

К-418

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

4 - 9696

КИНЧАКОВ
Владимир Семенович

ЭНЕРГИИ И ФОРМФАКТОРЫ
РОТАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ АЛЬФА-КЛАСТЕРНЫХ ЯДЕР

Специальность 1.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1976

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук старший научный
сотрудник В.К.Лукьянов.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук Ю.Ф.Смирнов,
кандидат физико-математических наук В.И.Фурман.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт теоретической физики АН УССР, Киев.

Защита диссертации состоится " " 1976 года
на заседании специализированного совета К-56 ЛТФ ОИЯИ,
Дубна, Московской области.

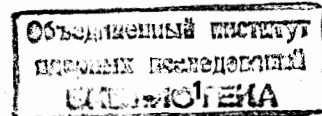
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Автореферат разослан " " 1976 года.

Ученый секретарь совета
кандидат физико-математических наук

В.И.ЖУРАВЛЕВ

Одной из интересных и важных проблем современной ядерной физики остается проблема альфа-кластеризации атомных ядер. Несмотря на богатую историю развития теории альфа-кластеризации, начатой с работы Уиллера 1937 года, и дальнейшие исследования этого вопроса на базе, в основном, феноменологических моделей, что позволило понять основные черты этого явления, только в последние годы удалось поставить и решить ряд вопросов этой проблемы на основе последовательных микроскопических подходов к описанию структуры таких $4N$ - ядер. Особенности развития этого вопроса в последние годы связаны, с одной стороны, с появлением новых, весьма точных экспериментальных данных (в частности, с появлением прецизионных измерений формфакторов рассеяния электронов для основных и возбужденных состояний таких ядер), а с другой - с возросшими техническими возможностями теории: возможностями проведения расчетов этих характеристик на мощных вычислительных машинах.

Сейчас, по-видимому, одной из наиболее последовательных микромоделей таких ядер является модель Бринка ^{/1/}. В основе ее лежит удачное построение многочастичных вариационных функций состояний ядра, которые допускают простую возможность нуклонам кластеризоваться относительно выбранных из соображений максимальной симметрии геометрических центров в ядре. Расчет энергий ведется на основе парных NN - сил. Таким образом модель сочетает в себе возможность работать непосредственно с NN - силами, не привлекая концепции феноменологического среднего поля, с возможностью широко варьировать классы многочастичных антисимметризованных пробных функций ядра.



Вместе с тем сложившиеся в этой подходе традиции в значительной мере себя уже исчерпали ^{1/2/} и для выхода на уровень сравнения с современными экспериментами требуют существенных модификаций. Так, появление новой экспериментальной информации о формфакторах $4N$ - ядер в области больших переданных импульсов поставило новые задачи перед моделью. Оказалось, что традиционно используемые гауссовские волновые функции нуклонов не описывают поведения формфакторов в этой области. Детальное изучение этого вопроса, а также пример расчета формфакторов ядра ^{12}C ^{1/3/} показывают, что указанные особенности в значительной мере можно интерпретировать, если модель Бринка модифицировать за счет введения пробных функций реалистической асимптотики.

Обычно в микроскопических моделях атомного ядра главное место занимает вариационные расчеты энергий связи, на основе которых делают заключения о волновых функциях ядерных состояний. В данной же диссертации упор сделан на исследование формфакторов ядер, а именно, формфакторов ротационных состояний ядер альфа-кластерного типа: ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{40}Ca . Их анализ приводит к заключениям о характере кластеризации, в которых отсутствует элемент неопределенности, связанный с выбором нуклон-нуклонных сил. Рассматриваются вопросы теоретической интерпретации экспериментально наблюдаемых особенностей в поведении формфакторов $4N$ - ядер. Исследован также ряд вопросов, связанных с расчетом энергий альфа-кластерных ядер, в частности, те модификации теории и результаты соответствующих вычислений, которые вызваны введением нового базиса пробных функций, имеющих реалистическую асимптотику.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и математических дополнений.

