

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Узикова Юрия Николаевича
о диссертации Соловьева Александра Сергеевича
«Микроскопическое описание процесса радиационного захвата
в ядерных кластерных системах»,
представленной на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Знание сечений ряда ядерных реакций при низких, так называемых астрофизических энергиях, принципиально важно для понимания как первичного (дозведного) нуклеосинтеза, так и ядерных процессов, протекающих в звездах и определяющих их эволюцию, – и то, и другое необходимо для объяснения распространенности химических элементов во Вселенной. Исследование соответствующих реакций проводится во многих мировых ядерных центрах как экспериментально, так и теоретически. Все интересующие реакции проходят значительно ниже кулоновского барьера, поэтому их сечения очень малы, а задача прямого экспериментального измерения сечений взаимодействия является исключительно сложной. Поэтому в ядерной астрофизике важную роль играют теоретические методы расчета сечений ядерных реакций в той области энергий, в которой надежные экспериментальные данные отсутствуют. В идеале это должны быть расчеты из первых принципов (*ab initio calculations*), в которых используются современные ядерные потенциалы и применяются точные методы решения задачи для системы A нуклонов. Такие расчеты стали появляться в самое последнее время, но это пока еще единичные работы, требующие дополнительного исследования

и независимого подтверждения. Поэтому расчеты в рамках других солидных микроскопических методов, несомненно, имеют важное значение. Одним из таких методов является классический (численный) метод резонирующих групп (МРГ), который в общем случае сводится к решению зацепляющихся интегродифференциальных уравнений, а также его элегантный аналитический аналог – алгебраическая версия МРГ (АВМРГ). На основе АВМРГ в диссертации решается задача вычисления астрофизических S-факторов реакции радиационного захвата ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ и ее зеркального партнера – реакции ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$. Важная роль первой из этих реакций обусловлена тем, что она является стартовой для двух цепочек протон-протонного цикла горения водорода в звездах, приводящих к образованию высокоэнергичных “бериллиевых” и “борных” нейтрино, потоки которых можно довольно точно измерить и тем самым проверить солнечные модели. Кроме того, обе эти реакции являются ключевыми для решения известной проблемы первичного нуклеосинтеза – распространенность ядра ${}^7\text{Li}$ во Вселенной. Следует также добавить, что в экспериментальных данных по этим реакциям обнаружилось существенные расхождения между старыми (начиная с 1959 г.) и новыми (после 2004 г.) данными, что стимулирует дальнейшие исследования. Таким образом, высокая актуальность и значимость проведенного исследования не вызывают сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы, который содержит 161 наименование.

Во **введении** на основе обзора литературы сформулированы проблемы, цель и основные задачи диссертации, обоснована их актуальность.

В **первой главе** вводится известный в литературе математический формализм одноканального АВМРГ применительно к двухкластерным

системам. На основе разложения по полному набору осцилляторных волновых функций трансляционно-инвариантной модели оболочек строятся системы линейных алгебраических уравнений, определяющие коэффициенты разложения волновой функции системы по осцилляторному базису для дискретного и непрерывного спектров. Для вычисления матричных элементов гамильтониана, являющихся коэффициентами систем уравнений АВМРГ, используется красивая техника производящих функций и методика вычисления производящих матричных элементов трансляционно-инвариантных операторов, представимых в виде суммы одно- и двухчастичных операторов. В целом, этот формализм был предложен и развит основателями АВМРГ – Г.Ф. Филипповым и сотрудниками. Важный вклад в обоснование метода и его дальнейшее развитие был сделан, в частности, в работах сотрудников НИИЯФ МГУ и соискатель А.С. Соловьев существенным образом использует эти результаты и развивает их применительно к реакциям радиационного захвата.

Вторая глава, очень небольшая по объему, носит справочный характер – в ней приведены известные выражения для электрических и магнитных мультипольных операторов системы из A нуклонов и связь матричных элементов соответствующих операторов с сечением бинарной реакции радиационного захвата.

Третья глава является центральной главой диссертации. В этой главе развита методика вычисления матричных элементов операторов электромагнитных мультипольных переходов в базисе волновых функций АВМРГ. Разработан детальный формализм для расчета $E1$, $E2$ и $M1$ переходов в системе семи нуклонов. Данный формализм является дальнейшим развитием АВМРГ, позволяющим практически применить ее к расчету реакций радиационного захвата. На основе этого формализма в диссертации в одноканальном приближении выполнены расчеты астрофизических S -факторов

