

Е - 799

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-81-286

ЕРШОВ
Сергей Николаевич

**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА
В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ
СТРУКТУРЫ АТОМНОГО ЯДРА**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Ф.А. Гареев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

А.В. Игнатик

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Э.Е. Саперштейн

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Государственный университет, г. Воронеж

Защита диссертации состоялась " " _____ 198 года
на заседании Специализированного ученого совета К 047.01.01
Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан " " _____ 198 года

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

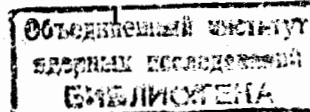
В.А. Журавлев

Общая характеристика работ

Актуальность проблемы. Использование состояний непрерывного спектра в ядерной физике связано, по крайней мере, с двумя причинами: 1. Полная система базисных функций среднего поля ядер включает как дискретный, так и непрерывный спектр, поэтому из-за наличия остаточных взаимодействий дискретные состояния системы будут содержать примеси континуума. 2. Состояния с положительной энергией являются конечными или промежуточными состояниями в реакциях при энергии возбуждения ядра выше порога вылета частиц. Они имеют новое по сравнению с дискретным спектром физическое содержание - возможность испускания нуклонов, α -частиц и т.д. Главные трудности в использовании состояний континуума связаны с непрерывностью спектра собственных значений и с тем, что волновые функции не являются квадратично-интегрируемыми во всем пространстве. Указанные аспекты использования состояний непрерывного спектра затрагивают широкий круг задач ядерной физики, поэтому актуальным является изучение влияния непрерывного спектра и оценка его важности, как в структурных расчетах, так и в расчетах ядерных реакций; создание методов и практических рекомендаций, позволяющих учитывать состояния континуума в различных ядерных моделях.

Цель работы. 1. Исследование влияния непрерывного спектра в двухнуклонных реакциях передач. 2. Исследование дискретных разложений функций континуума и изучение вопросов их сходимости. 3. Исследование свойств высоковозбужденных состояний ядер в рамках самосогласованной модели с сепарабельными остаточными силами и точным учетом одностатичного континуума.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации предложен новый метод вычисления формфакторов двухнуклонных реакций передач, основанный на замене исходных потенциалов сепарабельными с использованием функций гармонического осциллятора.



Впервые проведены расчеты сечений одновременной передачи двух нуклонов на ядрах с замкнутыми оболочками с точным учетом эффектов отдачи (*exact finite range* вычисления) с использованием функций Штурма-Лиувилля.

Предложены новые виды разложений волновых функций $\psi^{(4)}$ и S -матрицы по резонансным состояниям. Исследована сходимость разложений на большом интервале энергий и показано, что новые разложения сходятся быстрее, чем прямые миттаг-лефлеровские разложения волновой функции и S -матрицы.

Впервые с помощью точного численного решения уравнения Шредингера исследовано движение полюсов S -матрицы в потенциале Саксона-Вудса в зависимости от глубины потенциала для $l=0$ и 1 .

Предложен новый вид реальных функций Вайнберга для любых фазовых сдвигов. Получены разложения по данным функциям K и S -матриц, функций Грина, волновых функций непрерывного спектра. Установлены условия наиболее быстрой сходимости разложений. Показано, что разложения по реальным функциям Вайнберга сходятся быстрее, чем разложения по резонансным состояниям и комплексным функциям Вайнберга.

Исследованы свойства ядерных возбуждений в непрерывном спектре в рамках самосогласованной модели с эффективными сепарабельными силами и точным учетом одночастичного континуума. Показано, что интервал энергии, на котором исчерпывается энергетически взвешенное правило сумм, зависит от вида внешнего поля и мультипольности возбуждения. Предложен метод вычисления полных и частичных *escape*-ширин резонансов. Вычислены *escape*-ширины резонансов для ряда сферических ядер.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Ломоносовских чтениях Московского государственного университета, а также на международном симпозиуме по механизмам прямых ядерных реакций (Япония, 1978), международной конференции по экстремальным состояниям в ядерных системах (ГДР, 1980), 15-м совещании по ядерной спектроскопии и теории ядра (Дубна, 1978), 29 и 30-м совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Рига, 1979 и Ленинград, 1980 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано шесть статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений. Объем диссертации - 125 страниц машинописного текста, 30 рисунков, 16 таблиц. Список библиографии содержит 112 наименований.

Содержание работы

Во введении содержится краткое обсуждение вопросов, связанных с учетом влияния непрерывного спектра в ядерной физике. Сформулированы основные проблемы, исследуемые в диссертации, и кратко изложены полученные результаты.

