

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

ГНИЛОЗУБ
Ирина Анатольевна

СИММЕТРИЯ ГАМИЛЬТониАНА АТОМНОГО ЯДРА И
КЛАСТЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Специальность 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2009

Работа выполнена в Отделе физики атомного ядра Научно-исследовательского института имени Д.В. Скобелцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Ю.М. Чувильский

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **К.А. Гриднев**
доктор физико-математических наук
С.Б. Сакута

Ведущая организация: Лаборатория теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова Объединенного
института ядерных исследований

Защита диссертации состоится 20 марта 2009 г. в 15 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, 19-й корпус НИИЯФ МГУ, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан 17 февраля 2009 г.

Ученый секретарь Совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 501.001.77
доктор физ.-мат. наук, профессор



Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Большое число исследовательских программ, как фундаментальных, так и нацеленных на практические прикладные результаты, сталкиваются с необходимостью изучения многочастичных физических систем со сложной структурой, элементы которых могут образовывать подсистемы (кластеры). Свойства кластеров и их взаимодействия отражаются в наблюдаемых характеристиках системы как целого и ее отклике на различные внешние воздействия. В атомной физике иерархия структур – атомы, молекулы, наноструктуры, комплексы и т. д. – определяется адиабатическим соотношением между кинетическими энергиями электронов и ядер, а также гибридизацией электронных ps - и pr -орбиталей, порожденной симметрией гамильтониана кулоновского взаимодействия. В системах, не обладающих такими свойствами, в частности, нуклонных, кварковых – объяснение причин структурирования (кластеризации) представляет собой чрезвычайно актуальную и интересную задачу.

Основы теории взаимодействия составных ядерных частиц (ассоциаций нуклонов, кластеров) были заложены в работах Дж.Уилера [С1]. Развитый в них подход получил название модели резонирующих групп (МРГ). С введением в теоретическую физику компьютерных программ, позволяющих реализовать весьма сложные формальные методы, к которым безусловно относится МРГ, подход получил широкое распространение. Единая теория ядра К.Вильдермута и Я.Тана [С2], мультикластерная стохастическая модель К.Варги и Й.Сузуки [С3] и многие другие используют методические приемы МРГ и в той или иной мере уходят в нее своими корнями. Следует однако отметить, что все подходы этого типа изначально предполагают кластерную структуру системы, не объясняя причины ее возникновения или приводя чисто качественные аргументы.

В работах Х.Манга, В.В.Балашова, В.Г.Неудачина, Ю.Ф.Смирнова, Н.П.Юдина, Д.Курата, А.Аримы была предложена другая трактовка кластерных свойств фермионных систем (подробное описание представлено в монографии [С4]). Микроскопическая (то есть описывающая систему в терминах фермионных переменных) волновая функция, например функция модели оболочек, проектировалась в канал кластер + ядро-остаток, а величина этой проекции (спектроскопическая амплитуда кластерного канала) объявлялась мерой кластеризации. Такой микроскопический подход позволяет строить теорию определенных классов кластерных ядерных реакций, однако ненулевые значения проекции волновой функции в большое количество

каналов, в т.ч. линейно зависимых (нужный канал выделяется постановкой эксперимента – детектированием продуктов реакции), не позволяет ставить вопрос о кластеризации как свойстве определенного состояния атомного ядра. Более того, последовательная теория ядерных реакций не содержит в качестве формального элемента обсуждаемой спектроскопической амплитуды – ее появление в выражении сечения кластерной реакции связано с неконтролируемыми качественными приближениями.

Схемой, позволяющей выявить в определенном смысле кластерные подсистемы в атомном ядре исходя непосредственно из гамильтониана нуклон-нуклонного взаимодействия является метод квантовой химии – антисимметризованная молекулярная динамика (АМД), распространенная на задачи теории атомного ядра Х.Хориучи [С5]. Но в этом случае признаком существования в ядре кластерной (точнее – мультикластерной) структуры служит наличие соответствующего количества максимумов нуклонной плотности во внутренней системе координат ядра. Кроме того, расчеты плотности какого-либо ядерного состояния в антисимметризованной молекулярной динамике требуют введения классического трения, что не позволит рассматривать этот подход как последовательный метод квантовой механики.

В связи с этим исследование проблемы возникновения кластерной структуры систем однопородных фермионов в рамках последовательного гамильтонова формализма квантовой механики представляется весьма актуальным.

Связь между $SU(3)$ и $SU(4)$ симметрией микроскопического ядерного гамильтониана и возможностью тождественно представить волновые функции системы в виде функций мультикластерной МРГ, а также проявлением ядром кластерных свойств была впервые показана С.Д.Кургалиным и Ю.М.Чувильским [С6]. В этой работе была найдена наиболее общая форма гамильтониана, допускающего такое представление. С одной стороны, работа заложила основы нового метода изучения кластерных явлений, продемонстрировала широкие перспективы такого метода. Возникло понимание, что таким образом можно с единой точки зрения описать широкий круг кластерных явлений (например, спектры кластерных состояний систем, рассеяние составных частиц, распады с испусканием кластеров) и существенно продвинуться в исследовании разнообразных процессов, в которых возникают кластерные подсистемы. С другой стороны, в этой работе обсуждались только отдельные качественные следствия обнаруженной связи. Широкий спектр возможностей такого подхода был в ней лишь частично обозначен. Работа поставила на повестку дня актуальные задачи количественного расчета спектров α -частичных состояний ядер, анализа на их основе данных эксперимента, выявления неизвестных до сих пор качественных свойств

ядер и перспектив нового подхода в смежных областях физики.

