



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г-202

4-81-301

ГАРЕЕВ
Фангиль Ахматгареевич

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПРЯМЫХ РЕАКЦИЙ
С ПЕРЕДАЧЕЙ ОДНОГО И ДВУХ НУКЛОНОВ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Д.П.Гречухин,

доктор физико-математических наук
доцент

Ю.Ф.Смирнов,

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Б.Н.Захарьев.

Ведущая организация — Физико-энергетический институт
(г.Обнинск)

Автореферат разослан " " _____ 1981 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1981 г.
на заседании Специализированного совета Д047.01.01 лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследова-
ний, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединен-
ного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Р.А.Асанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы определяется той чрезвычайно важной ролью, которую играют реакции прямой передачи (срыва и подхвата) нуклонов в современной ядерной физике. Действительно, относительная простота механизма этих реакций, характерные особенности их углового распределения и энергетической зависимости позволяют довольно легко извлекать информацию о свойствах изучаемых состояний ядер. Простота теоретического описания реакции передачи обусловлена возможностью большого числа физических приближений, связанных как с механизмом реакции, так и со структурой состояний ядра-продукта и ядра-мишени.

Современное понимание механизма ядерных реакций передач до сих пор далеко от завершенности. Мы имеем дело, по крайней мере, с трехтельной задачей. Граничные условия в таком случае сложны и в методе связанных каналов, и в итерационных схемах типа Борновского приближения. Поскольку соответствующие уравнения Фаддеева и тем более уравнения с большим числом частиц невозможно решить точно, обычно их решают, делая определенные приближения. Общим для всех этих схем является то, что амплитуда реакции передачи частиц 1, 2, 3... ядром-мишенью $|A\rangle$ ядру-продукту $|B\rangle$ содержит интегралы перекрытия, включающие волновые функции входных и выходных каналов реакции и взаимодействия, отвечающие за эти передачи, а также интегралы $\langle A|B\rangle$,

Объединенный институт
ядерных исследований
ОБНИНСКЕНА

или формфакторы, включающие всю информацию о свойствах состояний ядер $IA > (IB >)$. В общем случае трудно отделить вопрос точного расчета формфакторов от задачи корректного описания механизма реакции. Ясно только, что в рамках выбранной модели вычисления на каждом этапе должны быть проведены с одинаковой относительной точностью. Этому до последнего времени не уделялось должного внимания. В силу поверхностного характера прямых процессов важную роль должно играть асимптотическое поведение формфактора при больших Z . Однако не менее важное значение имеет точное определение формфактора во внутренней области, существенно влияющей на нормировку формфактора и абсолютное значение сечения. И если в случае реакций однонуклонной передачи на дважды магических ядрах это не является трудной задачей, то в случае реакций на других ядрах и с передачей большого числа нуклонов картина резко усложняется, существенную роль начинают играть смешивание конфигураций и связанные с ним эффекты. Известно, что широко применяемая для обработки экспериментальных данных процедура подгонки глубины ямы (WDP) в большинстве случаев не позволяет надежно извлекать спектроскопическую информацию из реакций передач. В такой процедуре величина отношения экспериментального сечения к теоретическому сечению, вычисленному в приближении WDP , интерпретируется как спектроскопический фактор. Однако такая интерпретация неоднозначна, а знание точного формфактора вообще исключает вопрос о спектроскопическом факторе. Количественным критерием одночастичности структуры ядра служит нормировка формфактора.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный

материал о реакциях передачи нуклонов. Поэтому практический интерес представляет сейчас вопрос: насколько надежным и достоверным является теоретическое описание реакций передачи нуклонов и в какой мере и как необходимо модифицировать существующие методы обработки реакций передач, чтобы можно было использовать полученную информацию для описания структуры изучаемых состояний ядер.

Таким образом, в диссертации рассмотрены вопросы, которые, с одной стороны, тесно связаны между собой задачей адекватного описания механизма реакций передач и, с другой стороны, имеют самостоятельное значение и приложения в других областях ядерной физики.

Целью работы является разработка точных математически обоснованных и технически экономных методов решения уравнений для формфакторов одно- и двухнуклонных реакции передач на сферические и деформированные ядра, исследование на их основе точности и применимости приближенных подходов, использование развитых методов для анализа обширного экспериментального материала.