Во введении дан обзор литературы по исследованию эффектов кластеризации легких ядер на основе анализа энергий, формфакторов и альфа-распадных ширин атомных ядер P - и Sd -оболочек с числом нуклонов, кратным четырем. Излагаются результаты анализа этих характеристик как в альфа-частичной модели, так и в более общих альфа-кластерных подходах, учитывающих спин-орбитальное взаимодействие, поляризацию и "угловые" колебания альфа-кластеров.

В первой главе обсуждаются основные положения альфа-кластерной модели Бринка с проектировкой. Здесь же устанавливаются правила отбора для выбранных альфа-структур. Строго говоря, основой выбора альфа-конфигураций являются вариационные расчеты энергий связи. Однако для ядер Sd -оболочки проведение подобных расчетов в широком масштабе затруднено (по сравнению со случаем P -оболочки) из-за того, что число вариационных параметров возрастает. Поэтому для выбора альфа-структур ядер Sd -оболочки приходится использовать ряд других соображений. В наших работах были выбраны структуры, установленные в альфа-частичной модели ^{1/4/}, где главным критерием являлась возможность классификации наибольшего числа экспериментально наблюдаемых состояний с изоспином $T=0$ как ротационных серий, построенных на соответствующих нормальных колебаниях. Таким образом, были выбраны следующие структуры: тетраэдр для ядра ^{16}O , группа симметрии T_d ; искаженный тетраэдр для ядра ^{20}Ne , группа симметрии D_{2d} ; битетраэдр для ядра ^{24}Mg , группа симметрии D_{2h} ;

D_{3d} - структура для ядра ^{28}Si ; D_{3h} - структура для ядра ^{32}S и $T_d + O_h$ симметрий для ^{40}Ca (тетраэдр внутри октаэдра).

Вопросу выделения движения центра масс в многочастичной кластерной функции посвящен § 9. В последних двух параграфах излагаются схемы расчета энергий вращательных состояний и формфакторов рассеяния электронов.

Во второй главе обосновывается введение в модель пробных одночастичных симметризованных ферми-функций нуклонов

$$U_{sf} = \left(ch \frac{R_{\alpha i}}{\beta_{\alpha i}} + ch \frac{(\vec{r} - \vec{R}_i)^2}{\beta_{\alpha i}} \right)^2, \quad (1)$$

где R_i , $R_{\alpha i}$, $\beta_{\alpha i}$ определяют соответственно местоположение альфа-кластера, радиус и ширину области полуспада нуклонной функции относительно центра альфа-кластера. В отличие от обычно используемых гауссовских функций

$$U_G = \exp\left[-\frac{(\vec{r} - \vec{R}_i)^2}{2\beta_i^2}\right] \quad (2)$$

они обладают правильной, экспоненциальной асимптотикой, что весьма существенно в задачах рассеяния. В связи с этим даны математические разработки по вычислению одночастичных и двухчастичных матричных элементов соответствующих операторов микроскопического гамильтониана и плотности заряда. Отмечается ряд особенностей, связанных с вычислением двухчастичных матричных элементов с функциями реалистической асимптотики. В этой же главе проведено обобщение модели Бринка на основе предположения, что размеры альфа-кластеров, находящихся в геометрически неэквивалентных позициях могут быть разными.

