

**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}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}Zr . Как правило, ^{89}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}Zr в фотоядерных реакциях с испусканием протонов и α -частиц, поскольку в этих реакциях можно применить химические методы для выделения различных радиоизотопов из материала мишени и получить ^{89}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}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 α -частиц. Обсуждается энергетическая зависимость сечений фотоядерных реакций от энергии E_γ 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 (γ, 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_γ и величину максимума ее сечения.

В ГЛАВЕ 4 изложена экспериментальная методика определения средневзвешенных сечений и выходов активностей протонов и α -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}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}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 (γ, Xn) , $(\gamma, 1p)$, $(\gamma, 1p2n)$ и $(\gamma, 1\alpha)$ реакций на ^{92}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}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}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}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}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}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

Подпись Н.С. Зеленской удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета НИИЯФ МГУ

Е.А. Сигаева