Все вышесказанное обуславливает актуальность разработанных в диссертации теоретических методов и проведенных в ней количественных расчетов.

Цель работы

Целью работы является развитие теоретических методов для описания кластерной структуры и кластерных свойств нуклонных систем на основе микроскопического гамильтонова формализма квантовой механики, расчеты на основе этих методов спектров α -частичных состояний ядер, исследование проявлений кластерных свойств в наблюдаемых характеристиках этих систем, их отклике на различные внешние воздействия.

Научная новизна и значимость работы

Концепция, объясняющая структурирование ядерной системы на подсистемы-кластеры симметрией нуклон-нуклонного гамильтониана является принципиально новой, практически совсем не разработанной в литературе. Ее развитие в настоящей работе позволило последовательно построить не имеющую аналогов классификацию состояний ядерной системы, разделить их на мультикластерные, двухтельные (кластер + ядро-остаток) и не соответствующие какому-либо разбиению на кластеры состояния. Расчеты высоковозбужденных кластерных состояний в обобщенной модели Эллиотта, интерпретация на их основе спектров легких ядер в широком диапазоне энергий проведены в диссертации впервые. Также впервые был решен вопрос о возможности существования в ядрах α -конденсата при нормальной ядерной плотности. Принципиально новым является доказательство факта, что статистика составных бозонов не соответствует в точности статистике Бозе-Эйнштейна: на один уровень системы таких частиц нельзя поместить бесконечное число бозонов, т.к. сказывается антисимметрия A -фермионной волновой функции.

В рамках проведенного исследования были получены ответы на отмеченные выше вопросы о природе кластерных состояний, их классификации, возможностях их количественного описания, условиях конденсации ядерной материи, статистике составных частиц и многие другие. Некоторые из полученных результатов заметно изменили трактовку поставленных в предыдущих исследованиях проблем. Все это определяет научную значимость представленной работы.

Практическая ценность работы

Единый теоретический подход к исследованию кластерной структуры физических объектов дает возможность понять механизм реакций с участием составных частиц в широком диапазоне их кинематических и дина-

мических характеристик (энергий, передаваемых импульсов, масс сталкивающихся систем и участвующих в реакциях кластеров), объяснить экспериментальные данные, давать предсказания для проведения новых опытов, определять направления поиска неизученных явлений и строить аналогии между многообразными и, на первый взгляд, сильно различающимися по свойствам системами и процессами. В частности:

а) разработанный метод исследования α -частичных состояний в легких ядрах дает возможность классифицировать экспериментальные уровни и уточнять их характеристики.

б) предложенная мульти- α -частичная модель ядерных состояний перспективна для решения проблемы существования кластерного конденсата в ядрах, описания его свойств, а также других проблем взаимосвязи нуклонных и кластерных степеней свободы.

в) практическая ценность развитого метода описания α -частичных состояний ядер становится существенно выше в связи с созданием и активным распространением нового экспериментального метода "толстых мишеней" [С7], позволяющего в столкновениях α -частиц с ядрами получать богатый резонансный спектр в едином измерении.

г) отличие статистики составных бозонов от статистики Бозе-Эйнштейна наиболее сильно сказывается в системах относительно небольшого числа частиц, таким образом обнаружено второе, наряду с соотношением поверхность-объем, свойство, отличающее системы большого числа частиц от наносистем, что, в связи с большим вниманием к последним, представляет определенные перспективы для практики.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа квантовых чисел волновых функций, описывающих мультикластерные состояния в обобщенной модели Эллиотта и правил отбора, которым они подчиняются.
2. Положение, что статистика бозонов, составленных из фермионов, отличается от статистики Бозе-Эйнштейна, а также от статистики Ферми-Дирака и парастатистики. Результаты анализа качественных свойств систем, подчиняющихся этой статистике, названной квазибозонной.
3. Новая концепция альфа-конденсированных состояний в атомных ядрах. Вывод о возможности существования альфа-конденсата при нормальной ядерной плотности.
4. Заключение, что в спектрах четно-четных ядер существуют состояния, имеющие альфа-бинуклонную структуру. Вывод, что решающим

фактором образования мультикластерной структуры является $SU(3)$ и $SU(4)$ симметрия системы и формирующих ее кластеров.

5. Результаты расчетов спектров альфа-бинейтронных состояний ядер ^{10}Be и ^{12}Be .
6. Результаты расчетов спектров мульти-альфа-частичных состояний ядер ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne и ^{44}Ti в обобщенной модели Эллиотта. Заключение, что эти спектры хорошо воспроизводят экспериментальные данные.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на 52–55, 57, 58 Международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра Москва, 2002; Москва, 2003; Белгород, 2004; Санкт-Петербург, 2005; Воронеж, 2007; Москва, 2008; XVII и XVIII Международных конференциях по квантовой теории поля и физике высоких энергий (QFTHEP), Самара—Саратов, 2003; Санкт-Петербург, 2004; II Eurasian Conference on Nuclear Science and its Application, Almaty, Rep.Kazakhstan, 2002; Symposium on nuclear clusters. From light exotic to superheavy nuclei. Rauischholzhausen, Germany, 2002; 18th International Conference on Few-Body Problems in Physics, Santos, Brasil, 2006.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах лаборатории теории атомного ядра НИИЯФ МГУ.

