

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заместителя декана
Физического факультета СПбГУ

(должность)

(подпись)

А. В. Титов

(инициалы, фамилия)

« 28 » 03 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения диссертации Жеребчевского Владимира Иосифовича представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по теме **«Ядерные реакции при низких энергиях взаимодействия с образованием и распадом нуклонных систем легкого и среднего массового диапазона»** по научной специальности 1.3.15. «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» и выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра ядерно-физических методов исследования, год представления 2025, а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения, замечания и рекомендации:

Представленная работа является актуальной в силу больших перспектив применения результатов исследований ядерных реакций не только в области фундаментальной ядерной физике, ядерной астрофизике, но и для промышленного получения радионуклидов. Реализация в рамках данной работы экспериментов, нацеленных на получение информации о сечениях образования радионуклидов сурьмы, представляет интерес не только фундаментального, но и прикладного характера. С помощью проведенных в диссертационной работе исследований, стало возможным оценить вероятности образования всех продуктов реакции и определить выходы (активность образовавшихся в ходе облучения мишени радионуклидов) каждого из изучаемых радионуклидов. Обобщение этих результатов на широкий класс изотопов олова, используемых в качестве мишеней, открыло большие перспективы для анализа динамики протекания (p,n) и $(p,2n)$ реакций в среднем массовом диапазоне. Экспериментальные исследования максимумов функций возбуждения этих реакций, с помощью модернизированного мишенного комплекса, предоставили важную информацию для дальнейшего промышленного производства радионуклидов сурьмы, перспективных для их использования в новейших медицинских технологиях терапии и диагностики онкологических заболеваний.

Основной целью данной диссертационной работы являлось всестороннее исследование ядерных реакций в диапазоне энергий от единиц до нескольких

десятков МэВ, с образованием и распадом нуклонных систем легкого и среднего массового диапазона. Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Для интерпретации имеющихся экспериментальных результатов в области ядерных реакций низких энергий, предложить потенциал, который хорошо бы описывал: а) упругое рассеяние для малых энергий; б) сечение реакции слияния для малых энергий (астрофизический S-фактор); в) положение резонансно-подобной структуры для реакции: $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$.
2. Провести исследования процессов слияния, упругого рассеяния и образования молекулярных состояний в реакции горения углерода в звездах на примере ядерной реакции: $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$, и описать положение высоколежащей и низколежащей вращательных полос для резонансных состояний в этой реакции.
3. Провести исследования ядерных реакций с образованием нейтронно-избыточных нуклонных систем легкой группы масс: ^{14}C , ^{22}Ne .
4. Провести анализ ядерных реакций с образованием нуклонных систем в массовом диапазоне с $A < 30$ и исследования функций возбуждения ядерных реакций с вылетом нейтрона в конечном состоянии для массового диапазона с $A > 40$.
5. Провести исследования ядерных реакций с нуклонными системами средней группы масс с образованием в выходных каналах радионуклидов, которые используются в ядерной медицине.
6. Разработать и реализовать методику проведения экспериментов с высокообогащенными мишенями для изучения функций возбуждения ядерных реакций в широком диапазоне сталкивающихся частиц и ядер.
7. Провести эксперименты с облучением высокообогащенных мишеней изотопов олова: ^{117}Sn и ^{119}Sn с целью изучения функций возбуждения ядерных реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$, а также эксперименты по изучению максимумов функций возбуждения этих реакций.
8. Провести детальный анализ функций возбуждения ядерных реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ с использованием выбранных теоретических моделей.
9. Провести анализ функций возбуждения реакций (p,n), где в качестве мишеней фигурируют изотопы олова с массовыми числами: 115, 116, 118, 120, 122, с образованием радионуклидов сурьмы в выходных каналах.
10. Определить функции выхода из толстой мишени для (p,n) реакций с образованием радионуклидов ^{117}Sb и ^{119}Sb .

Автором диссертационного исследования были получены следующие **основные научные результаты**:

1. Показано, что при использовании современных ускорительных комплексов, систем диагностики пучков в режиме реального времени и разработанных электронных систем обработки сигналов с кремниевых детекторов можно эффективно изучать ядерные реакции с нейтронно-избыточными альфа-кластерными нестабильными мишенями, а также ядерные реакции с ионами с образованием и распадом составных ядерных систем легкой и средней группы масс.
2. Показано, что при исследовании ядерной реакции: $^{14}\text{C}(12\text{C},\alpha1\alpha2)\rightarrow^{26}\text{Mg}^*\rightarrow^{22}\text{Ne}^*\rightarrow^{18}\text{O}$ образуются высоковозбужденные состояния. С применением специального метода обработки детекторных сигналов по форме им-