реакции ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ для переходов на основное и первое возбужденное состояния ядра ${}^7\text{Be}$. Одновременно вычислены фазовые сдвиги рассеяния ${}^3\text{He} - {}^4\text{He}$ в состояниях $1/2^+$, $3/2^+$, $5/2^+$ при энергиях 0–10 МэВ, а также нижайшие уровни энергии ядер-участников рассматриваемого процесса. Проведено сравнение с экспериментальными данными и результатами других микроскопических методов, включая единственный известный в настоящее время *ab initio* расчет этой реакции (T. Neff, Phys. Rev. Lett. 106, 042502 (2011)). Автору удалось добиться наилучшего согласия с данными по астрофизическим S-факторам путем небольшого варьирования двух параметров модели – интенсивности майорановских центральных обменных сил и осцилляторного радиуса используемых осцилляторных волновых функций. Внутренние волновые функции кластеров в приближении “замороженных” состояний выбраны в виде волновых функций трансляционно-инвариантной осцилляторной модели оболочек, соответствующих минимально допустимому принципом Паули числу осцилляторных квантов.

Развитый формализм модифицируется должным образом в **четвертой главе** для расчета зеркальной реакции ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$. Проводятся численные расчеты характеристик, аналогичных тем, что исследованы в предыдущей главе и также проводится детальное сравнение с имеющимися экспериментальными данными и результатами других микроскопических расчетов. Для этой реакции также получено наилучшее согласие с экспериментальными данными.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и дана авторская оценка их значимости.

Достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации, обусловлена логической стройностью используемого метода и развитого в диссертации нового формализма,

согласием полученных результатов для всей совокупности рассмотренных характеристик с результатами экспериментов. Развитый формализм расчета матричных элементов операторов электромагнитных мультипольных переходов в базисе АВМРГ и полученные на его основе численные результаты для энергетической зависимости астрофизических S-факторов рассмотренных реакций являются новыми.

Практическая значимость работы заключается в том, что в работе показана высокая эффективность используемого метода применительно к реакциям радиационного захвата в приближении “замороженных” состояний кластеров, а развитый формализм может быть естественным образом обобщен на другие кластерные системы как с большим, так и меньшим числом нуклонов. Кроме того, результаты работы могут быть использованы в расчетах кинетики астрофизических и других процессов.

Можно отметить некоторые недостатки диссертационной работы. В работе используется эффективный парный нуклон-нуклонный модифицированный потенциал Хазегавы–Нагаты, подчеркивается со ссылкой на литературу, что этот потенциал в сочетании с микроскопическими методами позволяет довольно хорошо описывать характеристики ряда ядерных реакций в малонуклонных системах, но не обсуждается вопрос о том, как связан этот потенциал со свойствами свободной двухнуклонной системы, какова роль трехчастичных и многочастичных сил. В этой связи уместно было бы отразить в обзорной части диссертации основные идеи и результаты быстро развивающейся современной киральной теории нуклонных сил, позволяющей систематическим образом учитывать многочастичные силы. Вторым недостатком – отсутствует критический сравнительный анализ с результатами АВМРГ расчета, проведенного ранее в работе Л. Чоповского (Phys. Lett. B 229, 316 (1989)) при единственном нулевом значении энергии, хотя ссылка на эту работу

в диссертации приведена. Наконец, упрощающим приближением в расчетах является кластерная модель для волновой функции ядра, с другой стороны, в имеющихся других микроскопических расчетах учитывается поляризация кластеров на расширенном базисе функций и показывается, что ее учет существенен для описания свойств связанных состояний и фаз рассеяния. В этой связи было бы полезно обсудить возможность соответствующего расширения базиса АВМРГ.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные результаты диссертации.

Заключение. Диссертация Соловьева А.С. является законченным научным трудом, выполненным на высоком теоретическом уровне. В работе, в целом, сделаны четкие и обоснованные выводы. Полученные автором результаты достоверны и являются научно значимыми, так как раскрывают возможности АВМРГ в описании реакций радиационного захвата, что позволяет квалифицировать их как новые. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

По материалам диссертации опубликовано девять работ, три из которых – в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ рецензируемых научных журналов и изданий. Результаты диссертации были доложены на нескольких российских и крупных международных научных конференциях.

Диссертационная работа Соловьева Александра Сергеевича «Микроскопическое описание процесса радиационного захвата в ядерных кластерных системах» соответствует специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц» и отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке

присуждения ученых степеней», а ее автор Соловьев А.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Ведущий научный сотрудник ЛЯП ОИЯИ,
доктор физико-математических наук, доцент

Ю.Н. Узиков

16 февраля 2015 г.

Адрес: 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6,
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Лаборатория ядерных
проблем им. В.П. Джелепова (ЛЯП).

Телефон: +7 (496 21) 6-24-17.

E-mail: uzikov@jinr.ru.

Подпись Ю.Н. Узикова заверяю:

Заместитель директора ЛЯП ОИЯИ

по научной работе,

доктор физико-математических наук



В.В. Глаголев