Научная новизна и практическая ценность работы. В диссертации впервые сформулирована задача на собственные значения в виде системы интегродифференциальных уравнений для формфакторов реакций одно- и двухнуклонных передач на сферические и деформированные ядра, точной в рамках применяемых (оболочечной и обобщенной) моделей. В рассматриваемой постановке задачи точно учитывается вклад непрерывного спектра по передаваемым частицам

в формфакторы. Развита корректные методы решения полученных уравнений для формфакторов: метод разложения по дискретному полному набору функций Штурма-Лиувилля и модификация непрерывного аналога метода Ньютона. Показана эффективность этих методов при решении многих задач ядерной физики.

Впервые для потенциалов конечного радиуса получен общий вид разложения функций континуума по резонансным функциям в области действия потенциала и впервые доказана полнота системы резонансных функций в этой области.

Сформулирован перспективный метод единого описания структуры ядер и ядерных реакций, позволяющий изучать как открытые, так и закрытые каналы.

Развитые в диссертации методы решения системы дифференциальных и интегродифференциальных уравнений используются во многих научных центрах, например, в ИЯФ (г.Ржев, ЧССР), в ЦИФИ (г.Дрезден, ГДР), в Институте Н.Бора (г.Копенгаген, Дания), в Университете Берген (г.Берген, Норвегия).

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации

I. Впервые сформулирована задача на собственные значения в виде системы интегродифференциальных уравнений для формфакторов реакций одно- и двухнуклонных передач на сферические ядра в рамках оболочечной модели и в виде системы дифференциальных уравнений для формфакторов однонуклонных передач на деформированные ядра и на ядра, имеющие вибрационные степени свободы, в обобщенной модели. В рамках рассматриваемых моделей система яв-

ляется точной, при этом через дополнительные условия вводится правильная асимптотика формфакторов и правило сумм для их нормировок.

2. Развита точные методы решения полученных уравнений для формфакторов (метод разложения по дискретному полному набору функций Штурма-Лиувилля и модификация непрерывного аналога метода Ньютона), точность которых зависит только от числа учитываемых в разложении базисных функций или от шага конечноразностной сетки и может быть сколь угодно высокой. Опыт решения многих задач ядерной физики с помощью этих методов показал их эффективность; при использовании этих методов получен ряд результатов, перечисленных ниже.

3. Доказано, что для квадратично-интегрируемых функций, удовлетворяющих уравнению Шредингера с потенциалами, обычно используемых в ядерной физике, разложения по функциям Штурма-Лиувилля сходятся равномерно и абсолютно. Впервые доказано, что если используются базисные функции с такой же энергией связи, что и разлагаемая функция, то коэффициенты разложения при увеличении числа членов стремятся к нулю не слабее, чем η^{-4} . Основным преимуществом разложения по функциям Штурма-Лиувилля является то, что в этом разложении все базисные функции имеют одинаковую требуемую асимптотику в данном парциальном канале, как в методе сильной связи каналов, но в отличие от последнего случая получается система алгебраических уравнений, что сильно облегчает вычисления.

4. Впервые разработан простой способ антисимметризации (учет принципа Паули) волновой функции по координатам всех

частиц системы. Для этого достаточно добавить в гамильтониан "псевдопотенциал", роль которого сводится к ортогонализации занятых состояний остова с основным и возбужденными состояниями изучаемой системы. Дано обобщение метода для многочастичных систем, и все свойства сходимости разложений, установленные для простейших систем, в этом случае также сохраняют свою силу. Показано, что предлагаемый метод разложения является естественным развитием метода разложения по оболочечным функциям, но в отличие от последнего дает возможность учета состояний с одной, двумя и т.д. частицами в сплошном спектре, что приводит в некоторых случаях к изменению абсолютных значений сечений в несколько раз.

5. Решение точной системы уравнений для формфакторов позволяет оценить возможности приближенных методов. Так, даже те методы, которые учитывают правильную асимптотику формфакторов, во внутренней области для малых компонент дают результаты, заметно отличающиеся от полученных путем решения точной системы. В то же время для больших компонент все методы дают практически одинаковые результаты. Показано, что применение оболочечных волновых функций для непосредственных расчетов сечений однонуклонных передач приводит к результатам, отличающимся от точных в десятки раз, однако возможно их использование в приближенных уравнениях для формфакторов, причем наиболее оправданным и удобным методом решения этих уравнений является метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля. В результате получаются диагональные матрицы для определения коэффициентов разложения. Впервые доказано, что WDP - приближение состоит в сохранении

одной главной компоненты в разложении, и поэтому в подавляющем большинстве случаев оно неприменимо.