пульса удалось идентифицировать энергетические полосы, принадлежащие протонам, дейтронам, тритонам, альфа-частицам и легким ядрам: ${}^6,7\text{Li}$, ${}^9,10\text{Be}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{12,14}\text{C}$, зарегистрировать экзотические нейтронно-избыточные ядра ${}^6\text{He}$ и обнаружить следующий канал реакции: ${}^{14}\text{C}({}^{12}\text{C}, {}^6\text{He}){}^{20}\text{Ne}^*$, а также обнаружить ряд высокоспиновых состояний в ядре ${}^{22}\text{Ne}$. Анализ характеристик этих состояний, позволил отождествить их с вращательными полосами с различной структурой, которые могут соответствовать ядерным молекулам.

3. В исследуемой реакции ${}^{14}\text{C}({}^{12}\text{C}, \alpha 1\alpha 2) \rightarrow {}^{26}\text{Mg}^* \rightarrow {}^{22}\text{Ne}^* \rightarrow {}^{18}\text{O}$ (энергия пучка $12\text{C} - 44 \text{ МэВ}$) в области энергий возбуждения от 16 до 30 МэВ было обнаружено пять высокоспиновых состояний в ядре ${}^{22}\text{Ne}$. Эти состояния были отнесены к вращательным полосам различной структуры, которые могут соответствовать ядерным молекулам.

4. Применение специального потенциала, позволило описать угловое распределение продуктов реакции ${}^{12}\text{C}+{}^{16}\text{O}$ в широкой энергетической области, включающей состояния, которые могут быть отнесены к вращательным полосам (молекулярные конфигурации). Также было показано, что для значительной области энергий возбуждения составного ядра, ожидается определённое число резонансов.

5. В диссертационной работе были проанализированы соответствующие угловые распределения реакции ${}^{12}\text{C}+{}^{16}\text{O}$, и проведено сравнение их с полиномами Лежандра различных порядков. Было обнаружено, что при совпадении резонанса с малым угловым моментом и приведенной шириной с областью, демонстрирующей полиномиальную структуру под большими углами, может возникнуть ошибочная картина, подобная присутствию высокоспинового резонанса. Такие состояния могут быть ошибочно идентифицированы как резонансы («ложные резонансы»), принадлежащие вращательной полосе. Также в указанной реакции было определено положение возможных резонансов в оптическом потенциале.

6. В ходе анализа процессов слияния ядер, играющих важную роль в астрофизических процессах (особенно реакции слияния ядер с энергиями вблизи кулоновского барьера), были проведены соответствующие расчеты как астрофизического S-фактора, так и сечения реакции с использованием потенциалов, полученных для описания ядерных реакций легкого массового диапазона. Результаты расчетов показали, что оба потенциала хорошо описывают экспериментальные данные в диапазоне энергий до 20 МэВ. Отмечается, что такое поведение сохраняется вплоть до минимальных значений сечений вблизи «Гамовского окна».

7. Был использован метод анализа астрофизического S-фактора на основе формализма прямоугольной потенциальной ямы. К преимуществам данного метода следует отнести малое число параметров: радиус взаимодействия, действительную часть потенциала – описывает притяжение или отталкивание и мнимую часть потенциала – характеризует насколько интенсивно идет слияние (fusion) ядер, а также простоту расчетов с минимизацией вычислительных ресурсов. С помощью такой модели появилась возможность изучать явление, связанное с уменьшением S-фактора в реакциях звездного нуклеосинтеза – эффект подавления сечения при малых энергиях, и проводить сравнения с расчетами на основе оптических потенциалов. Предложенный метод дал возможность провести сравнительный анализ интенсивности протекающих процессов в разных взаимодействующих системах. Важный результат состоит в том, что разброс нормированного сечения в текущих расчетах

оказался в пределах одного порядка. Сравнение с экспериментальными данными показали, что имеет место хорошее совпадение результатов теоретических расчетов, полученных с помощью данной модели. Таким образом, удаётся не только предсказывать и определять сечения слияния для малых энергий, но и лучше понимать механизм протекающих ядерных реакций для случая легких ядер, представляющих астрофизический интерес.

8. Проведены теоретические исследования функций возбуждения ядерных реакций (p,n) типа для среднего и тяжелого массового диапазона: от $A = 40$ до $A = 239$, создана соответствующая систематика и выбраны оптимальные параметры моделирования для всех рассмотренных участков функции возбуждения, что позволило подтвердить механизмы этих ядерных процессов.

