиты в Диссертационном совете МГУ по соответствующей специальности и входящих в перечень ВАК.

ВО ВВЕДЕНИИ обосновывается методология проведенных в диссертации исследований, их актуальность, новизна, научная и практическая значимость и степень достоверности полученных результатов. Показан личный вклад автора в эти результаты. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Дано краткое описание структуры диссертации.

ПЕРВАЯ ГЛАВА диссертации содержит обзор по применению перспективного метода радионуклидной диагностики онкологических заболеваний с использованием иммунных антител и проведено сравнение характеристик диагностических изотопов, которыми возможно отмечать эти антитела. Показано, что изотоп  $^{89}\text{Zr}$  является наиболее оптимальным маркером для такой диагностической методики.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена обзору и сравнению существующих способов производства медицинских радиоизотопов. Рассматриваются методы наработки изотопов на ускорителях тяжелых заряженных частиц, в исследовательских ядерных реакторах, в радионуклидных генераторах, на ускорителях электронов и показано преимущество ускорителей электронов в силу их технологической и эксплуатационной простоты.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена проблематике фотоядерных реакций с испусканием заряженных частиц под действием тормозного излучения электронов на различных мишенях. Дан обзор литературных данных о фотоядерных реакциях с испусканием протонов и немногочисленных на сегодняшний день реакциях с вылетом  $\alpha$ -частиц. Обсуждается энергетическая зависимость сечений фотоядерных реакций от энергии  $E_\gamma$  тормозного излучения. В низкоэнергетической области ( $E_\gamma \sim 10\text{--}50$  МэВ) ядром поглощаются  $E1$ -фотоны (гигантский дипольный резонанс – ГДР). Образование ГДР описывается экситонной, а его распад – статистической моделями. Эти модели ориентированы на

описание фотонейтронных ( $\gamma, Xn$ ) реакций и предсказывают их экспериментальные выходы с высокой точностью. Автор подчеркивает, что в ( $\gamma, 1p$ )-реакциях экспериментальные выходы на порядки превышают значения, рассчитанные по этим моделям. Разработанная в НИИЯФ МГУ комбинированная модель фотонуклонных реакций учитывает кулоновский барьер при вылете протонов и изоспиновые эффекты в распаде ГДР. Она повышает точность расчетов сечений ( $\gamma, 1p$ )-реакций, но не позволяет получить полного согласия с экспериментом. В диссертации предлагается новый, разработанный автором и не требующий сложных расчетов, метод оценки выходов реакций ( $\gamma, 1p$ ) с использованием экспериментальных выходов реакций ( $\gamma, 1n$ ) и правил отбора по изоспину  $T$ . Учет  $T$ -расщепления состояний ГДР в тяжелых ядрах связывает значения  $T$  с каналами  $1p$ - и  $1n$  распада, определяет энергетический сдвиг ГДР в ( $\gamma, 1p$ )-реакции в сторону больших  $E_\gamma$  и величину максимума ее сечения.

В ГЛАВЕ 4 изложена экспериментальная методика определения средневзвешенных сечений и выходов активностей протонов и  $\alpha$ -частиц. Представлена схема проведенных экспериментов, аппаратное и программное обеспечение для записи и обработки измеренных спектров. В экспериментах облучались мишени из природной смеси изотопов молибдена, ниобия и циркония различных геометрий и масс тормозным излучением электронов с  $E_\gamma = 20$  МэВ (ускоритель Varian Trilogy), 40 МэВ (ускоритель ЛИНАК-200, ОИЯИ) и 55 МэВ (разрезной микротрон НИИЯФ МГУ). Спектры активности продуктов реакций ( $\gamma, 1pXn$ ) и ( $\gamma, 1\alpha Xn$ ) измерялись на полупроводниковых спектрометрах с детекторами из сверхчистого германия.  $^{89}\text{Zr}$  при таких энергиях тормозного излучения образуется в  $^{94,95}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha Xn)^{89}\text{Zr}$  и  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p2n)^{89m, g}\text{Nb} \rightarrow ^{89}\text{Zr}$  реакциях. Для нахождения средневзвешенных сечений реакций решались соответствующие системы дифференциальных уравнений, в которых учитывалась сложная динамика изменения числа изотопов  $^{89}\text{Zr}$ .

