

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Узикова Ю.Н., на диссертацию **Родкина Дмитрия Михайловича** на тему "Теоретическое описание кластеризованных состояний легких ядер в рамках современных микроскопических моделей" на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, представленной в диссертационный совет Д 720.001.01 на базе Объединенного Института Ядерных Исследований (Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова)

Описание свойств атомных ядер и характеристик ядерных реакций, исходя из фундаментальных (ab initio) принципов квантовой теории, является в настоящее время основной стратегией в теории атомного ядра. Эта тенденция обусловлена быстрым развитием суперкомпьютерных вычислительных систем. При этом, с одной стороны, достигнут существенный прогресс в развитии теории нуклонных взаимодействий, основанной на принципах фундаментальной теории – квантовой хромодинамики, с другой стороны — развиваются ab initio методы численного решения задачи А-нуклонов с реалистическими нуклонными потенциалами как для связанных состояний, так и непрерывного спектра. Наиболее известным в настоящее время ab initio подходом в теории ядер и ядерных реакций является модель оболочек без ядерного кора (NCSM), а также ее модифицированные версии, позволяющие воспроизводить свойства большого числа атомных ядер с массовым числом до $A=16$ и отдельных тяжелых ядер вблизи заполненных оболочек. Кластерные явления в структуре легких ядер и ядерных реакций занимают особое место и, как видно из анализа литературы, требуют разработки специальных методов для их адекватного теоретического описания. Разработке ab initio подхода к описанию кластерных явлений в духе NCSM метода посвящена рассматриваемая диссертация. **Актуальность** и значимость темы данной диссертационной работы очевидна.

Научная и практическая ценность проведенных автором диссертации исследований не вызывает сомнений. В диссертации подробно представлено завершённое научное исследование, содержащее важные результаты для теории кластерных явлений в атомных ядрах. Разработанный в диссертации новый метод микроскопических расчетов кластерных явлений достаточно хорошо описывает экспериментальные данные о характеристиках кластерных ядер с $A=5-9$ и может быть использован в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях кластерных свойств ядер, в частности, короткодействующих двух- и трех-нуклонных корреляций в ядрах, проводимых в ОИЯИ на VM@N (Дубна), а также в НИИЯФ МГУ (Москва), ИЯИ РАН (Москва), других российских и зарубежных научных центрах. Разработанный метод использует специфический базис ортонормированных волновых функций, обеспечивающий высокую эффективность численного алгоритма. Существенно, что этот метод, с одной стороны, дает возможность проводить вычисления с волновыми функциями размерности до 10^6 на обычных персональных компьютерах, а, с другой стороны, легко адаптируется для проведения масштабных расчетов с волновыми функциями размерности порядка 10^9 на современных суперкомпьютерах.

Новизна и значимость результатов диссертации очевидна. Действительно, в диссертации разработан новый метод расчета кластерных характеристик и показано на конкретных примерах применения этого метода, что характеристики ядер, трактуемых в научной литературе как явно кластеризованные, в значительной мере определяются некластерными компонентами волновой функции ядра, ортогональными его кластерной компоненте. Кроме того, в диссертации обоснован и разработан новый подход к *ab initio* расчетам кластерных асимптотических нормировочных коэффициентов, что важно в ядерной астрофизике.

Обоснованность полученных результатов обусловлена тем, что в основу программы исследований положены современные апробированные методы *ab initio* расчетов, а также современные потенциалы взаимодействия между нуклонами. В диссертации разработан новый эффективный метод расчета с ортонормированным базисом кластерно-оболочечных волновых функций. Ортонормированность базиса обеспечивает контроль точности проводимых вычислений, результаты которых согласуются с экспериментом и результатами других расчетов, поэтому **достоверность** полученных автором результатов не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из Введения, трех Глав, Заключения и списка литературы. Во **Введении** обсуждается современное состояние теории *ab initio* расчетов в теории ядра и ядерных реакций, исходя из которого формулируются задачи исследования и кратко характеризуется предлагаемый метод их решения. Здесь также формулируется новизна исследования и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В **первой Главе**, в ее первом параграфе дается краткое, но достаточно четкое описание сути NCSM метода численных *ab initio* расчетов свойств системы из A нуклонов (P. Navratil et al. 2000-2009г.), его достоинства и недостатки, и более поздние модификации этого подхода — SU(3)-No-Core Shell Model, Importance Truncation - No-Core Shell-Model (IT-NCSM), No-Core Monte-Carlo Shell Model, нацеленные на решение определенных классов задач. Будучи формально точными, все методы имеют ограниченные области применимости на практике. Во втором параграфе этой главы обсуждаются современные феноменологические нуклон-нуклонные потенциалы, методы построения NN-потенциалов на основе обратной задачи рассеяния, а также нуклонные взаимодействия, развиваемые в киральной теории возмущений, основанной на свойстве спонтанного нарушения киральной симметрии квантовой хромодинамики. Основное содержание второй главы составляет подробное описание развиваемого в диссертации нового метода, названного методом ортогональных функций кластерных каналов. Разработанный в диссертации метод имеет много общего с развитым ранее NCSM методом (P. Navratil et al.), сочетающим подходы метода резонирующих групп и NCSM метода, но отличается от него техникой преобразования кластерных волновых функций к «оболочечному» виду — разложению по детерминантам Слэтера. В диссертации используется техника так называемых кластерных коэффициентов, развиваемая в течение ряда лет научным руководителем диссертанта, Ю.М. Чувильским с соавторами, и позволяющая в отличие от NCSM метода работать с широким спектром возбужденных кластеров, в том числе сравнительно тяжелых. Особое внимание уделяется процедуре построения ортонормированного базиса, включающего в себя как кластерные, так и поляризационные члены, что является

