

ОТЗЫВ  
официального оппонента д.ф.-м.н. Соболевского Николая Михайловича  
на диссертацию Родкина Дмитрия Михайловича  
«Теоретическое описание кластеризованных состояний легких ядер в рамках  
современных микроскопических моделей», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц»

Исследование кластеризованных состояний атомных ядер имеет длительную историю и продолжает оставаться актуальным в ядерной физике. Наличие в ядре кластеров, т.е. подсистем, состоящих из нескольких нуклонов, влияет как на свойства атомного ядра, так и на характеристики выходных каналов ядерных реакций. Явление кластеризации проявляется, в первую очередь, в легких ядрах. Изучение кластеризации, как теоретическое, так и экспериментальное, также привязано, в основном, к легким ядрам.

К настоящему времени разработано достаточно много теоретических моделей кластеризации. Среди них выделяются модели, претендующие на описание свойств атомных ядер из первых принципов (*ab initio*), т.е. на основе решения уравнения Шредингера для ядра как системы нуклонов с использованием реалистических нуклон-нуклонных потенциалов, и без привлечения дополнительных эмпирических предположений. Затем *ab initio* модели используются для расчёта наблюдаемых величин и сравнения с экспериментом.

Целью диссертации Д.М. Родкина является, во-первых, построение новой *ab initio* модели кластеризации на основе оригинальной системы базисных функций для решения уравнения Шредингера. Эта модель получила название Модель ортогональных функций кластерных каналов (МОФКК) или Cluster Channel Orthogonal Functions Model (CCOFM). Другой, не менее важной целью и результатом диссертации, является создание комплекса компьютерных программ для изучения кластерных явлений в легких ядрах путем численных экспериментов.

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения.

Во Введении дан довольно подробный обзор моделей кластеризации за продолжительный период времени, цитируется около 70-ти публикаций. Подчеркивается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертации, аргументируется научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе описана разработанная диссертантом Модель ортогональных функций кластерных каналов МОФКК-CCOFM. После краткого введения автор переходит к описанию Модели оболочек без инертного кора (МОБИК-NCSM). Модель NCSM является исходным пунктом для дальнейших построений автора. Подробно излагается формализм модели. Отмечается, что несмотря на объективные трудности использования NCSM – прежде всего связанные с быстрым ростом размерности базиса с увеличением числа нуклонов

или числа включаемых в базис оболочек – эта модель является наиболее развитым инструментом для теоретических *ab initio* исследований свойств легких ядер.

Затем обсуждаются потенциалы взаимодействия нуклонов, применяемые в *ab initio* моделях. В расчетах автора, представленных в последующих главах, используются потенциалы JISP16 и Daejeon16, разработанные с участием сотрудников НИИЯФ МГУ.

Далее автор переходит к изложению собственной модели ССОФМ. Даётся подробное описание формализма модели. Основным достижением при создании модели ССОФМ является расширение и преобразование в удобный для расчетов вид набора базисных функций. Этот набор включает базис волновых функций кластерных каналов. При этом производится ортогонализация и нормировка расширенного базиса.

В итоге, как показано в следующих главах, модель ССОФМ позволяет одновременно и с хорошей точностью описывать как характеристики структуры ядра, так и применяться для расчета реакций с участием легких ядер, что соответствует концепции создания единой теории атомного ядра, описывающей как ядерную структуру, так и ядерные реакции.

Во второй главе, а также в следующей третьей главе, приводятся результаты расчётов различных характеристик легких ядер согласно модели ССОФМ автора, а также согласно другим *ab initio* моделям, с использованием различных базисов и характеризующих их параметров. Проводится сравнение этих расчётов между собой и с экспериментом.

Эта деятельность является фактически вычислительным экспериментом, который невозможен без использования универсальных, хорошо верифицированных и эффективных компьютерных кодов. Сильной стороной диссертации является применение таких кодов, причём как общепринятых в данной области исследований, так и собственной разработки. В частности, используются известные оболочечные коды Antoine и Bigstick. Последний, благодаря применению в нем технологий распараллеливания OpenMP и MPI позволяет проводить расчёты на вычислительных кластерах. Для расчетов с применением кластерных компонент используется разработанный автором код, упомянутый на с. 52 диссертации. К сожалению, не указано название (имя) этого кода.

Далее во второй главе представлены результаты расчётов кластеризации конкретных легких ядер. Рассмотрены девягинуклонные системы  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  с ярко выраженными кластерными свойствами. Показано преимущество модели автора ССОФМ, по сравнению с моделью NCSM, за счёт меньшей размерности базиса.

Рассчитаны полные энергии связи и другие параметры состояний ядра  ${}^8\text{Be}$  с применением нескольких типов базисов при разных значениях основных параметров базисов. Основной результат проведенных расчетов заключается в том, что вклад некластеризованных компонент базиса в полную энергию связи велик даже в столь типичной кластеризованной системе, как  ${}^8\text{Be}$ . Обнаружено

также, что использование потенциалов JISP16 или Daejeon16, несмотря на существенную разницу в их свойствах, не меняет качественную картину.