Анализ экспериментальных формфакторов упругого и неупругого рассеяния электронов на базе альфа-кластерной модели дан в главе III. В параграфе I7 сделан переход к частному случаю адиабатического приближения, что значительно упрощает расчеты как энергий, так и формфакторов вращательных состояний, а также переход к наиболее простому частному случаю - альфа-частичной модели. Непосредственными расчетами формфакторов вращательных состояний 0^+ , 2^+ ядра ^{20}Ne показано, что неадиабатичность вращения заметно сказывается лишь при малой кластеризации. В то же время расчет без учета эффектов антисимметризации между нуклонами из различных кластеров (альфа-частичная модель) значительно отличается от точного результата, особенно в случае одночастичных функций экспоненциальной асимптотики. Анализ современных экспериментальных данных, проведенный в работах /5/, /6/, показывает, что наилучшая подгонка к экспериментальным формфакторам осуществляется для пробных функций нуклонов с экспоненциальной асимптотикой. В этом случае согласие с экспериментом получается не только в области малых переданных импульсов $q < 2 \text{ ф}^{-1}$, что возможно сделать как для гауссовских функций, так и в рамках альфа-частичной модели, но и в области больших q , вплоть до предельного в известных пока экспериментах $q \sim 3,5 \text{ ф}^{-1}$. Характер полученного согласия с экспериментом показан на рис. I, где в качестве примера даны формфакторы ядра ^{28}Si .

На основе анализа формфакторов группы $4N$ - ядер было, в частности, показано, что ядро ^{20}Ne в основном состоянии слабо кластеризовано; ядро ^{16}O фактически не кластеризовано; ядро ^{24}Mg близко к альфа-частичному, причем альфа-кластерная

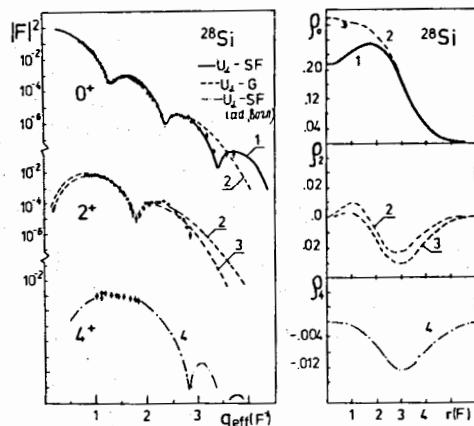


Рис.1. Формфакторы ядра ^{28}Si и соответствующие распределения плотности заряда и перехода.

конфигурация имитирует вытянутое неаксиальное ядро; ядро ^{28}Si имеет альфа-кластерную природу, при этом альфа-кластеры сильно "размыты", особенно центральный; относительно ядра ^{40}Ca пока можно лишь сказать, что предположение о его альфа-кластерной природе не противоречит возможности соответствующего описания зарядовых формфакторов. Что касается ядра ^{32}S , то найденные для него из сравнения с экспериментом распределения плотности заряда и плотности перехода и вычисленные на этой основе контурные линии распределения плотности заряда ясно показывают, что в возбужденном состоянии 3^- оно имеет молекулярно-подобную структуру (два равных осколка). Для всех ядер оказывается, что в возбужденных состояниях кластеризация усиливается, причем альфа-кластеры становятся

более компактными и часто приближаются по своим размерам к свободной альфа-частице. В этих состояниях должны играть важную роль эффекты взаимодействия колебаний альфа-кластеров и вращения ядра как целого.

Расчеты показывают, что модель не может дать однозначного описания формфакторов нижайших состояний ядер p -оболочки. Для возбужденных состояний с $J = 3, 4$ ядер sd -оболочки такая неоднозначность исчезает: удается найти лишь по одному набору параметров, объясняющему соответствующие эксперименты по неупругому рассеянию электронов.

Значительное место в главе III уделено вопросам интерпретации особенностей поведения зарядовых формфакторов альфа-кластерных ядер. Удалось аналитически показать, что с гауссовскими пробными функциями борновский формфактор в модели Бринка можно факторизовать на структурный и формфактор альфа-кластера:

$$F_G(q, R_i, \beta) = F_\alpha(q, \beta) F_A(q, R_i, \beta). \quad (3)$$

Для функций реалистической асимптотики подобная факторизация имеет место лишь в пределе альфа-частичной модели, что не позволяет интерпретировать экспериментально наблюдаемые дополнительные минимумы в зарядовых формфакторах ядер ^{16}O , ^{28}Si , ^{32}S , ^{40}Ca при $q \sim 3, 4 \text{ ф}^{-1}$ как точные "копии" минимумов в формфакторе альфа-частицы, как это делалось в /7/.