Первая глава посвящена изучению учета влияния непрерывного спектра в двухнуклонных реакциях передач. Информация о структуре ядра входит в амплитуду реакции передач через формфакторы (интегралы перекрытия волновых функций ядер, участвующих в реакции). Известно, что реакции передач имеют поверхностный характер, основной вклад в амплитуду вносят периферийные области ядер. Формфакторы реакций срыва и подхвата на ядрах с заполненными оболочками, при пренебрежении поляризацией остова валентными нуклонами удовлетворяют уравнению

$$(\tau_1 + \tau_2 + V(\tau_1) + V(\tau_2) + V(\bar{\tau}_1) + V(\bar{\tau}_2)) \Phi(\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2) = E \Phi(\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2),$$

где E - двухчастичная энергия связи, $V(\tau_i)$ - остаточное взаимодействие между валентными нуклонами. Главная трудность решения этого уравнения состоит в том, что гамильтониан остова $(\tau_i + V(\tau_i))$ имеет как дискретный, так и непрерывный спектр, поэтому при учете остаточного взаимодействия $V(\bar{\tau}_i)$ между валентными нуклонами, формфактор будет содержать примеси континуума, которые в основном определяют его асимптотическое поведение.

Известны два метода ^{1,2)}, позволяющие вычислять формфакторы реакций передач с достаточной точностью как внутри ядра, так и в асимптотической области. Они основаны на использовании разложений по полным дискретным наборам базисных функций: функциям гармонического осциллятора и функциям Штурма-Лиувилля.

Использование разложений по функциям гармонического осциллятора имеет существенный недостаток - медленная сходимость метода на больших расстояниях, что приводит к необходимости использовать огромное (~ 500) число базисных функций.

В первом параграфе предлагается новый метод вычисления формфакторов двухнуклонных реакций передач, в котором устраняется указанный недостаток. Он основан на сепарабельном представлении операторов взаимодействия с использованием функций гармонического осциллятора. Показывается, что формфакторы, полученные в новом методе, имеют точную "трехчастичную" и приближенную "двухчастичную" асимптотику (по терминологии работы ³⁾). Возможность метода иллюстрируется на примере вычисления формфакторов в реакциях передач с участием ионов кислорода (O^{16} , O^{18}).

Во втором параграфе метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля применяется к вычислению двухнуклонных формфакторов передач в реакциях с тяжелыми ионами и исследуется вопрос о влиянии учета континуума (расширение базиса, используется в расчетах) на абсолютные значения сечений реакции. При этом рассматривался только процесс одновременной передачи двух нуклонов. В реакциях с тяжелыми ионами важен учет импульса, вносимого в ядро передаваемыми нуклонами, и в данных расчетах, в отличие от более ранних, где были использованы разложения Штурма-Лиувилля, эффекты отдачи учитывались точно (*exact finite range* вычисления). Было показано, что учет континуума приводит к существенному (в несколько раз) увеличению абсолютных значений сечений по сравнению с сечениями, полученными в конфигурационном пространстве модели оболочек. Тем не менее, возрастания сечений реакций при учете континуума недостаточно для согласования с экспериментальными данными по абсолютным величинам, что говорит о важности учета при рассмотрении двухнуклонных передач других механизмов реакции.

Вторая глава посвящена изучению дискретных разложений функций континуума.

В первом параграфе вводятся дискретные наборы базисных функций, которые определяются как решения уравнений Шредингера типа с определенными граничными условиями. В зависимости от выбора собственного значения и вида граничных условий определяются различные дискретные наборы базисных функций. Обсуждаются их общие свойства (ортонормальность, полнота) и возможность использования для разложения функций континуума, S и K - матриц, функций Грина.

Во втором параграфе изучаются разложения по резонансным (гамовским) функциям, в основе которых лежит использование теоремы Миттаг-Лефлера. На основе интегральных представлений состояний рассеяния $\psi^{(+)}$ и S - матрицы получены новые виды разложений $\psi^{(+)}$ и S - матрицы по резонансным функциям, которые сходятся быстрее по сравнению с прямыми миттаг-лефлеровскими.

Полученные результаты иллюстрируются численными расчетами для потенциалов прямоугольной ямы и Саксона-Вудса. С использованием разложений по резонансным функциям тесно связана задача нахождения полюсов S - матрицы для данного потенциала. В связи с этим с помощью точного численного решения уравнения Шредингера было исследовано движение полюсов в зависимости от глубины потенциала Саксона-Вудса.