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ представлены полученные в диссертации экспериментальные сечения ( $\gamma, 1pXn$ ) и ( $\gamma, 1\alpha Xn$ ) реакций на изотопах молибдена, ниобия

и циркония и дан анализ их сравнения с расчетами по различным теоретическим моделям. В качестве таких моделей используются: статистическая модель (код TALYS1.96); комбинированная модель фотонуклонных реакций с модификацией плотности состояний изоспиновыми эффектами; метод преобразования средневзвешенных сечений  $\sigma(\gamma, 1n)$ -реакций в их аналоги для  $\sigma(\gamma, 1p)$ -реакций; разработанный в диссертации метод определения  $\sigma(\gamma, 1p)(E_\gamma)$  по данным  $\sigma(\gamma, 1n)(E_\gamma)$  с использованием правил отбора по изоспину. Показано, что наименьшее расхождение между экспериментальными и теоретическими сечениями в реакциях  $(\gamma, 1p)$  на изотопах молибдена получено при использовании разработанного автором метода преобразования интегральных  $\sigma(\gamma, 1n)$  в их аналоги  $\sigma(\gamma, 1p)$ . В реакциях  $(\gamma, 1pXn)$  и  $(\gamma, 1\alpha Xn)$  на изотопах молибдена при энергии 55 МэВ предсказания теоретических сечений в статистической модели противоречивы: для  $(\gamma, Xn)$ ,  $(\gamma, 1p)$ ,  $(\gamma, 1p2n)$  и  $(\gamma, 1\alpha)$  реакций на  $^{92}\text{Mo}$  они почти точны, для  $(\gamma, 1p1n)$  реакции – завышаются, а для  $(\gamma, 1\alpha1n)$  и  $(\gamma, 1\alpha2n)$  реакций – занижаются. Детально исследованы возможности получения  $^{89}\text{Zr}$  в реакциях  $^{94,95}\text{Mo}(\gamma, 1\alpha Xn)^{89}\text{Zr}$  и  $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p2n)^{89m, g}\text{Nb} \rightarrow ^{89}\text{Zr}$ , способных составить конкуренцию традиционным способам наработки  $^{89}\text{Zr}$ .

В ЗАКЛЮЧЕНИИ суммированы результаты, полученные в диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что как научная, так и практическая ее ценность достаточно высока. В ней впервые измерены выходы и сечения образования изотопа  $^{89}\text{Zr}$  и побочных радиоизотопов в реакциях  $(\gamma, 1pXn)$  и  $(\gamma, 1\alpha Xn)$  на мишенях природного молибдена, ниобия и циркония и на мишени, обогащённой по изотопу  $^{94}\text{Mo}$ . Проведено сравнение полученных экспериментальных сечений с теоретическими расчетами в рамках современных моделей ядра. Представлен разработанный автором новый метод оценки сечений фотоядерных реакций с вылетом заряженных частиц, опирающийся на изоспиновое расщепление гигантского резонанса поглощения фотонов. Достоверность научных результатов и выводов обеспечена использованием апробированных и общепринятых методик экспериментальных

исследований и теоретических моделей фотоядерных реакций и согласием результатов при повторных экспериментах. Автор принимал активное участие как в проведении и обработке результатов экспериментов, так и расчетах теоретических значений сечений реакций. Практическая ценность работы определяется разработкой прогнозных оценок наработки  $^{89}\text{Zr}$  в фотоядерных реакциях и подтверждается ее поддержкой грантом РФФИ.

Основные результаты, полученные в диссертации, апробированы в многочисленных докладах на Международных и Всероссийских конференциях. Доклад по теме диссертационной работы был признан лучшим секционным докладом на Всероссийском молодежном научном форуме OpenScience 2022. Результаты опубликованы в ведущих научных журналах. Публикации, также, как и автореферат, полно и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертация соответствует специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**, а именно ее направлению 2: «Ядерные реакции с различными налетающими частицами. Прямые реакции, предравновесные процессы, реакции многонуклонных передач, реакции с образованием составного ядра. Слияние ядер».

В качестве замечания необходимо отметить небрежность диссертанта в написании текста диссертации и реферата. В нем встречаются повторы, ненужные подробности, затрудняющие чтение и восприятие диссертации. Вместе с тем, указанное замечание не умаляет значимости диссертационного исследования.

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 естественным наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена 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 **Ремизов Павел Дмитриевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.**

Официальный оппонент:

профессор, доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник отдела ядерных реакций  
Научно-исследовательского института ядерной физики  
имени Д.В. Скобельцына Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»  
**Зеленская Наталья Семеновна**

9 января 2024 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:  
01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы 1(2), НИИЯФ МГУ  
тел.: 8(495)9393686; e-mail: [info@sinp.msu.ru](mailto:info@sinp.msu.ru)

Подпись Н.С. Зеленской удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета НИИЯФ МГУ

Е.А. Сигаева