Публикации и личный вклад автора

По результатам диссертации опубликовано 10 работ [1-10]. Все представленные результаты были получены либо при непосредственном участии автора, либо самим автором.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации – 89 страниц машинописного текста, включая 7 таблиц и 10 рисунков.

Содержание работы

Во введении изложена история возникновения решаемых в диссертации задач, обоснована актуальность обсуждаемой проблематики и аннотировано содержание диссертации.

В первой главе излагается предложенная в [С6] и развитая в настоящей диссертации концепция кластерных состояний в атомных ядрах, связывающая эти состояния с симметрией ядерного гамильтониана, рассматриваются

условия проявления кластерной структуры ядер в ядерных столкновениях, а также обсуждаются эксперименты, где можно ожидать ярких проявлений кластеризации.

В *первом параграфе* представлен микроскопический ядерный гамильтониан H , первой главной особенностью которого является то, что он содержит в спектре определенное подмножество состояний, энергии которых точно воспроизводятся редуцированным гамильтонианом H_{cl} , действующим в пространстве координат относительного движения кластеров. В наиболее общем виде он представляется выражением:

$$H = H_{osc} + F(\hat{L}^2, \hat{g}_2, \hat{g}_3, \hat{\Omega}), \quad (1)$$

где H_{osc} – осцилляторный гамильтониан, действующий в соответствующем пространстве, $F(\dots)$ – произвольная функция операторов Казимира $\hat{g}_2, \hat{g}_3, \hat{\Omega}$ (последний называют оператором Баргмана) группы $SU(3)$ и L^2 ее подгруппы $O(3)$. Редуцированный гамильтониан H_{cl} имеет ту же форму. Вторая главная особенность исходного гамильтониана – возможность тождественно представить волновые функции этой части состояний в виде функций мультикластерной МРГ. Рассматриваются мульти-альфа-частичные состояния.

$$\Psi_{\hat{\Delta}}^A \equiv \hat{A} \hat{N}^{-1/2} \prod_{k=1}^K (\Psi_{X_k}) \cdot \Psi_{\hat{\Delta}}(\{\rho_k\}), \quad (2)$$

где \hat{A} – оператор антисимметризации:

$$\hat{A} = \sum (-1)^p \hat{P}, \quad (3)$$

\hat{P} – оператор перестановки номеров координат нуклонов между кластерами, p – четность этой перестановки, Ψ_{X_k} – антисимметричные волновые функции внутреннего движения нуклонов в кластерах, составляющих систему, $\Psi_{\hat{\Delta}}(\{\rho_k\})$ – собственная функция редуцированного гамильтониана H_{cl} , $\hat{\Delta}$ – характеризующие эту функцию квантовые числа. Нормирующий интегральный оператор \hat{N}

$$\hat{N} \equiv \langle \hat{A} \prod_{i=1}^K \Psi_{X_k} \delta(\{\rho_k - \rho'_k\}) | \hat{A} \prod_{i=1}^K \Psi_{X_k} \delta(\{\rho_k - \rho''_k\}) \rangle \quad (4)$$

– обменное ядро мультикластерной модели резонирующих групп.

Детально обсуждаются правила отбора, налагаемые принципом Паули на спектр мульти-альфа-частичных состояний, включая множественность состояний, определяемых одними и теми же квантовыми числами. Дается

классификация состояний, относящихся и не относящихся к мульти-альфа-частичным. Применимость обсуждаемого гамильтониана к реальным задачам ядерной физики подтверждается тем фактом, что он является обобщением хорошо известного и неплохо зарекомендовавшего себя при описании низколежащих уровней ядер $(2s-1d)$ -оболочки гамильтониана модели SU(3) Эллиотта [С8].

Во *втором параграфе* обсуждаются условия, при которых кластерные состояния атомных ядер можно наблюдать в ядерных процессах. Наилучшие возможности для наблюдений предоставляют процессы резонансного рассеяния альфа-частиц на легких ядрах. Строится базис резонансных состояний, сильно связанных с упругим α -частичным каналом, которые в литературе называются α -частичными. Демонстрируется, что множество таких состояний является подмножеством мультикластерных. Представлен формализм спектроскопических факторов, характерный для обсуждаемой модели. Знание этих величин весьма существенно для идентификации многочисленных известных из эксперимента альфа-частичных состояний.

В *третьем параграфе* обсуждается феноменология альфа-частичных состояний, области и методы их экспериментального исследования и условия их наблюдения.

Вторая глава посвящена анализу следствий доказанной в первой главе точной сводимости волновых функций некоторой части состояний многофермионных систем к мультикластерной форме.

В *первом параграфе* развитый подход используется для выяснения соотношения между свойствами A -нуклонной $N=Z$ (т. е. фермионной) системы и свойствами мульти-альфа-частичных (т. е. $A/4$ -бозонных) решений гамильтоновой задачи в редуцированном пространстве в состояниях, описываемых одновременно как полным микроскопическим, так и редуцированным мультикластерным гамильтонианами. Фермионные свойства и, прежде всего, принцип Паули проявляются при этом только через правила отбора, налагаемые на эти состояния. Таким образом, исследуются системы составных (т. е. содержащих несколько фермионов) бозонов, динамика которых описывается редуцированным гамильтонианом бозон-бозонного взаимодействия, а фермионные свойства системы приводят к тому, что определенная часть решений этого гамильтониана в природе не реализуется.