6. На основе предложенных точных методов решения уравнений для формфакторов реакций одно- и двухнуклонных передач создан комплекс программ. На первом этапе подбираются параметры обобщенного оптического потенциала из анализа экспериментальных данных по упругому и неупругому рассеянию в соответствующих каналах реакций, затем вычисляются формфакторы при заданных параметрах среднего поля и, наконец, рассчитываются сечения срыва. В расчетах сечений срыва в рассматриваемом подходе нет ни одного свободного параметра. Расчеты в предложенном подходе отличаются от МИБ, где вначале вычисляется кинематическая часть сечения, а затем из эксперимента извлекается спектроскопическая информация (S -формфакторы), которая сравнивается с предсказаниями соответствующих ядерных моделей.

7. Впервые показано, что учет принципа Паули, состояний непрерывного спектра ядра-мишени и передаваемой частицы, которыми пренебрегают в обычных приближенных расчетах формфакторов и сечений однонуклонных передач на сферические ядра, в некоторых случаях приводит к двукратному увеличению сечения. Показано, что обычно вводимый спектроскопический фактор S не имеет строгого физического смысла за исключением случая, когда $S \approx 1$. Из точных вычислений можно определять асимптотическую нормировку формфакторов, тесно связанную с вершинными константами и играющую фундаментальную роль в дисперсионной теории ядерных реакций, а также в задачах однозначного восстановления потенциала по фазам рассеяния.

8. В реакциях однонуклонных передач на сильнодеформированные ядра многоступенчатые эффекты играют существенную роль. Очень часто сечения непрямых и прямых переходов имеют один и тот же порядок величины, а в случае "запрещенных" переходов сечение можно объяснить только многоступенчатыми эффектами. Установлена простая связь между одночастичными волновыми функциями деформированного ядра и формфакторами реакции срыва. Существующая связь позволила получить информацию о свойствах исследуемых состояний ядер, уточнить параметры равновесных значений деформаций β_{20} и β_{40} , более точно определить коэффициенты $\Delta N = \pm 2$ и кориолисова смешивания и т.д. Предложенный подход вычисления сечений интенсивно применялся для описания однонуклонных передач на ядрах разных масс, начиная от самых легких до тяжелых, и полученное хорошее описание как относительных, так и абсолютных сечений подтверждает правильность наших предположений о структуре ядра и механизме реакций передач.

9. Увеличение абсолютных значений теоретических сечений может быть значительным (в 3 раза), если в расчетах формфакторов используется полный набор базисных функций. Это увеличение не зависит от деталей механизма реакций двухнуклонных передач и приближений, допущенных при расчетах амплитуды реакции. Сечение двухнуклонных передач очень сильно зависит от конкретного вида остаточных сил, при допустимом изменении параметров этих сил сечения могут меняться на порядок и больше.

10. На основе теоремы Миттаг-Леффлера для потенциалов, которые включают в себя обычные ядерные потенциалы (сферически-

симметричные и деформированные) и кулоновский потенциал отталкивания, впервые получен общий вид разложений для функций континуума, функции Грина и S -матрицы по резонансным функциям, причем разложения сходятся равномерно внутри любого замкнутого контура (на плоскости K), не содержащего никаких полюсов. Разложения для функций непрерывного спектра и функции Грина сходятся равномерно (по координате z) в области действия потенциала, т.е. система резонансных функций полна в ограниченной области пространства.

11. Преимущество предложенного подхода по сравнению с другими связано с тем, что, если мы знаем разложение одной из функций $\Psi(kz)$, $G^*(k, z, z')$, $S(k)$, то тем самым определяем разложение двух других функций, а полученные ряды сходятся равномерно. Поэтому в рамках данного метода можно исследовать точность других приближенных методов и указать границы их применимости. В частности показано, что при наличии близкого квазистационарного уровня с очень малой шириной оправдан использованный ранее приближенный метод учета континуума. Он состоит в сохранении одной главной компоненты в разложении полной волновой функции по набору резонансных функций, соответствующей данному квазистационарному состоянию. Показано, что все приближенные способы вычисления положений и ширин узких ($|Re K_n| \gg |Im K_n|$) резонансов эквивалентны.

12. Показано, что разложение по полному набору резонансных функций сильно облегчает включение континуума в структурные расчеты (например, оболочечного типа, RPA - метода, срыва на несвязанные состояния, оболочечных поправок и т.д.), так как в

результате получаются простые системы алгебраических уравнений, по форме почти совпадающие с уравнениями оболочечной модели (например, полученных с использованием осцилляторных функций), но содержащие возможность распада системы по открытым каналам.