Рассчитаны полная энергия связи, спектр нижних уровней и кластерные характеристики основного и нижних состояний ядра  ${}^7\text{Li}$  как системы  $\alpha+t$ . Для анализа кластерных эффектов использовалось несколько типов базисов, аналогичных упомянутым выше. Результат качественно совпадает с данными, полученными для  ${}^8\text{Be}$  и подтверждает, что вклад некластеризованных компонент базиса в полную энергию связи велик даже в сильно кластеризованных системах.

Основной вывод автора из численных экспериментов, представленных во второй главе, состоит в том, что волновая функция кластеризованного состояния не является чисто кластерной волновой функцией, а представляет собой кластерную волновую функцию, погруженную в "море" диффузных некластерных компонент.

В третьей главе приводятся результаты расчетов асимптотических характеристик ряда легких ядер, а именно основных и нижних возбужденных состояний ядер  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Be}$ . Наиболее легкой системой, обладающей явными кластерными характеристиками, является ядро  ${}^5\text{He}$ . Выполнен расчет распада нижнего возбуждённого состояния  ${}^5\text{He}$  по каналу  ${}^4\text{He}+t$  для набора значений параметров распада. Вычисленные значения резонансной энергии данного состояния и ширины распада близки к табличным значениям.

Далее рассматриваются связанные и резонансные состояния ядра  ${}^7\text{Li}$  и его распад по каналу  $\alpha+t$ . Подробно обсуждается влияние параметров базиса на результаты расчета. Отмечается как успешное описание характеристик большинства уровней, так и определенные проблемы при описании дублета уровней  $5/2^-$ . Возможной причиной этого называется малое расстояние между подуровнями, а также недостаточная размерность используемого базиса.

В завершение третьей главы проведен расчет ширин распадов нижних резонансных состояний ядра  ${}^8\text{Be}$ . Расчеты проводились аналогично случаю  ${}^7\text{Li}$ , но для более широкого набора параметров базиса с целью проверки устойчивости расчёта. Представленные результаты показывают, что с ростом размерности базиса достигается хорошее согласие полных энергий связи с экспериментом. Однако, как и для ядра  ${}^7\text{Li}$ , точность расчёта энергий связанных состояний и резонансов, необходимая для вычисления асимптотических нормировочных коэффициентов связанных состояний и ширин резонансов, не достигается. Это приводит к необходимости использования экспериментальных значений энергий для расчета указанных асимптотических характеристик.

По результатам третьей главы можно заключить, что созданная автором модель ССОФМ показала свою применимость для расчета асимптотических характеристик низколежащих возбужденных состояний. Кроме того, расчет хорошо установленных характеристик с помощью данной модели служит дополнительным тестом для используемых реалистических NN-потенциалов.

Подводя итоги следует подчеркнуть, что создание автором теоретической Модели ортогональных функций кластерных каналов ССОФМ и, что не менее

важно, её компьютерная реализация в виде комплекса программ, вносит заметный вклад в развитие ab initio моделей структуры ядра и ядерных реакций и найдёт своё применение в физике лёгких ядер и астрофизике.

Диссертация не лишена недостатков в плане изложения материала. Текст перегружен аббревиатурами, что затрудняет восприятие. Приходится искать расшифровку выше по тексту. Аббревиатура КФФ вообще не раскрыта. Возможно, стоило бы включить в диссертацию список сокращений.

Встречаются довольно громоздкие формулы непосредственно в тексте, а не отдельной строкой, с. 30, 42. Можно встретить неожиданные формулировки, например «высококачественное согласие с экспериментом», с. 98, 101; «из-за сложностей экспериментального расчета», с. 98; «высокая степень гибкости подхода», с. 36.

Имеет место некоторая небрежность при написании текста. Так на с. 56 говорится о сравнении с данными группы Университета штата Айова, но ссылки в этом месте не приводятся, хотя и содержатся в других частях текста. Технологии распараллеливания называются на с. 52 OpenMP и MPI, а на с. 97 – openmp и mpi. Встречаются громоздкие длинные фразы в разных местах текста.

Сделанные замечания не снижают ценности работы автора. Содержание диссертации отражено в пяти публикациях в отечественных и международных физических журналах, удовлетворяющих требованиям ВАК. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Её автор, Родкин Дмитрий Михайлович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц». Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

#### Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Лаборатории нейтронных исследований  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
117312 Москва, Проспект 60-летия Октября 7а  
e-mail: sobolevs@inr.ru  
+7(917)507-1769

Н.М. Соболевский  
06 мая 2019 г.

Подпись Соболевского Н.М. удостоверяю  
Заместитель директора Института  
д. ф.-м. н.



4

Г.И. Рубцов