Такое соотношение дает возможность весьма просто проанализировать статистику составных бозонов. Правила отбора для глобального (описывающего систему как целое) главного квантового числа N ($N = \sum_j n_j$ где $n_j = 2\tilde{n}_j + l_j$ – главное квантовое число однонуклонной волновой функ-

Таблица 1: Минимальные главные квантовые числа для α -частичных систем

$A/4$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
N_{min}	0	4	8	12	20	28	36	44	52	60	72

ции; \tilde{n}_j — количество узлов в ней, l_j — орбитальный момент) волновой функции системы получаются из соотношения тождественности мульти- α -частичных волновых функций и функций осцилляторной модели оболочек, описываемых одним и тем же набором квантовых чисел. Анализ правил отбора состояний по главному квантовому числу приводит к следующим результатам. Для ядер ${}^4\text{He}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ..., ${}^{44}\text{Ti}$ нижние пределы N_{min} значений N представлены в табл. 1.

Из этой таблицы видно, что для $A > 4$ конденсированное состояние бозонной системы α -частиц на нижнем уровне $(0s)^{A/4}$ ($N = 0$) запрещено принципом Паули, которому подчиняются нуклоны, входящие в состав α -частиц. Нельзя сконцентрировать бесконечное число альфа-частиц и на любом другом уровне, поэтому ни одна волновая функция не может удовлетворять строгому определению α -конденсата. В работе получены выражения для максимально возможного числа альфа-частиц на одночастичных уровнях, характеризующихся квантовым числом $0 \leq N_i \leq N_{imax}$ для произвольного N_{imax} , числа альфа-частиц на единственном заполненном одночастичном уровне N_i , а также минимальное значение N_i уровня, на котором может находиться заданное число альфа-частиц.

В конечном итоге волновая функция относительного движения α -частиц оказывается симметричной но, в отличие от фотонного газа, сконцентрировать бесконечное число α -частиц на одном уровне невозможно.

Представленная статистика не является ни статистикой Бозе-Эйнштейна, ни статистикой Ферми-Дирака. Не является она и парастатистикой, поскольку допустимое количество α -частиц меняется от уровня к уровню. С ростом размеров системы по отношению к размерам бозона допустимое число бозонов на верхнем уровне стремится к

$$k \simeq (r/r_\alpha)^6 \quad (5)$$

и становится фактически бесконечным уже для системы, размер которой в несколько раз больше, чем размер бозона.

Это утверждение, доказанное для представленного частного случая обсуждаемого типа гамильтонианов, справедливо и в общем случае. Независимо от выбора гамильтониана, для любой мульти- α -частичной компоненты

произвольной собственной функции (другие, не представимые в мульти- α -частичной (бозонной) форме компоненты волновой функции – их можно назвать несконденсированными фермионными – появляются с определенным весом во всех собственных функциях гамильтонианов, отличных от данного) значение главного квантового числа будет ограничено снизу величиной N_{min} , представленной в табл.1. В связи с этим представленный результат выходит далеко за рамки ядерной физики.

Во *втором параграфе* главы полученные результаты используются для построения новой концепции альфа-конденсированных состояний ядер, проблема поиска которых активно обсуждается в современной литературе. В настоящее время основным теоретическим подходом к обсуждаемой проблеме является предложенный Г.Репке, П.Шуком и др. [С9] поиск конденсированной α -частичной материи при малой плотности ядерной системы или, что практически то же самое, поиск конденсированных состояний в области $k\alpha$ -частичного ($k = A/4$) порога развала четного ядра с $Z = N = A/2$.

В то же время из результатов настоящей работы ясно, что существует другая возможность построить мульти- α -частичные состояния, проявляющие аналогичные свойства в таких же процессах, поскольку показано, что в обсуждаемых состояниях система ведет себя как группировка бесструктурных α -частиц, причем среди этих состояний – основные состояния ядер и другие состояния с нормальной ядерной плотностью. Полученное ограничение на возможности “бозонизации” системы позволяет считать, что обсуждаемые в настоящей работе состояния в наибольшей степени подходят на роль α -конденсированных. В этом смысле бозонный конденсат может обладать нормальной ядерной плотностью, а околопороговые состояния малой плотности скорее всего являются их частным случаем.

В **третьей главе** представлены результаты исследования спектров ядер $1p$ -оболочки.

В *первом параграфе* обсуждается спектр 3α -частичных состояний ядра ^{12}C . Из рис. 1 видно, что линейная пятипараметрическая версия гамильтониана неплохо, с точностью до 0.5 МэВ, воспроизводит спектр известных экспериментальных уровней ядра ^{12}C , для которых изоспин $T=0$, а значения полного момента, четности и ширины распада в 3α -частичные каналы соответствуют мульти-альфа-частичной структуре.