Резюмируя изложенные в § 20 результаты /8/, подчеркнем следующее:

- а) первые минимумы в формфакторах всех ядер являются "размерными": они чувствительны к размерам всего ядра как целого и слабо зависят от его внутренней структуры;
- б) вторые минимумы в формфакторах ядер sd -оболочки можно

считать структурными, в альфа-кластерной модели их положение весьма чувствительно к взаимному расположению внутренних и внешних кластеров ядра;

в) особенности поведения формфакторов при больших переданных импульсах $q \simeq 3,1 + 3,4 \text{ Ф}^{-1}$ модель Бринка связывает с наличием в этих ядрах образований альфа-кластерной природы.

Четвертая глава диссертации посвящена анализу энергий связи вращательных состояний в зависимости от выбора альфа-конфигураций, нуклон-нуклонных сил и одночастичных волновых функций. В § 27 выполнены численные расчеты энергий связи ротационных состояний ядер sd -оболочки с гауссовскими пробными функциями нуклонов /9/. Оказалось, что для ядра ^{20}Ne более предпочтительной является треугольная бипирамидальная конфигурация альфа-кластеров. Для сил № 2 Волкова /10/ расчеты для D_{2h} -структуры ^{24}Mg (битетраэдр) приводят к энергии связи и среднеквадратичному радиусу, близким к экспериментальным значениям. Обнаружено метастабильное состояние D_{3h} -структуры ядра ^{32}S . Матричный элемент перекрытия волновой функции этого состояния с волновой функцией основного состояния равен 0,618. Общее же замечание, касающееся всех ядер, состоит в том, что минимум энергии реализуется при одинаковых размерах альфа-кластеров. В то же время анализ формфакторов этих ядер указывает на существенно разные размеры центрального и периферийных кластеров в структурах D_{2d} ядра ^{20}Ne и D_{3d} ядра ^{28}Si . Возможно, это различие исчезнет, если в расчетах учесть поляризацию альфа-кластеров.

Для вычисления энергий вращательных состояний с одночастичными функциями реалистической асимптотики применяется разложение последних по традиционно используемым гауссовским функциям.

С помощью этого разложения обосновано приближение полуэмпирической факторизации /5/ при исключении движения центра масс атомного ядра ^4He . Отметим, что предложенный метод учета движения центра масс ядра ^4He в модели с функциями реалистической асимптотики в отличие от общепринятого /11/ не требует вычисления генеалогических коэффициентов. Непосредственными расчетами показано, что энергии вращательных состояний близки к тем, что были получены ранее в гауссовском приближении /2/, /9/. Параметры волновых функций, найденные в результате вариационных расчетов энергий, согласуются с теми, которые были получены в анализе формфакторов рассеяния электронов. Показано, что учет экспоненциальной асимптотики одночастичных функций приводит к эффективной поляризации альфа-кластеров (рис.2) /12/.

В § 29 метод генераторных координат применяется для рассмотрения радиальных колебаний альфа-кластеров в ядре ^{12}C /13/.

С помощью найденных решений уравнения Хилла-Уиллера

$$\int \{ \langle V(\vec{R}_i) | H | V(\vec{R}_i) \rangle - E \langle V(\vec{R}_i) | V(\vec{R}_i) \rangle \} C(\vec{R}_i) dR_i = 0 \quad (4)$$

выявлено влияние колебаний альфа-кластеров радиального типа на зарядовые формфакторы рассеяния электронов. Рассматриваемые нуклон-нуклонные силы Бринка /14/ и силы № 2 Волкова приводят к большим амплитудам таких колебаний, что не позволяет описать экспериментальные формфакторы рассеяния электронов.