9. Было проанализировано 120 экспериментальных функций возбуждения ядерных реакций, в энергетическом диапазоне от порога реакции и до 60 МэВ, в массовом диапазоне от $A = 40$ до $A = 60$, а также проведен сравнительный анализ с расчетами сечений на основе разработанной систематики. Этот анализ показал хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными. Было установлено, что наибольшие отклонения для предложенной систематики наблюдаются в области малых энергий. В ряде случаев, обнаружены расхождения с систематикой для области энергий расположенной ниже кулоновского барьера. Для некоторых ядерных реакций в областях близких к их порогу, при анализе экспериментальной информации был зафиксирован систематический сдвиг по энергии. Это приводит к появлению отличных от нуля значений сечений, лежащих на графике функции возбуждения ниже энергии порога реакции, что указывает на возможные ошибки в экспериментальных данных, а также на погрешности в процедуре сканирования экспериментальных результатов. С другой стороны, стоит отметить, что систематика показывает хорошее соответствие в областях, связанных с ядерными процессами предравновесной эмиссии. Основным результатом данных исследований сводится к тому, что такой подход может быть использован для количественной оценки процессов образования конкретных радионуклидов в выходных каналах в реакциях с различными мишенями, так как полученная систематика позволяет хорошо описать зависимость сечения (p,n) реакции от энергии налетающего протона. Полученные расхождения результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными для реакций на изотопах олова, а также нуклидах: ^{85}Rb , ^{94}Sr , ^{130}Te , ^{150}Nd и в особенности в области максимума функции возбуждения, дают весомый аргумент для проведения дополнительных экспериментальных исследований ядерных реакций с указанными изотопами.

10. Был проведен детальный анализ функций возбуждения ядерных реакций для получения радионуклидов: ^{44}Sc , ^{119}Sb , ^{117}Sb , ^{161}Tb , и радионуклидных генераторов: $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$, $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. Результаты этих расчетов можно использовать в прикладных работах по производству $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ на циклотронах средних энергий: от 40 до 80 МэВ даже в условиях ограниченного набора экспериментальных данных в указанной области энергий.

11. Для проведения исследований ядерных реакций и для решения задач, связанных с производством радионуклидов, был модернизирован мишенный комплекс. Для работы с многокомпонентными, многослойными и толстыми мишенями, использовалась система газового и жидкостного охлаждения. Была создана новая си-

стема мониторинга нагрева мишеней и выбраны оптимальные параметры системы охлаждения мишеней.

12. Выполнены эксперименты с мишенями: Ag, Cd, Cu, Fe, Ti, нержавеющей стали, ^{nat}Sn . Обработка и всесторонний анализ результатов экспериментов для выбора окончательной методики проведения экспериментов с многослойными и толстыми мишенями и, главное, с высокообогащенными мишенями олова.

13. Проведены эксперименты с облучением высокообогащенных (более 85%) оловянных мишеней: ^{117}Sn и ^{119}Sn с целью изучения функций возбуждения ядерных реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$.

14. Выбраны теоретические модели для анализа функций возбуждения ядерных реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$.

15. Обработаны данные экспериментов по изучению функций возбуждения ядерных реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$.

16. Проведен анализ реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ с использованием предложенных теоретических моделей

17. Выполнены эксперименты по детальному исследованию максимумов функций возбуждения ядерных реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$. Систематизированы полученные данные.

18. Проведен анализ функций возбуждения реакций (p,n) с изотопами олова, с массовыми числами: 115, 116, 118, 120, 122 с образованием радионуклидов сурьмы в выходных каналах.

19. На основании полученных экспериментальных данных для функций возбуждения реакций: $^{117}\text{Sn}(p,n)^{117}\text{Sb}$ и $^{119}\text{Sn}(p,n)^{119}\text{Sb}$ были сделаны оценки выходов радионуклидов сурьмы (для прикладных работ с целью их производства на ускорителях протонов) из толстой мишени. Было показано, что за 6 часов облучения оловянной мишени пучком протонов током всего в 10 мкА и энергией 15 МэВ можно наработать радионуклиды ^{119}Sb и ^{117}Sb с активностями около 8 ГБк и 120 ГБк, соответственно. Это дает прекрасную возможность для использования полученных функций выхода при планировании производства радионуклидов ^{117}Sb в реакциях с протонами с энергиями больше 15 МэВ, то есть в энергетических областях, где экспериментальные данные на сегодняшний день отсутствуют.

Научная и практическая значимость данной работы заключается в следующем. Полученные результаты исследований процессов слияния, упругого рассеяния, образования резонансных состояний в ядерных системах, образующихся при взаимодействии частиц и ядер лёгкого массового диапазона, а также результаты исследований ядерных реакций с образованием нейтронно-избыточных нуклонных систем позволят ответить в «земных» лабораториях на вопросы о разных сценариях звездной эволюции и особенностей нуклеосинтеза во Вселенной. Это поможет сократить расходы на дорогостоящие проекты, связанные с космическими станциями и космическими обсерваториями в околоземном и межпланетном пространстве, поскольку ответы на затронутые вопросы будут искать в экспериментах на Земле.