Во *втором параграфе* исследования мультикластерных спектров распространены на четно-четные ядра с $N \neq Z$. Кластерами-конституэнтами при этом считаются альфа-частицы и бинейтроны. Показано, что волновые функции определенного подмножества состояний нуклонных систем с такой структурой также представимы в виде, характерном для функций мульти-

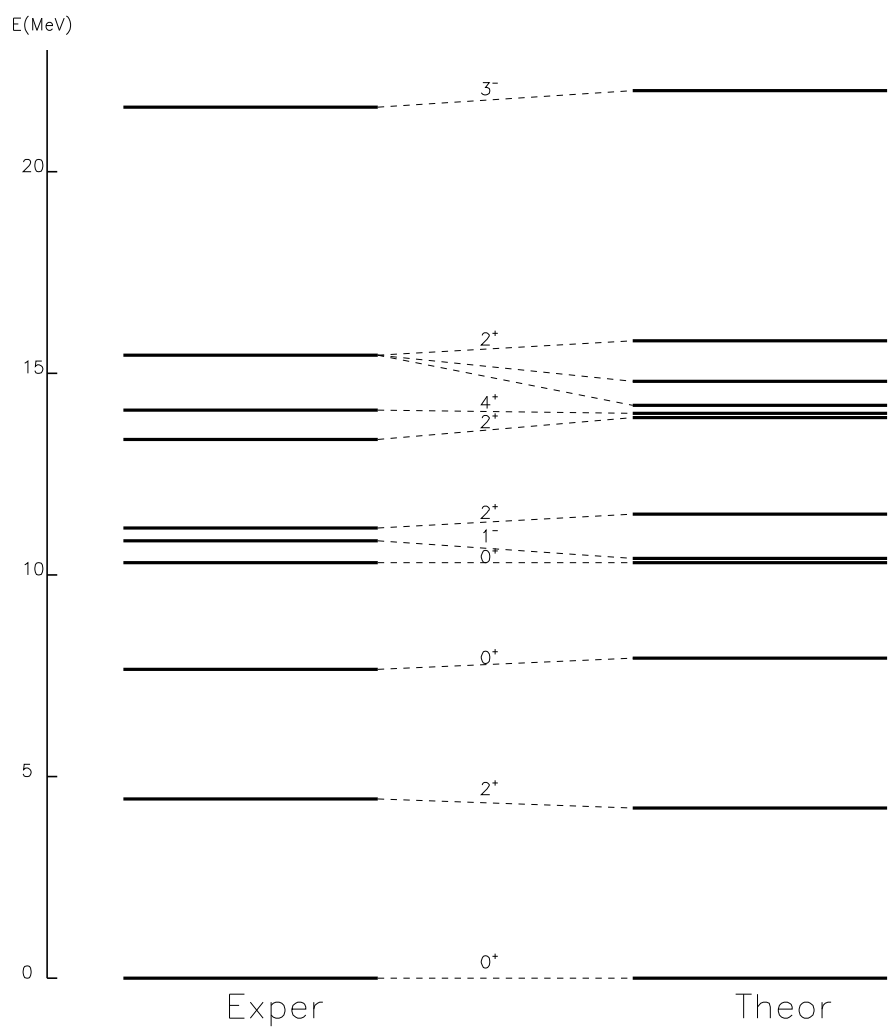


Рис. 1: Мультикластерные уровни ядра ^{12}C .

кластерной МРГ при условии, что их динамика описывается гамильтонианом обсуждаемого типа. Проведены расчеты спектров ядер ^{10}Be и ^{12}Be . Вполне достаточным для этих целей оказывается трехпараметрический гамильтониан. Схема ротационных полос первого из них приведена на рис. 2.