В третьем параграфе изучаются разложения по функциям Вайнберга. Было показано, что разложения по реальным функциям Вайнберга сходятся быстрее, чем по комплексным, и быстрее, чем разложения Миттаг-Лефлера по резонансным функциям. Вводится новый вид реальных функций Вайнберга

для произвольных фазовых сдвигов Δ . Ранее исследовавшиеся реальные функции Вайнберга являются частным случаем ($\Delta = \frac{\pi}{2}$) этих новых функций. Получены разложения состояний рассеяния, S и K - матриц, функций Грина по новым реальным функциям Вайнберга. Свобода в выборе параметра Δ позволяет регулировать скорость сходимости указанных разложений. Установлено, что в случае, когда Δ равно фазовому сдвигу δ потенциального рассеяния, сходимость разложений наиболее быстрая.

В третьей главе в рамках модели с эффективными сепарабельными остаточными взаимодействиями и точным учетом одночастичного континуума исследуются свойства возбужденных состояний, лежащих в непрерывном спектре.

В первом параграфе формулируется микроскопический подход, в рамках которого изучаются свойства возбужденных состояний. В его основе лежит предположение о доминирующей роли поверхностных возбуждений частично-дырочного типа. Эффективные остаточные силы выбираются в сепарабельной форме, константы остаточных взаимодействий находятся из условий согласования ^{15,6/}. Использование полного одночастичного базиса позволяет систематически исследовать отклик системы на разные внешние поля, которые моделируют процесс возбуждения в ядерных реакциях. В частности, изучается отклик системы на внешние поля с различным характером радиальной зависимости: плавное длинноволновое электромагнитное поле ($\sim r^L$) и "нуклонное" поле с резкой координатной зависимостью ($\sim \frac{r^L}{2a}$).

Во втором параграфе рассматривается метод точного учета одночастичного континуума ^{18,7/}. Использование полного базиса позволяет корректно описывать распад возбужденных состояний в открытые одночастичные каналы, что приводит к возможности вычисления *escape* - ширины резонансов. Предлагается метод для нахождения полных и частичных *escape* - ширины.

В третьем параграфе обсуждаются численные результаты и формулируются основные выводы. Показано, что интервал энергии, на котором исчерпывается энергетически взвешенное правило сумм ($\sum FWSR$), зависит от вида внешнего поля и мультипольности возбуждения, в частности, для полей с резкой координатной зависимостью ($\sim \frac{r^L}{2a} Y_{LM}$) этот интервал больше, чем для полей с плавной координатной зависимостью ($\sim r^L Y_{LM}$). С микроскопически найденными параметрами динамической деформации была проанализирована реакция неупругого рассеяния протонов на ядре ⁵⁸Ni.

В заключении диссертации перечислены основные выводы.

В приложении I исследуется асимптотическое поведение формфакто-

ров двухнуклонных передач, полученных в методе сепарабельзации.

В приложении 2 обсуждаются численные методы, использованные для расчета резонансных и вайнберговских функций.

Основные результаты диссертации, выдвигаемые на защиту:

1. Предложен новый метод вычисления формфакторов двухнуклонных реакций передач, основанный на замене исходных потенциалов сепарабельными с использованием функций гармонического осциллятора. Формфакторы, полученные в новом методе, обладают точной "трехчастичной" и приближенной "двухчастичной" асимптотикой. Указанный метод сходится быстрее в асимптотической области по сравнению с традиционной процедурой диагонализации на базисе осцилляторных функций.

2. Впервые проведены расчеты сечений реакций одновременной передачи двух нуклонов на ядрах с замкнутыми оболочками о точном учете эффектов отдачи (*exact finite range* вычисления) с использованием функций Штурма-Лиувилля. Показано, что учет влияния непрерывного спектра (увеличение размерности используемого базиса функций Штурма-Лиувилля при вычислении формфакторов) в двухнуклонных реакциях передач приводит к увеличению сечения реакции в несколько раз по сравнению с расчетами в конфигурационном пространстве модели оболочек. Показано, что механизм одновременной передачи двух нуклонов недостаточен для описания экспериментальных абсолютных величин сечений.

3. Предложены новые виды разложений одночастичной волновой функции рассеяния $\gamma^{(*)}$ и S -матрицы по резонансным функциям, полученным из интегральных представлений для $\gamma^{(*)}$ и S с использованием миттаг-лефлеровских разложений, волновой функции и функции Грина. Показано, что новые разложения, особенно содержащие функцию Грина, сходятся быстрее, чем прямые миттаг-лефлеровские на большом интервале энергий.

