

Д - 198

УДК 539.142/143

4-85-812

Дао Тиен Кхоа

РАССЕЯНИЕ γ -КВАНТОВ И ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
НА СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ
В КВАЗИЧАСТИЧНО-ФОНОННОЙ МОДЕЛИ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.В. ВОРОНОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.М. КОЛОМИЦ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.А. КНАТЬКО

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ, Москва.

Автореферат разослан "20" 11 1985 года

Защита диссертации состоится "26" 12 1985 года на заседании Специализированного совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И. ЖУРАВЛЕВ

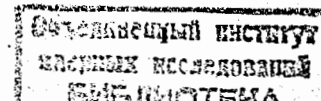
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем

В последние годы в связи с развитием экспериментальной ядерной физики структура ядра интенсивно исследуется в различных реакциях взаимодействия γ -квантов, электронов, протонов, а также тяжелых ионов с ядрами. Часто для описания таких реакций привлекаются различные ядерные феноменологические модели. Однако общим недостатком таких моделей является большое число подгоночных параметров, физический смысл которых не всегда ясен. Этим и ограничивается предсказательная сила феноменологических подходов. Поэтому весьма актуальным является микроскопический подход к описанию различных реакций. Существенный прогресс в этом направлении был достигнут в последние годы в связи с построением микроскопических ядерных моделей для описания ядерных характеристик в широком интервале энергии возбуждения. Одной из таких моделей является квазичастично-фононная модель ядра (КФМ), которая была сформулирована на основе развития и обобщения сверхтекучей модели ядра.

Несмотря на то, что в рамках КФМ удалось описать широкий круг экспериментальных данных по спектроскопии тяжелых сферических ядер, представляется необходимым дальнейшее совершенствование аппарата КФМ, т.к. на первых этапах в формализм модели не были включены некоторые физические эффекты, роль которых в ряде случаев может оказаться важной. Например, в полученных ранее уравнениях и конкретных расчетах в рамках КФМ для нечетных сферических ядер не были учтены ни ангармоничность фононных возбуждений четно-четного остова, ни поправки на принцип Паули, возникающие из-за фермионной структуры фононных операторов. Указанные эффекты могут оказывать заметное влияние на фрагментацию состояний "квазичастица + фонон".

В последние годы стали доступны γ -лучи высокой монохроматичности, которые позволяют проводить эксперимент по упругому и неупругому рассеянию γ -квантов на низколежащих коллективных состояниях и также гигантских резонансах в ядрах. Поскольку электрические дипольные возбуждения (Е1) доминируют в фотоядерных процессах, упругое рас-



сеяние γ -квантов является очень удобным для изучения ЕИ-возбуждений в ядре, включая гигантский дипольный резонанс (ГДР). Результаты анализа экспериментальных данных на основе феноменологической коллективной модели показали, что эти данные описываются не всегда правильно, причем такие важные характеристики, как парциальные ширины для состояний, формирующих ГДР в ядре, вводились в схему таких расчетов феноменологически как подгоночные параметры. Поэтому весьма актуально и интересно развить микроскопический подход к описанию таких процессов, где и радиационные ширины Γ_γ для ЕИ-состояний, лежащих ниже нейтронного порога и ширины для состояний, формирующих ГДР, должны быть микроскопически определены из структуры этих ЕИ-возбуждений и их взаимодействия с другими модами возбуждения в ядре. Измерение парциальных ширин ЕИ-переходов для некоторых низколежащих дипольных состояний, возбуждаемых при рассеянии γ -квантов, указало на возможную двухфононную природу этих состояний и поставило вопрос об интерпретации структуры таких 1^- -состояний.

Неупругое рассеяние протонов является очень важным источником информации о структуре возбуждений различной природы в ядрах, особенно для электрических возбуждений, которые рассматриваются в настоящей диссертации и для которых величины приведенных вероятностей переходов $B(E\lambda)$ сильно коррелируют с величинами сечений (σ , σ') реакции. В последние годы, в связи с развитием ускорительной техники, экспериментальное изучение столкновения тяжелых ионов (ТИ) проводится весьма интенсивно, и реакции, вызываемые налетающими ионами с массой $A \leq 30$, исследуются с довольно хорошим экспериментальным разрешением. При неупругом рассеянии протонов и ТИ энергий до нескольких десятков МэВ/нуклон, обычно наблюдается возбуждение различных низколежащих коллективных состояний в ядрах. Причем многие из них имеют сложную структуру типа двухфононной или смеси одно- и двухфононных конфигураций. Экспериментальные данные не всегда удается анализировать в рамках простых феноменологических коллективных моделей, а именно, результаты анализов данных для многих возбужденных состояний до сих пор остаются противоречивыми. Поэтому микроскопическое изучение структуры таких состояний и описание соответствующих неупругих сечений реакции являются очень актуальными в настоящее время.