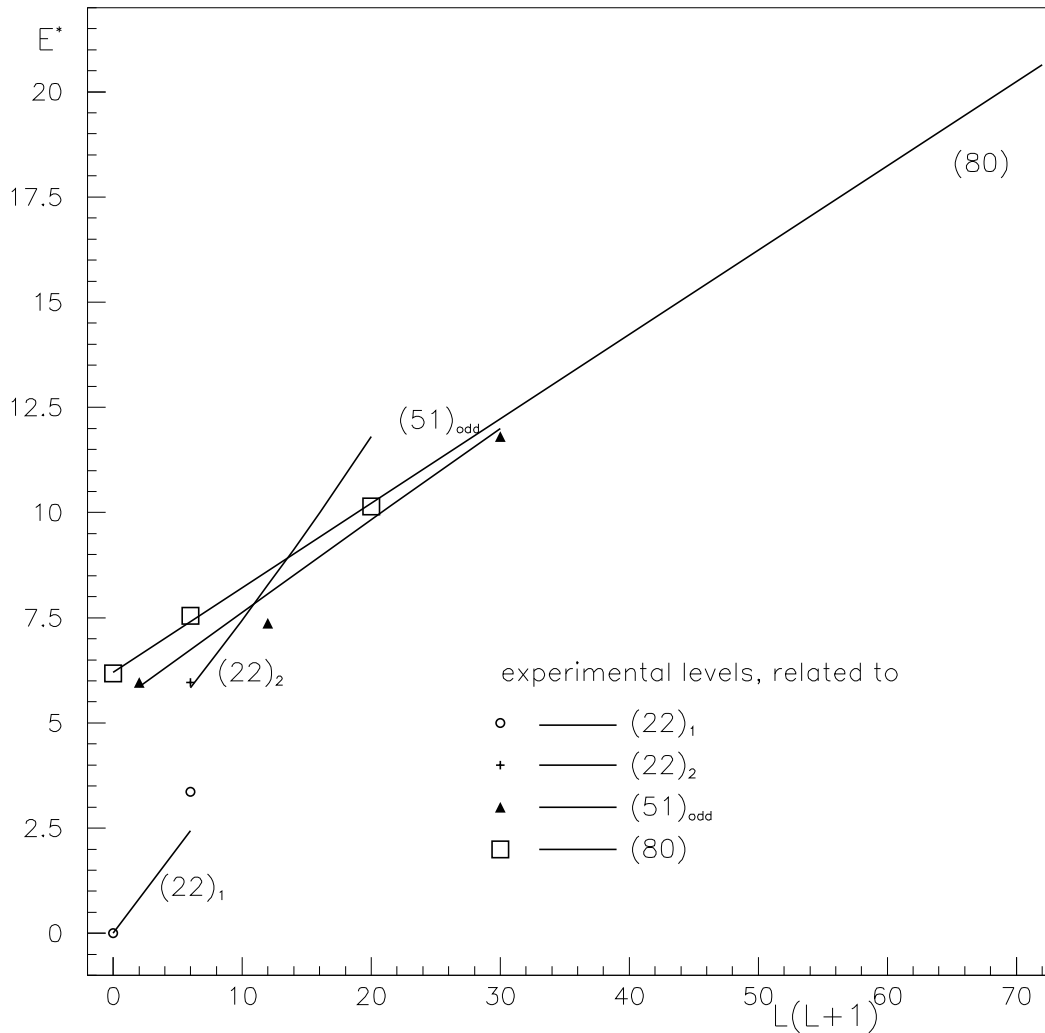


Рис. 2: Схема мультикластерных уровней ядра ^{10}Be .

Наблюдается хорошее качественное и количественное согласие теории и эксперимента. Этот факт в определенном отношении подтверждает возможность существования мультикластерных альфа-бинуклонных систем и, тем самым, один из важнейших пунктов развиваемой концепции кластерных явлений. Именно, существование систем, содержащих не связанные в свободном состоянии подсистемы – бинейтроны, указывает, что важнейшим

фактором существования кластерных структур является не энергия связи конститuentов, а их $SU(3)$ и $SU(4)$ симметрия наряду с аналогичной симметрией всей системы.

Представлены предсказания многочисленных уровней ядер ^{10}Be и ^{12}Be , экспериментальный поиск которых ведется или планируется в большинстве лабораторий мира, имеющих в своем распоряжении пучки радиоактивных ионов относительно низких энергий.

В четвертой главе изучаются спектры "классических" альфа-частичных ядер ^{16}O , ^{20}Ne и ^{44}Ti .

В *первом параграфе* представлены результаты расчетов мульти-альфа-частичных состояний близких в смысле кластерной структуры ядер ^{20}Ne и ^{44}Ti . В процессе расчетов выяснилось, что исходный микроскопический гамильтониан неплохо описывает не только состояния этих ядер, соответствующие структуре альфа-частица + магический остов, но и множество других уровней, которые обладают наиболее высокой $SU(4)$ симметрией (т. е. отвечают схеме Юнга $[4^4/4]$). Результаты вычислений спектра мульти-альфа-частичных состояний ядра ^{44}Ti , в которых использовался трехпараметрический гамильтониан, представлены в таблице 2. Индекс i различает состояния с различными значениями Ω в порядке их возрастания.

Как видно из этой таблицы, экспериментальные данные вполне удовлетворительно описываются в данном подходе. Так, 19 из 34 измеренных в реакциях ($^6\text{Li}, d$) энергий воспроизводятся с точностью выше 0.5 МэВ. Из немногих не наблюдавшихся в таких реакциях состояний, известных из спектроскопических таблиц, воспроизводятся еще 3. Соответствие одного теоретического значения нескольким наблюдаемым в эксперименте уровням легко объяснить фрагментацией за счет остаточного взаимодействия α -частичной силы по уровням произвольной природы (в том числе и со спином $S \neq 0$), близким по энергии к данному мультикластерному.

Мультикластерные состояния спектра ядра ^{20}Ne столь же успешно воспроизводятся четырёхпараметрическим гамильтонианом.

Во *втором параграфе* демонстрируются результаты расчетов мульти-альфа-частичных спектров ядра ^{16}O . Поскольку это ядро является дважды магическим, в его спектре отсутствует ротационная полоса основного состояния, другие ротационные полосы лежат высоко по энергии. Это и затрудняет задачу выделения мультикластерных состояний среди известных из эксперимента, понижает надежность идентификации и одновременно вынуждает рассчитывать энергии чрезвычайно высоко лежащих уровней, для которых характерны большие ширины, возможно проявление эффектов примешивания к мультикластерным состояниям компонент другого