4. Впервые с помощью точного численного решения уравнений Шредингера исследовано движение полюсов S -матрицы для потенциала Саксона-Вудса в зависимости от глубины потенциала для $\ell=0$ и 1.

5. Предложен новый вид реальных функций Вайнберга для любых фазовых сдвигов. Получены разложения по данным функциям K и S -матриц, функций Грина, волновых функций непрерывного спектра. Установлены условия наиболее быстрой сходимости разложений. Показано, что разложения по реальным функциям Вайнберга сходятся быстрее, чем разложения по резонансным функциям и комплексным функциям Вайнберга.

6. Исследованы свойства возбужденных состояний в области гигантских резонансов в рамках самосогласованной модели с эффективными сепарабельными силами и точным учетом одночастичного континуума. Точный учет одночастичного континуума дает возможность систематически

анализировать энергетически взвешенные правила сумм ($EWSR$) для различных внешних полей. Показано, что интервал энергии, на котором исчерпывается $EWSR$, зависит от вида внешнего поля, действующего на ядро и мультипольности возбуждения.

7. Предложен метод вычисления полных и частичных *escape*-ширин резонансов. Вычислены *escape*-ширины гигантских резонансов для ряда сферических ядер. В тяжелых и средних ядрах *escape*-ширины составляют небольшую долю полной ширины резонанса, а в легких ядрах суммарная *escape*-ширина сравнима с экспериментальной.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

Bang J., Gareev F.A., Ershov S.N., Revai J., Nilsson B. A new method for Calculation of Eigenstates for a System of a Core and Two Valence Nucleons.- Physica Scripta, 1979, v.19, N5/6, p. 509-515. Intern. Symp. on Nucl. Direct React. Mechanism, Japan, 1978, p. 722. Bang J., Ershov S.N., Cejpek I., Gareev F.A., Nilsson B.S. Two-Particle Transfer in Heavy Ion Reactions.- Physica Scripta, 1980, v. 22, N 1, p. 19-24.

Тезисы XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра, Дубна, ОИЯИ, 1978, с. 68-69.

Bang J., Ershov S.N., Gareev F.A. A New Type of Real Weinberg Functions. - Lett. Nuovo Cimento, 1979, v. 26, N , p. 529-534. Bang J., Ershov S.N., Gareev F.A., Kazacha G.S. Discrete Expansions of Continuum Wave Functions.- Nucl. Phys., 1980, v. A339, N1, p. 89-124.

Тезисы докладов XXIX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Рига, 1979, с. 372;

Гареев Ф.А., Ершов С.Н., Пятов Н.И., Фаянс С.А., Саламов Д.И. Описание гигантских дипольных резонансов в самосогласованной модели с сепарабельными эффективными взаимодействиями, включая одночастичный континуум. - ЯФ, 1981, т. 33, с. 645-659 (Препринт ОИЯИ: В4-80-283), Дубна, 1980,

Тезисы XIX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, 1980, с. 154.

Intern. Conf. on Extreme States in Nucl. Systemes. Abstract, Dresden GDR, 1980, p. 94.

Гареев Ф.А., Ершов С.Н., Фаянс С.А. Простое описание ядерных возбуждений в сплошном спектре. - Дубна, 1980, с. 16. (Препринт ОИЯИ: Р4-80-695).

Литература

1. Feng D.H., Ibarra R.H., Vallieres M. Large Basis Shell Model Study of Nucleon Transfer Overlaps.- Phys.Lett., 1973, v. 46B, N 1, p. 37-40
2. Bang J., Gareev F.A., Jamalejev R. Two Particle Wave Functions in a Sturm Liouville Basis.- Phys.Lett., 1974, v. 49B, N3, p. 239-242.
3. Меркурьев С.М. Об асимптотическом виде трехчастичных волновых функций дискретного спектра. - ЯФ, 1974, т. 14, с. 447-461.
4. Ньютон Р. Теория рассеяния волн и частиц. - М.: Мир, 1962.
5. Rowe D.J. Schematic Interaction for Nuclear Random Phase Approximation Calculations.-Phys.Rev., 1967, v. 162, N 4, p. 866-876.
6. Бор О., Моттельсон Б. Структура атомного ядра 2. - М.: Мир, 1977.
7. Schlomo S., Bertsch G. Nuclear Response in the Continuum., - Nucl.Phys., 1975, v. A243, p. 507-518.
8. Саперштейн Э.Е., Фаянс С.А., Ходель В.А. Вычисление характеристик коллективных состояний атомных ядер квантовогидродинамическим методом. - Москва, 1976 (Препринт ИАЗ 2580).

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1981 года.