Целью работы является дальнейшее развитие аппарата КФМ для нечетных сферических ядер с учетом требования принципа Паули и ангармоничности фононных возбуждений четно-четного остова, а также применение КФМ для микроскопического описания рассеяний γ -квантов, протонов и ТИ на сферических ядрах с возбуждением состояний натуральной четности в широком интервале энергии.

Научная новизна и практическая ценность

В диссертации продемонстрированы широкие возможности КФМ в применении к микроскопическому изучению таких различных реакций, как рассеяние γ -квантов, где возбуждение состояний в ядре происходит только через посредство электромагнитного взаимодействия и неупругое рассеяние протонов и ТИ, где механизм возбуждения включает в себя и сильное и электромагнитное взаимодействия.

Новым вкладом является дальнейшее развитие аппарата КФМ для нечетных сферических ядер. Получена наиболее общая система уравнений модели, в которых учитываются связь одноквaziчастичных состояний с конфигурациями типа "квaziчастица + фонон" и "квaziчастица + два фонона", требование принципа Паули и ангармоничность фононных возбуждений четно-четного остова.

На основе КФМ разработан подход для микроскопического описания сечения упругого рассеяния γ -квантов на сферических ядрах при низких энергиях и энергиях в области ГДР. В этом подходе и ширины радиационного распада Γ_γ для состояний, лежащих ниже нейтронного порога, и парциальные ширины для ЕИ-состояний, формирующих ГДР, рассчитываются микроскопически. Без каких-либо подгоночных параметров было дано микроскопическое описание упругого фоторассеяния на ряде тяжелых сферических ядер с возбуждением ЕИ-состояний в широком интервале энергии. Исследована природа нижайших дипольных состояний, наблюдавшихся на эксперименте по фоторассеянию на ряде ядер.

Развит единый подход к микроскопическому анализу рассеяния протонов и ТИ на сферических ядрах с возбуждением одно- и двухфононных состояний в ядрах-мишенях. Результаты расчетов для упругих и неупругих сечений реакций хорошо воспроизводят экспериментальные данные. Обсуждены влияния сложной микроскопической структуры возбужденных состояний на сечения реакций. Подчеркнуты надежность и новые возможности КФМ при одновременном микроскопическом описании структуры возбужденных состояний в ядрах и соответствующих сечений возбуждений.

Апробация диссертации

Основные материалы диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, XXIV всесоюзной конференции по ядерной спектроскопии и структуре атомных ядер (Алма-Ата, 1984г.), X международной конференции "Частицы и ядра"

(Гейдельберг, ФРГ, 1984 г.) и УП конференции Европейского физического общества (Албена, НРБ, 1985 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано восемь работ.

Объем работ

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения; она содержит 135 страниц машинописного текста, 27 рисунков, 9 таблиц и библиографический список литературы из 140 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложены актуальность и важность исследуемых в диссертации проблем. Дана общая характеристика квазичастично-фононной модели ядра. Представлен сжатый обзор результатов исследований, выполненных в диссертации.

В первой главе сформулированы основные положения квазичастично-фононной модели применительно к тяжелым сферическим ядрам и приведена наиболее общая система уравнений модели для нечетных сферических ядер.

В § 1 описывается гамильтониан КФМ, который включает средние поля для нейтронов и протонов в виде потенциалов Вудса-Саксона; монопольные силы спаривания, действующие только между нейтронами и между протонами; изоскалярные и изовекторные мультипольные и спин-мультипольные взаимодействия, генерирующие ядерные возбуждения. Кратко изложена процедура параметризации гамильтониана КФМ. Приведены уравнения модели в приближении случайных фаз (ПСФ) для определения энергии и структуры однофононных E_1 -состояний. Дан явный вид гамильтониана КФМ в терминах операторов рождения и уничтожения квазичастиц и фононов.