Таблица 2: Экспериментальные и рассчитанные энергии уровней ядра ^{44}Ti

J^π	E^{exp}	E^{theor}	N	(λ, μ)	l	i
0^+	0.0	0.0	72	(12,0)	0	1
2^+	1.08	0.55	72	(12,0)	2	1
4^+	2.45	1.85	72	(12,0)	4	1
0^+	1.90	2.05	72	(8,2)	0	1
2^+	2.53	2.35	72	(8,2)	2	2
2^+	2.89	2.58	72	(8,2)	2	1
4^+	3.37	3.53	72	(8,2)	4	2
1^-	3.76	3.72	73	(7,3)	1	1
6^+	4.02	3.87	72	(12,0)	6	1
0^+	4.85	3.92	72	(0,6)	0	1
2^+	4.10	4.25	72	(0,6)	2	1
3^-	3.96	4.63	73	(7,3)	0	1
3^-	5.47	5.41	73	(9,2)	3	2
5^-	5.31	5.63	73	(7,3)	5	2
1^-	6.22	6.10	73	(11,1)	1	1
8^+	6.47	6.64	72	(12,0)	8	1
6^+	7.67	6.66	72	(4,4)	6	1
3^-	$\begin{cases} 7.34 \\ 7.56 \end{cases}$	7.04	73	(11,1)	3	1
1^-	8.17	7.73	73	(13,0)	1	1
3^-	$\begin{cases} 8.04 \\ 8.45 \\ \sim 8.7 \end{cases}$	8.67	73	(13,0)	3	1
5^-	9.43	8.74	73	(11,1)	5	1
5^-	9.58	10.04	73	(13,0)	5	1

типа и многих других эффектов, которые могли бы исказить спектр. Тем не менее и здесь можно констатировать удовлетворительное согласие теоретических расчетов и экспериментальных данных, что иллюстрирует рис. 3, а также величина среднеквадратичного отклонения $\sqrt{\sigma} \simeq 0.45$ расчётных результатов от экспериментальных, полученная для всех представленных 29 уровней.

В заключение главы кратко обсуждаются перспективы развитого подхода для описания и предсказаний спектров супердеформированных, квази-молекулярных и других состояний ядер.