В представленной диссертационной работе также была получена информация о функциях возбуждения ядерных реакций с образованием радионуклидов, принадлежащих среднему массовому диапазону. В данном случае важным прикладным фак-

тором, стало использование модернизированного мишенного комплекса. Данное мишенное устройство было специально сконструировано для выбора оптимальных режимов облучения различных твердотельных мишеней и может использоваться не только для проведения фундаментальных исследований ядерных реакций на пучках протонов, дейтронов и альфа-частиц, но и для решения прикладных задач по производству радионуклидов, применяемых в промышленности и медицине. В ходе проведенных экспериментальных работ было показано, что такой мишенный комплекс может быть использован на многих малогабаритных циклотронах, специализирующихся на производстве радионуклидов.

Возвращаясь к проблемам исследований функций возбуждения ядерных реакций можно констатировать, что экспериментальных данных по сечениям ряда реакций для производства важных для ядерной медицины радионуклидов, либо недостаточно (особенно в области энергий налетающих протонов от 10 до 20 МэВ), либо они отсутствуют вообще. Таким образом, полученные в работе новые данные можно будет с успехом применить для разработке технологий по производству радионуклидов, используемых в новейших методах радионуклидной диагностики и терапии онкологических заболеваний. Проанализировав результаты экспериментальных и теоретических исследований функций возбуждения реакций (p, xn) в диапазоне энергий 6–80 МэВ для ядерных систем средней группы масс, с образованием радионуклидов: скандия, технеция, сурьмы, тербия, были созданы предпосылки для их промышленного получения с последующим использованием в методах прецизионной визуализации злокачественных новообразований, направленной радионуклидной терапии и комбинированных методов лечения рака – тераностике.

Важное прикладное значение имеют расчеты, сделанные в диссертационной работе для выходов целевого радионуклида из толстой мишени в ядерных реакциях на ускорителе, когда образуется активно применяемый в мировой клинической практике реакторный радионуклид ^{99m}Tc (а также его генераторная форма – $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$). Аналогичные расчеты по выходам из толстой мишени были сделаны и для перспективных для использования в методах тераностики радионуклидов: ^{117}Sb , ^{119}Sb . Эти данные позволили сделать оценки наработанной активности, и сделать выводы о целесообразности производства ^{99m}Tc на ускорителях протонов с энергиями от 40 до 80 МэВ, а радионуклидов сурьмы на малогабаритных циклотронах с энергиями от 7 до 15 МэВ. Таким образом, становится возможным обеспечить потребности медицинских учреждений в радиофармпрепаратах, которые содержат указанные радиоактивные изотопы.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях и апробация работы. По материалам диссертации опубликованы 20 статей в ведущих международных рецензируемых физических журналах, входящих в перечень ВАК и базы данных РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все положения, выносимые на защиту, нашли отражение в публикациях. Результаты работы были доложены на 15 международных конференциях.

Заключение

Диссертационное исследование Жеребчевского Владимира Иосифовича «Ядерные реакции при низких энергиях взаимодействия с образованием и распадом

нуклонных систем легкого и среднего массового диапазона» соответствует паспорту по научной специальности 1.3.15. «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Нарушения со стороны Жеребчевского Владимира Иосифовича п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. №11181/1 не выявлены и Приказа СПбГУ от 03.07.2023 № 9287/1 не выявлены.

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертацию опубликованы в предложенных соискателем статьях.

Коллектив сотрудников кафедры ядерно-физических методов исследования СПбГУ рекомендовал диссертацию Жеребчевского Владимира Иосифовича по теме «Ядерные реакции при низких энергиях взаимодействия с образованием и распадом нуклонных систем легкого и среднего массового диапазона» к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.15. «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

При проведении голосования коллектива сотрудников подразделения (протокол заседания №44/12/8-02-3 от 27.03.2025) в количестве 26 человек, участвовавших в заседании из 36 человек штатного состава:

Проголосовали «за»: 26,
«против»: 0,
«воздержались»: 0.

Профессор с возложением
обязанностей и.о. заместителя
заведующего кафедрой

(должность)
Физический факультет СПбГУ
(наименование структурного подразделения)
доктор физ.-мат. наук
(ученая степень)
доцент
(ученое звание)



М. Г. Шеляпина

(подпись)

28.03.2025

Расшифровка подписи, дата



Личную подпись
М.Г. Шеляпина
заверяю
И.О. начальника отдела кадров №3
М.М. Константинова
28.03.2025