


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 Торилова Сергея Юрьевича представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по теме «Кластерные степени свободы в ядрах» 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 по причине значительного интереса к описанию кластерных состояний, обусловленного поиском новых обобщенных методов описания свойств атомных ядер. Актуальность также подтверждается большим количеством международных конференций и ежегодных обзоров, посвященных рассматриваемой в работе теме. Интерес к данной теме растет с каждым годом, что можно видеть, в том числе, и из роста ссылок на работу Икеды, являющуюся основополагающей в данном вопросе. Вместе с тем, следует отметить, что большинство таких работ имеют теоретический характер и они связаны с переосмыслением ранее полученных результатов, в том числе и для более простых вариантов кластерного приближения. Таким образом, наблюдается существенный дефицит именно экспериментальных данных, которые могли бы подтвердить (или опровергнуть) предсказания существующих на сегодняшний день моделей, получению и исследованию которых и посвящена данная работа.

Одним из факторов, определяющих значительный интерес к новым экспериментальным данным в этой области является, в том числе, возможность перехода от описания конечных ядер, изучаемых в лаборатории, к описанию таких объектов, как нейтронные звезды. Это, в свою очередь, требует изучения возможных корреляций в нейтронных системах, для их адекватного учета в уравнении состояния ядерной материи. Однако на сегодняшний день вопрос о корреляциях до конца не

решен. Недавние эксперименты в этой области фактически повторили результат настоящей работы.

Другим примером являются достижения в рамках AMD-подхода. В последних обзорах, посвященных проблемам кластеров в легких ядрах предполагается схема дополнения AMD методами квантовой хромодинамики и искусственного интеллекта для разрешения имеющихся проблем. Причем, стоит отметить, что обзоры посвящены именно экспериментальным работам в этой области. Примерами проблем (в том числе и решаемых в данной работе) являются: неоднозначность определения угловых моментов состояний, трудности изучения высокоспиновых состояний в легких ядрах, сложности работы при низких энергиях. Как видно, перечисленные проблемы отсылают нас именно к проблемам экспериментального исследования.

К тому же, возможность исследования свойств (в том числе и кластерных) ядер, находящихся вблизи границы стабильности, была получена сравнительно недавно, так что любой новый экспериментальный результат в этой области может быть полезен как для развития теоретических подходов, так и для планирования новых экспериментов.

Основной целью работы являлось экспериментальное изучение кластерных степеней свободы в самосопряженных и нейтроноизбыточных ядрах. В том числе:

1. Описание полученных экспериментальных результатов в рамках кластерной модели для получения необходимой систематики.
2. Экспериментальное изучение вращательных полос кластерной природы в ядрах. Анализ высокоспиновых состояний в ядрах легкой и средней групп масс, обнаруженных в наших экспериментах.
3. Экспериментальное изучение нейтроноизбыточных изотопов вблизи границы нейтронной стабильности, изучение влияния нейтронного избытка на кластеризацию в ядрах.
4. Рассмотрение возможных экзотических состояний, обусловленных кластеризацией.
5. Экспериментальное изучение эмиссии тяжелых кластеров бериллия и углерода.
6. Исследование влияния передачи кластера в реакциях с тяжелыми ионами.
7. Получение систематики для описания в рамках двухчастичной модели низкоэнергетического взаимодействия тяжелых ионов, важных с точки зрения астрофизики.

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

1. Изучены состояния в нейтроноизбыточных ядрах бериллия, углерода, неона, магния. Полученные результаты позволили обнаружить ряд новых состояний с кластерной структурой, а также высокоспиновые состояния, принадлежащие вращательным полосам.
2. Для изотопов гелия было получено распределение моментов в реакциях выбивания кластеров. Сделаны выводы о возможной конфигурации валентных нейтронов и возможности образования экзотических нейтронных кластеров.
3. Рассмотрен случай вылета из ядра альфа-частичных кластеров - $^{12}\text{C}^*$ и ^8Be . Обнаружено понижение энергии, уносимой из ядра в этом случае, что позволило, в

дальнейшем, сделать вывод о возможной конденсации Бозе-Эйнштейна данных ядер.