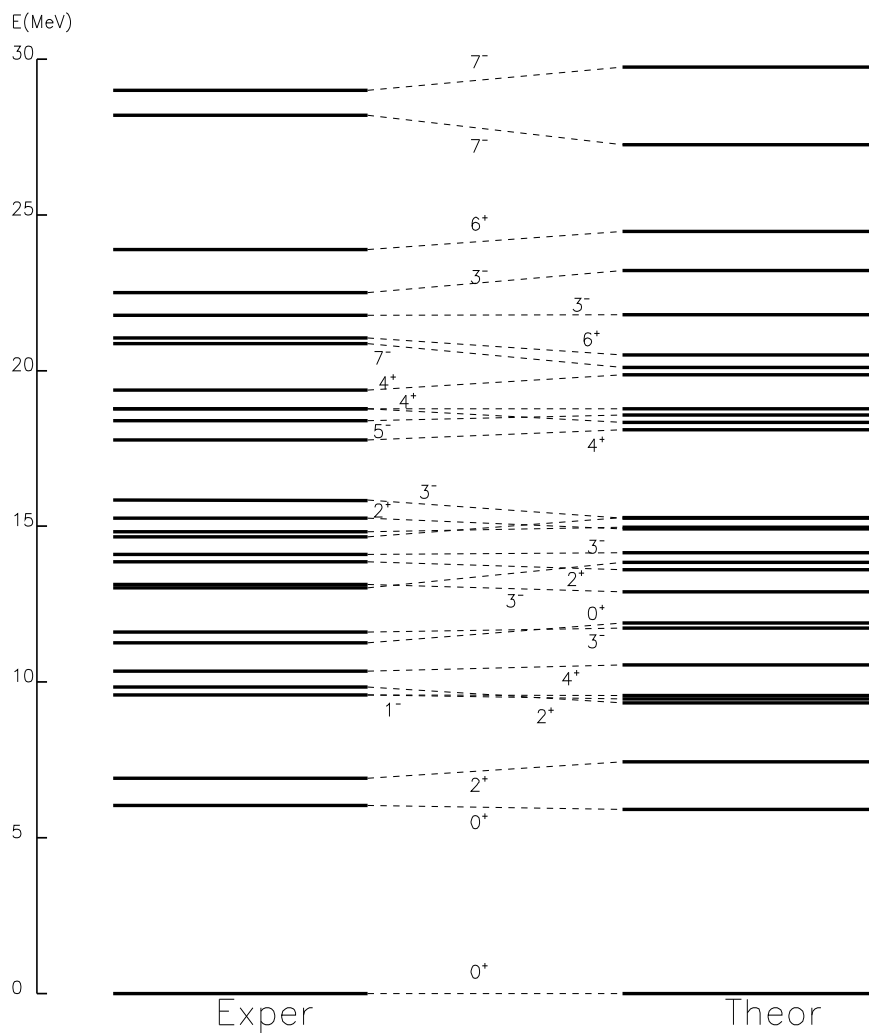


Рис. 3: Схема α -частичных уровней ядра ^{16}O

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации

1. Проанализированы правила отбора, налагаемые принципом Паули на спектр мульти-альфа-частичных состояний в обобщенной модели Эллиотта, включая множественность состояний, определяемых одними и теми же квантовыми числами. Построена классификация состояний, относящихся и не относящихся к мульти-альфа-частичным.
2. Показано, что статистика бозонов, составленных из фермионов, отличается от статистики Бозе-Эйнштейна, а также от статистики Ферми-Дирака и парастатистики. Исследованы качественные свойства систем, подчиняющихся этой статистике, в частности условия перехода ее в статистику Бозе-Эйнштейна.
3. Разработана новая концепция альфа-конденсированных состояний в атомных ядрах. Показано, что при определенной симметрии микроскопического гамильтониана альфа-конденсат может существовать при нормальной ядерной плотности.
4. Изучены альфа-бинуклонные состояния легких ядер, доказана возможность их существования. Сделано заключение, что решающим фактором образования мультикластерной структуры является $SU(3)$ и $SU(4)$ симметрия системы и формирующих ее кластеров. Рассчитаны спектры альфа-бинейтронных состояний ядер ^{10}Be и ^{12}Be . Предсказано множество не обнаруженных до сих пор уровней данного типа в этих ядрах.
5. Рассчитаны спектры мульти-альфа-частичных состояний ядер ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne и ^{44}Ti в обобщенной модели Эллиотта. Результаты расчетов хорошо воспроизводят представленные в спектроскопических таблицах экспериментальные данные. Даны многочисленные предсказания.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. I.A.Gnilozub, S.D.Kurgalin, Yu.M.Tchuvil'sky. Alpha-particle states and α -condensate in nuclear matter. Proceedings of the Second Eurasian Conference on Nuclear Science and its Applications. Almaty, Rep.Kazakhstan. 2003. V. 1. P. 163–168.
2. I.A.Gnilozub, S.D.Kurgalin, Yu.M.Tchuvil'sky. Alpha-Particle states in Extended Elliot Model. Proceedings of the Symposium on Nuclear Clusters.

- From Light Exotic to Superheavy Nuclei. Rauischholzhausen. Germany. 2002. (R. Jolos, W. Scheid eds.) Ep Systema, Debrecen, Hungary. 2003. P. 109–114.
3. I.A.Gnilozub, S.D.Kurgalin, Yu.M.Tchuvil'sky. Alpha-particle condensate in nuclear matter at normal density and statistics of composite bosons. Nucl-th. / 0405038.
 4. I.A.Gnilozub, S.D.Kurgalin, Yu.M.Tchuvil'sky. Alpha-Particle states in Extended Elliot Model Acta Physica Hungarica A. Heavy Ion Physics. 2003. V. 18. No. 2–4. P. 235–240.
 5. I.A.Gnilozub, S.D.Kurgalin, Yu.M.Tchuvil'sky. Alpha-Particle states alpha-particle condensate in nuclear matter at normal density. Proceedings of the XVIIth International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory. Moscow. Russia. 2004. P. 465–471.
 6. И.А.Гнилозуб, С.Д.Кургалин, Ю.М.Чувильский. Альфа-конденсат в ядерной материи при нормальной плотности и статистика составных бозонов. Вестник ВГУ. Сер: физика, математика. 2004. №2. С. 25–32.
 7. И.А.Гнилозуб. С.Д.Кургалин. Ю.М.Чувильский. Свойства альфа-частичных решений многонуклонной задачи. Ядерная Физика. 2006. Т. 69. 6. С.1014–1029.
 8. I.A.Gnilozub, S.D.Kurgalin, Yu.M.Tchuvil'sky. Multicluster solutions of many-nucleon problem. Nucl.Phys.A. 2007. V. 790. P. 687c–690c.
 9. Р. Вольски, И.А. Гнилозуб, С.Д. Кургалин. А.В. Синяков. Ю.М. Чувильский. Спектр мультикластерных состояний ядра ^{44}Ti в обобщенной модели $SU(3)$ Эллиотта. Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72. №9. С. 1291–1294.
 10. И.А. Гнилозуб, С.Д. Кургалин, Ю.М. Чувильский. Мультикластерные решения многонуклонной задачи и кластерные явления. Ядерная Физика. 2008. Т. 71. С. 1213–1218.

Цитируемая литература:

- C1. J.A.Wheeler. Phys.Rev. C 1937. V. 52. P.1083; 1099.
- C2. К.Вильдермут, Я.Тан. *Единая теория ядра* (Мир. Москва. 1980). С3.
- K.Varga, Y.Suzuki. Phys.Rev.C 1995. V. 52. P. 2885.

- C4. О.Ф.Немец, В.Г.Неудачин, А.Т.Рудчик и др.. *Нуклонные ассоциации в атомных ядрах и ядерные реакции многонуклонных передач* (Наукова думка. Киев. 1988).
- C5. Y.Kanada-En'yo, H.Horiuchi, A.Ono. Phys.Rev.C 1995. V. 52. P.628; 647.
- C6. S.D.Kurgalin, Yu.M.Tchuvil'sky. J.Phys. G: Nucl.Part.Phys. 1999. V. 25. P. 929.
- C7. V.Z.Goldberg, V.I.Dukhanov, A.E.Pakhomov et al.. Ядерная Физика. 1997. Т. 60. С. 1186.
- C8. J.P.Elliott. Proc.Roy.Soc., London. 1958. V. A 245. P. 128; 562.
- C9. G.Röpke, A.Schnell, P.Schuck, P.Nozieres. Phys.Rev.Lett. 1998. V. 80. P. 3177.

Подписано в печать 17 февраля 2009 г.

Формат 60x90/16

Объем 1.00 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ N 170209190

Оттиражировано на ризографе в ООО "УниверПринт"

ИНН/КПП 7728572912\772801001

Адрес: 117292 Москва, ул. Дмитрия Ульянова, д. 8, корп. 2

Тел. 7407647, 1252273

<http://www.univerprint.ru>