Подводя итог, нужно отметить, что в целом выводы, полученные об альфа-кластерной структуре ядер на основе расчетов энергий вращательных состояний с нуклон-нуклонными силами № 2 Волкова, согласуются с результатами, полученными в главе III в результате анализа зарядовых формфакторов.

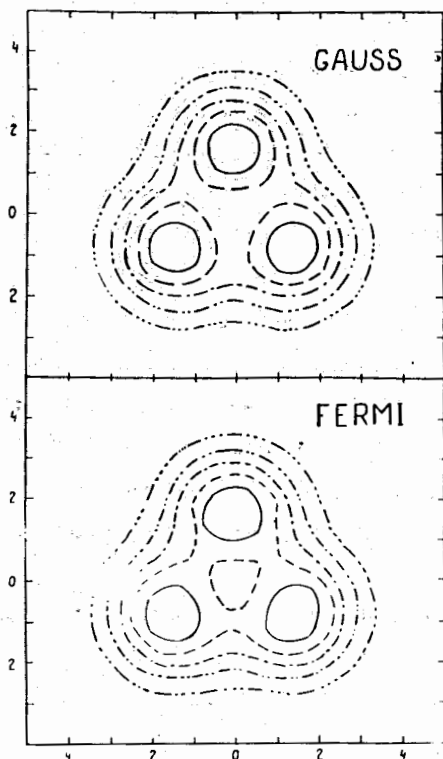


Рис. 2. Контурные линии распределений плотности в ядре I_{2C} , рассчитанные с использованием как гауссовских, так и симметризованных ферми-функций. Параметры волновых функций зафиксированы расчётами энергии связи ядра в адиабатическом приближении с нуклон-нуклонными силами $\mu 2$ Волкова. Единицы измерения по осям - ферми.

В заключение кратко обсуждаются полученные в диссертации результаты и даны выводы.

В математических дополнениях излагается техника работы с проектируемыми многочастичными функциями и рассматривается вычисление матричных элементов перекрытия, одночастичного и двухчастичного операторов с функциями альфа-кластерной модели.

Основные материалы диссертации были представлены и докладывались на всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Харьков, 1974; Ленинград, 1975; Баку, 1976), Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (США, Санта-Фе, июнь 1975) и опубликованы в работах /5-6/, /8-9/, /12-13/.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.M.Brink. Intern. School of physics "Enrico Fermi", course XXXVI (1965).
2. A.Arima, N.Takigawa. Nucl. Phys., A168, 593 (1971).
3. Е.В.Инопин, В.К.Лукьянов, Ю.С.Поль. ЯФ, 19, 987 (1974).
4. P.S.Hauge, S.A.Williams, G.H.Duffey. Phys. Rev., v. C4, 1044 (1971).
5. Е.В.Инопин, В.С.Кинчаков, В.К.Лукьянов, Ю.С.Поль. Изв. АН СССР, сер. физ., 39, 55 (1975).
6. E.V.Inopin, V.S.Kinchakov, V.K.Lukyaynov, Yu.S.Pol. Abstracts of Contributed Papers, Sixth International conf. on High Energy Phys. and Nucl. Struct., Santa Fe and Los Alamos, p. 260, 1975.
7. L.J.McDonald, H.Uberall, S.Numrich. Nucl. Phys., A147, 541 (1970).
8. Е.В.Инопин, В.С.Кинчаков, В.К.Лукьянов, Ю.С.Поль. Препринт ОИЯИ, Р4-7874, Дубна, 1974.
9. В.С.Кинчаков. Изв. АН СССР, сер. физ., 40, 150 (1976).
10. A.B.Volkov. Nucl. Phys., 74, 33 (1965).
11. В.Г.Неудачин, Ю.Ф.Смирнов. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. М., Наука, 1969.
12. В.С.Кинчаков. Тезисы XXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 27, 1976.
13. В.С.Кинчаков. Изв. АН СССР, сер. физ., 39, 2112 (1975).
14. D.M.Brink, E.Boeker. Nucl. Phys., A91, 1 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел 8 апреля 1976 года.