4. Проведена систематика реакций, важных с точки зрения астрофизики в рамках потенциальной модели. Получено удовлетворительное описание функции возбуждения для реакций слияния в случае одного свободного параметра.

5. Рассмотрены реакции упругого и неупругого рассеяния тяжелых ионов - углерода, кислорода, бора, азота и неона. Показана важность учета резонансных состояний и передачи кластера.

6. Получена систематика для предсказаний кластерной модели, допускающая простые оценки для ядер в экзотических состояниях.

7. Получена систематика в рамках потенциальной модели для вращательных полос.

Научная и практическая значимость данной работы заключается в том, что отличительной чертой данной темы является возможность применения получаемых результатов в самых различных областях исследования атомного ядра и элементарных частиц. Это, в свою очередь, определяет значимость, как с практической, так и теоретической точки зрения результатов выполненных работ. Перечислим основные моменты.

В работе проводилось исследование кластерных свойств ядер с применением метода обратной геометрии. Данный метод в настоящее время бурно развивается, поскольку дает возможность изучать ядерную экзотику вблизи и даже за границей стабильности. Таким образом, результаты работы с подобными системами очень полезны для научных групп, занимающихся экспериментальным исследованием свойств ядер. В частности, развитые в наших работах методы позволяют значительно упростить изучение реакций для малых энергий, вплотную подходя к энергиям, типичным для звездного нуклеосинтеза. Такие работы очень важны с точки зрения современной астрофизики. К тому же, оценка полученных сечений для слияния ионов в области малых энергий позволят нам лучше понять механизмы реакций, протекающих в звездах.

В нашей работе по изучению нейтроноизбыточных ядер для идентификации продуктов распада был применен новый метод регистрации по времени сбора заряда. Отличительной особенностью данного метода является нетребовательность к параметрам детектора, что позволяет существенно удешевить работы. Разделение вылетающих частиц осуществляется без применения dE части, что позволяет избежать применения дорогого тонкого детектора или газовой системы, неблагоприятно влияющей на вакуум. Была показана возможность разделения ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^6\text{He}$.

К практической пользе можно также отнести развиваемые нами методы анализа сечения слияния ядер в области малых энергий. Небольшое число свободных параметров и отсутствие необходимости решать уравнение Шредингера позволяют работать сразу с большим количеством экспериментальных данных. Это позволяет находить универсальные закономерности, важные для экстраполяции значений сечения в область малых энергий.

Полученные в работе экспериментальные результаты представляют интерес для работы международных научных групп. Они включены в базы данных и полу-

чили независимую проверку. Используемые теоретические подходы позволяют просто и быстро оценивать эффект в первом приближении. Несмотря на использование в данной работе малых энергий, результаты настоящих работ, как указывалось выше, могут быть использованы в современных установках по изучению поведения сверхплотной ядерной материи при столкновении тяжелых ионов.

Достоверность полученных результатов обусловлена их воспроизводимостью в экспериментах, выполненных в других научных группах, а также согласием с теоретическими расчетами, выполненными другими авторами на основании информации, изложенной в статьях с материалами данной диссертации.

Основные результаты данной работы были получены впервые. Ряд результатов был позднее использован различными международными исследовательскими группами.

Материалы диссертации являются обобщением работ автора по теме исследования. Представленные в диссертации результаты получены автором лично, либо в соавторстве при непосредственном участии. Автор внес значительный вклад как в постановку решаемых в работе задач, так и в проведении экспериментов, выполнение обработки и анализа полученных экспериментальных данных и подготовку результатов исследований для публикации в научных изданиях.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях и апробация работы. По материалам диссертации опубликованы 32 статьи 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 17 всероссийских и международных конференциях.

Заключение

Диссертационное исследование Торилова Сергея Юрьевича «**Кластерные степени свободы в ядрах**» 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 Торилова Сергея Юрьевича
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 Торилова Сергея Юрьевича по теме «Кластерные степени свободы в ядрах» 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)

(подпись)

М. Г. Шеляпина

28.03.2025

Расшифровка подписи, дата



28.03.2025