В § 2 приведены основные уравнения для четно-четных сферических ядер, которые широко используются для описания обусловленных фрагментацией однофононных или двухквазичастичных состояний свойств ядер. Обсуждена роль поправок, возникающих из-за требования принципа Паули, в этих уравнениях.

В § 3 кратко изложен метод силовых функций, являющийся эффективным инструментом при изучении фрагментации малоквазичастичных компонент волновых функций ядер и вычислении усредненных по некоторому энергетическому интервалу ядерных характеристик, непосредственно связанных с такими компонентами.

§ 4 посвящен дальнейшему развитию аппарата КФМ для нечетных сферических ядер. Исходя из модельной волновой функции для возбужденных состояний нечетных сферических ядер вида:

$$\Psi_{\nu}(JM) = C_{J\nu} \left\{ \alpha_{JM}^{+} + \sum_{\lambda ij} D_J^{\lambda i}(J\nu) [\alpha_{jm}^{+} Q_{\lambda \mu i}^{+}]_{JM} + \sum_{\lambda_1 \lambda_2 i_2 j} F_{J\lambda}^{\lambda_1 \lambda_2 i_2}(J\nu) [\alpha_{jm}^{+} [Q_{\lambda_1 \mu_1 i_1}^{+} Q_{\lambda_2 \mu_2 i_2}^{+}]_{\lambda \mu}]_{JM} \right\} \Psi_0, \quad (I)$$

где α_{jm}^{+} и $Q_{\lambda \mu i}^{+}$ — операторы рождения квазичастицы и фонона, соответственно; Ψ_0 — волновая функция основного состояния четно-четного остова, получена наиболее общая система уравнений КФМ для нечетных сферических ядер, из которой могут быть выведены все приближенные уравнения модели, широко применявшиеся при расчетах многих характеристик нечетных ядер. Сделаны качественные оценки поправок, возникающих из-за требования принципа Паули. Показано, что учет точных коммутационных соотношений автоматически исключает из рассмотрения ложные состояния, нарушающие принцип Паули.

В конце главы приведены выводы.

Вторая глава посвящена микроскопическому описанию возбуждения низколежащих дипольных состояний и ГДР при рассеянии γ -квантов на тяжелых сферических ядрах.

В § 1 дано краткое введение в рассматриваемую проблему. На основе теории возмущений во втором порядке по взаимодействию между фотоном и ядром, получены основные формулы для дифференциального сечения дипольного фоторассеяния, которые учитывают когерентные вклады в сечение от всех возбуждаемых $E1$ -состояний в данном интервале энергии.

В § 2 этот подход применяется для описания дипольного фоторассеяния на тяжелых сферических ядрах области свинца при энергиях ниже нейтронного порога. Получен реалистичский одночастичный спектр в ^{208}Pb путем модификации одночастичного спектра, рассчитанного с помощью потенциала Вудса-Саксона, так, чтобы одновременно воспроизводились характеристики низколежащих уровней в ^{208}Pb и ядрах, отличающихся от него на один нуклон. Далее проведен расчет дифференци-

альных сечений упругого фоторассеяния (γ , γ') на ядре ^{208}Pb и соседних нечетных ядрах с модифицированным одночастичным спектром. Объяснено существование подструктур в низкоэнергетической области в сечении фоторассеяния. Рассчитаны интегральные сечения фоторассеяния, которые дают качественно правильное распределение дипольной силы в ядрах области свинца.

В § 3 исследована структура нижайших дипольных состояний, наблюдавшихся в экспериментах по фоторассеянию на ряде изотопов в области $N = 82$. Показано, что эти состояния имеют доминирующую двухфононную структуру. Проведен теоретический расчет вероятности $V(E1; I \rightarrow 0_{\text{осн}}^+)$ для этих дипольных состояний. Дано микроскопическое объяснение наблюдавшейся на эксперименте специфической зависимости величины $V(E1)$ от числа нейтронов вблизи $N = 82$. Предсказаны существования подобных состояний в изотопах Zr и изотонах с $N = 32$.