центральным, ключевым элементом нового метода. Построенный в диссертации итоговый базис является линейной комбинацией детерминантов Слэтера, составленных из функций гармонического осциллятора, что существенно упрощает все выполняемые на основе этого метода численные расчеты. В последнем параграфе второй главы проводится сравнительный анализ возможностей разработанного в диссертации метода с другими родственными методами, используемыми для расчетов свойств кластеризованных ядер (NCSM/RMG, SS-HORSE), отмечаются преимущества и недостатки рассматриваемых методов.

Во **второй главе** на основе разработанного метода рассчитана нижняя часть спектров ядер ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и их полные энергии связи, кластерные формфакторы, а также вычисляются их нормировки – кластерные спектроскопические факторы, анализируется относительная роль кластерных и некластерных компонент волновых функций кластеризованных слабосвязанных или резонансных состояний. При этом установлен важный вклад некластерных компонент в полную энергию связи сильно кластеризованных ядер ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$. Отмечено, что ранее аналогичный результат был обнаружен в *ab initio* расчетах ядра ${}^7\text{Li}$, но в диссертации впервые показано, что этот вклад неожиданно увеличивается с ростом базиса и слабо меняется с учетом каналов с возбужденными кластерами.

В **третьей главе** разработанный в диссертации метод применяется для вычисления асимптотических нормировочных коэффициентов, и ширин распадов резонансных состояний ${}^5\text{He}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$. В целом, получено хорошее согласие с экспериментом и продемонстрирована устойчивость результатов к выбору параметров расчетной схемы, показывающие эффективность развитого метода. Важно отметить, что при этом использовано «новое» определение спектроскопического фактора, восходящее к работам Флиссбаха - Манга (1977): спектроскопический фактор не сводится к интегралу перекрытия волной функции ядра из A нуклонов с антисимметризованной (но ненормированной) волновой функцией произведения антисимметричных внутренних волновых функций кластера, ядра-остатка и функции их относительного движения, но дополнительно включает интегральное обменное ядро МРГ. Учет обменного ядра важен в расчетах асимптотических нормировочных коэффициентов.

В **Заключении** приведены основные результаты проведенных исследований, которые представляют положения, выносимые на защиту.

Диссертация написана ясным языком, с достаточно подробным изложением математического формализма. Численные результаты представлены в виде таблиц и графиков. Проведенные исследования описаны подробно, с обоснованием основных положений и аккуратным цитированием использованной литературы. Автор демонстрирует хорошее знание современного состояния исследований в данной области, что позволяет отчетливо видеть на этом фоне новизну и значимость проведенных исследований.

По содержанию диссертации есть следующие **замечания**.

1. На стр. 28 говорится, что в киральной эффективной теории нуклонных сил пренебрегается возбуждением Δ -изобары. Такое утверждение некорректно, так как в этой теории учитываются все адронные степени свободы, при этом вклад тяжелых адронов в отличие от вклада пионов и нуклонов учитывается неявно, будучи заинтегрированным в основные параметры теории – низко-энергетические константы.

2. Учет трехчастичных сил в ab initio расчетах резко увеличивает число матричных элементов, поэтому в данной работе используются известные в литературе двухнуклонные потенциалы, которые подвергнуты унитарному преобразованию, что согласно теореме Глэкле-Полизу, может генерировать вклад трехчастичных сил во вне-энергетической области потенциала. Частично это ожидание подтверждается успешным описанием не только двухнуклонных, но многонуклонных данных. Однако недавно проведенное прямое тестирование одного из этих потенциалов, JISP16H, путем решения уравнений Фаддеева в трехтельной задаче о рассеянии нейтронов на дейтроне (R.Skibinski et al., Phys. Rev. C 97 (2018) 014002) показывает, что его использование в описании nd рассеяния ограничено областью малых передач импульса. Эти результаты и возможное влияние на решаемые в диссертации задачи следовало обсудить в диссертации.

3. К сожалению, в тексте имеются орфографические и синтаксические ошибки, которые, видимо, являются опечатками.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, результатом которого является решение актуальной задачи, имеющей важное значение для теории атомных ядер. В рамках поставленной задачи выполнен большой объем исследований. Основные результаты диссертации были доложены на многих международных конференциях и своевременно опубликованы в ведущих российских и международных научных журналах.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Очевидно, что рассматриваемая работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК и Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, Родкин Дмитрий Михайлович, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент:

Узиков Юрий Николаевич

ведущий научный сотрудник
Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований
д.ф.-м.н., доцент,
ул. Жолио-Кюри, д. 6, г. Дубна, 1419800
тел.: 8 (496) 216-33-43
e-mail: uzikov@jinr.ru

16.05.2019

Даю согласие на обработку моих персональных данных законодательно разрешенным способом.

Подпись официального оппонента Ю.И. Узиков
Ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ

И.В. Титкова