В § 4 дано микроскопическое описание сечения упругого фоторассеяния на сферических ядрах с возбуждением ГДР. Предложен метод вычисления ширин дипольных состояний в области ГДР. При помощи микроскопически рассчитываемых ширин без каких-либо подгоночных параметров проведены расчеты дифференциальных сечений упругого фоторассеяния (γ , γ') на ГДР в ряде сферических ядер. Результаты расчетов хорошо воспроизводят наблюдаемую на эксперименте энергетическую зависимость и абсолютные значения сечений. Продемонстрирована важность влияния процесса фрагментации дипольных состояний в области ГДР на структуру рассчитываемых сечений.

В конце главы представлены выводы.

Третья глава посвящена микроскопическому изучению упругого и неупругого рассеяния протонов и тяжелых ионов при энергиях до нескольких десятков МэВ/нуклон.

В § I даны основные положения теоретического подхода к микроскопическому изучению ядерных возбуждений при неупругом рассеянии протонов и ТИ. В рамках КФМ, с помощью следующей волновой функции для возбужденных состояний в четно-четных ядрах:

$$\Psi_y(JM) = \left\{ \sum_i R_i(J_y) Q_{JM_i}^+ + \sum_{\substack{\lambda_1 \lambda_2 \\ i_1 i_2}} P_{\lambda_2 i_2}^{\lambda_1 i_1}(J_y) [Q_{\lambda_1 i_1}^+ Q_{\lambda_2 i_2}^+]_{JM} \right\} \Psi_0, \quad (2)$$

получены формулы для ядерных переходных плотностей, которые используются в численных расчетах микроскопических неупругих формфакторов. Кратко изложена схема расчета ядерных плотностей в методе гипersферических функций для налетающих ионов. Обсужден выбор эффективного нуклон-нуклонного взаимодействия между нуклоном в налетающей частице и нуклоном в ядре-мишени.

В § 2 данный подход применяется для микроскопического описания упругого и неупругого рассеяния протонов разных энергий на мишенях ^{58}Ni , ^{90}Zr и ^{208}Pb . Результаты расчетов показали, что экспериментальные сечения (p , p') с возбуждением низколежащих коллективных состояний, имеющих доминирующую однофононную структуру, хорошо описываются в приближении искаженных волн с формфакторами, рассчитанными с помощью ядерных переходных плотностей, полученных в приближении случайных фаз. На примере состояния 4_1^+ в ядре ^{58}Ni показано, что данные для сечения возбуждения состояния более сложной структуры, типа смеси одно- и двухфононных конфигураций, можно описывать в методе связанных каналов с формфакторами, рассчитанными с помощью волновой функции (2).

В § 3 подход применяется для микроскопического изучения упругого и неупругого рассеяния тяжелых ионов на разных тяжелых сферических мишенях. Выполнены расчеты сечений рассеяния $^{3,4}\text{He}$, ^6Li , ^{12}C и ^{16}O ионов на четно-четных сферических ядрах с возбуждением однофононных состояний в последних. Обсуждены различные проявления структуры волновых функций исследованных ядер в рассчитываемых сечениях реакций. Проведено теоретическое исследование интерференции между кулоновским и ядерным взаимодействиями при рассеянии ТИ. Результаты расчетов для сечений реакций сравниваются с экспериментальными данными и некоторыми результатами расчетов других моделей. Анализ сечений неупругого рассеяния ТИ показал, что используемая в КФМ процедура выбора констант при построении фононного базиса оказывается вполне оправданной.

Глава заканчивается выводами.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

Основные результаты, выдвигаемые для защиты:

1. В рамках КФМ, с использованием точных коммутационных соотношений между квазичастичными и фононными операторами, получена наиболее общая система уравнений модели для нечетных сферических ядер, в которых учитываются конфигурации по сложности от одноквазичастичной до "квазичастица + два фонона", а также требование принципа Паули и ангармоничность фононных возбуждений четно-четного остова. Показано, что из полученной нами системы уравнений могут быть выведены все приближенные уравнения КФМ для нечетных сферических ядер.

2. Проведены исследования упругого рассеяния γ -квантов на ряде сферических ядер с возбуждением электрических дипольных состояний в широком интервале энергии. Показано, что учет фрагментации диполь-

ных однофононных состояний по более сложным конфигурациям позволяет рассчитывать дифференциальные сечения упругого фоторассеяния без каких-либо свободных параметров, что составляет основу для полного микроскопического понимания этих процессов.

3. Продемонстрировано, что подструктуры в сечении фоторассеяния на ядрах области свинца в энергетическом интервале ниже нейтронного порога, обусловлены низколежащими дипольными пикми-резонансами в $206,208 \text{ Pb}$, существование которых объясняется оболочечной структурой этих ядер. Влияние этих пикми-резонансов также проявляется в сечениях фоторассеяния на соседних нечетных ядрах.

4. Показано, что волновые функции для нижайших 1^- состояний в ряде сферических ядер имеют доминирующую двухфононную компоненту $[2_1^+ \otimes 3_1^-]_{1^-}$. Установлено, что специфическая зависимость вероятности дипольных γ -переходов на эти состояния от числа нуклонов волизи магических чисел обусловлена конкуренцией протонного и нейтронного вкладов из-за спаривательных эффектов и усиления коллективизации 2_1^+ и 3_1^- уровней при переходе от магического числа нуклонов к немагическому.

5. Результаты расчетов для сечения упругого фоторассеяния на ГДР в тяжелых сферических ядрах показали, что парциальные ширины для состояний, формирующих ГДР, в основном обусловлены взаимодействием между одно- и двухфононными конфигурациями. Исследовано влияние фрагментации однофононных дипольных состояний в области ГДР на структуру рассчитываемых сечений.

6. Развита единый подход к микроскопическому анализу упругого и неупругого рассеяния протонов и тяжелых ионов на сферических ядрах. Показано, что не только данные для сечений возбуждения однофононных состояний, но и для сечений возбуждения состояний более сложной структуры, типа смеси одно- и двухфононных конфигураций, успешно описываются в рамках данного подхода. Расчеты хорошо воспроизводят экспериментальные данные почти во всех рассмотренных случаях, что указывает на надежность КМ при описании структуры возбужденных состояний в ядрах и соответствующих сечений возбуждения.

7. Обсуждены различные проявления микроскопической структуры волновых функций исследованных ядер в рассчитываемых сечениях реакций. Результаты анализа данных для ядра ^{58}Ni показали, что состояния 2_1^+ и 3_1^- имеют доминирующую однофононную структуру, а состояние 4_1^+ представляет собой смесь одно- и двухфононных конфигураций.

8. Исследование интерференции между кулоновским и ядерным взаимодействиями при рассеянии тяжелых ионов с помощью микроскопических

зарядовых и ядерных переходных плотностей дает результаты, согласующиеся с результатами феноменологического анализа этих процессов.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Вдовин А.И., Воронов В.В., Дао Тьен Кхоа. Основные уравнения квазичастично-фононной модели ядра для нечетных сферических ядер. - ТМФ, 1985, т. 64, № 2, с.259-268.
2. Воронов В.В., Дао Тьен Кхоа. Дипольное фоторассеяние на ядрах области свинца. - Изв. АН СССР (сер. физ.), 1984, т.48, № 10, с.2008-2015.
3. Воронов В.В., Дао Тьен Кхоа, Пономарев В.Ю. Низколежащие дипольные состояния сферических ядер. - Изв. АН СССР (сер. физ.), 1984, т. 48, № 9, с.1846-1851.
4. Dao Tien Khoa, Ponomarev V.Yu., Voronov V.V. Microscopic Description of Photon Scattering by the Giant Dipole Resonances in Spherical Nuclei. - Dubna, 1985, 8p. (Preprint JINR: E4-85-148); Изв. АН СССР (сер. физ.), 1985, т.49, № II, с.2168-2172.
5. Дао Тьен Кхоа, Шитикова К.В. Микроскопический подход к описанию упругого рассеяния тяжелых ионов. - ЯФ, 1985, т.41, вып.5, с.1166-1175.
6. Dao Tien Khoa, Shitikova K.V. Microscopic Study of Elastic and Inelastic Heavy-Ion Scattering. - Dubna, 1985, 16p. (Preprint JINR: E4-85-143).
7. Dao Tien Khoa, Shitikova K.V. Microscopic Description of Light-Ion Scattering from Heavy Spherical Nuclei. - Dubna, 1985, 12p. (Communication JINR: E4-85-384).
8. Дао Тьен Кхоа, Кухтина И.Н., Пономарев В.Ю. К описанию возбуждения низколежащих одно- и двухфононных состояний в сферических ядрах при неупругом рассеянии протонов низких энергий. - Дубна, 1985, 18 с. (Препринт ОИЯИ: P4-85-720).

Рукопись поступила в издательский отдел
15 ноября 1985 года.