Апробация диссертации

Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на семинарах ЛТФ ОИЯИ, ЛВГА ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ЛИЯФ (г. Ленинград), ФЭИ (г. Обнинск), ИАЭ (г. Москва), ИТЭФ (г. Москва), ФИАН СССР (г. Москва), физического факультета Воронежского госуниверситета, физического факультета Ташкентского госуниверситета, ИЯИ СО АН СССР (г. Новосибирск), ЦИФИ (г. Дрезден, ГДР), физического факультета Ленинградского госуниверситета, ИЯФ (г. Краков, ПНР), ИЯФ (г. Ржеж, ЧССР), Института Нильса Бора (г. Копенгаген, Дания), ежегодных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра в Дубне в 1976 году, XV Совещании по ядерной спектроскопии и теории ядра в Дубне в 1978 году, Международном симпозиуме по ядерным реакциям в Балатонфьереде в 1977 году, Международной конференции по структуре ядра в Токио в 1977 году, Международном симпозиуме по прямым реакциям в Шикаго в 1978 году, Совещании по программированию и математическим методам решения физических задач в Дубне в 1973 году.

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 29 статей. Существенная часть результатов вошла в обзоры /3, 13, 22, 28/.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного содержания и заключения, содержит 321 страницу машинописного текста, 25 рисунков, 23 таблицы и библиографический список литературы из 219 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложена постановка физической задачи и дано обоснование актуальности и важности обсуждаемых проблем.

В первой главе рассматривается асимптотическое поведение волновых функций, описывающих связанные состояния ядер и амплитуды реакций передач, и выясняется, в каких случаях особенно важен учет правильной асимптотики. Показано, что наиболее адекватным методом вычисления формфакторов реакций передач на связанные состояния ядра-мишени является метод разложения по полной дискретной системе функций задачи Штурма-Лиувилля. Подробно излагаются свойства сходимости полученных разложений на больших расстояниях. В частности показано, что для класса функций, удовлетворяющих уравнению Шредингера с потенциалами, обычно используемых в ядерной физике, коэффициенты этих разложений при увеличении числа членов стремятся к нулю не слабее, чем n^{-4} . Поэтому метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля позволяет обосновать применимость других приближенных подходов в конкретных случаях. Впервые доказано, что метод подгонки глубины ямы (WDP), часто применяемый в расчетах формфакторов прямых реакций одно- и двухнуклонных передач, соответствует сохра-

нению в разложении по функциям Штурма-Лиувилля одной главной компоненты. В этом смысле метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля является обобщением процедуры WDP и позволяет обосновать ее применимость.

Основным преимуществом разложения по функциям Штурма-Лиувилля является то, что в этом разложении все базисные функции имеют одинаковую требуемую асимптотику в данном парциальном канале. В этом смысле метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля напоминает метод сильной связи каналов, но в предложенном методе получаем систему алгебраических уравнений, что облегчает вычисления.

Во второй главе рассматриваются формфакторы реакций одно-нуклонных передач на сферических ядрах в рамках двухчастичной оболочечной модели со смешиванием конфигураций и учетом принципа Паули. Излагаются основные положения этой модели, которая, несмотря на некоторую упрощенную физическую трактовку, правильно описывает основные свойства процесса.

в § I в рамках вышеописанной модели с помощью разложения по каналовым функциям получена система интегродифференциальных уравнений для радиальных частей формфакторов. Сформулирована задача на собственные значения для этой системы с дополнительными условиями, которые возникают из требования правильного асимптотического поведения формфакторов и правила сумм для их нормировок. Эта система является точной в рамках рассматриваемой модели. Обсуждаются трудности математического решения поставленной задачи. Они связаны с бесконечностью системы (обусловленной наличием непрерывного спектра в разложении по канало-

вым функциям) и с присутствием интегрального члена в уравнениях (обусловленного принципом Паули).

В § 2 полученная система уравнений для формфакторов решалась двумя методами, поскольку такая система уравнений исследовалась впервые. Первый метод — разложение по функциям Штурма-Лиувилля. Хотя коэффициенты разложения сходятся очень быстро, тем не менее остается вопрос о вкладе многих бесконечно малых отброшенных членов. Поэтому был разработан второй метод, свободный от этого недостатка, — прямого численного решения системы интегродифференциальных уравнений на собственные значения и собственные функции. Оказалось, что эти методы дают результаты, согласующиеся между собой с точностью не хуже 3-5%. Поэтому ниже будем называть их точными.

В § 3 исследуется точность и пределы применимости приближенных уравнений для формфакторов, показано, что даже те методы, которые учитывают правильную асимптотику формфакторов, во внутренней области для малых компонент дают результаты, заметно отличающиеся от полученных из решения точной системы. В то же время для больших компонент все методы дают практически одинаковые результаты.

В § 4 проведена оценка эффектов учета непрерывного спектра в разложении по каналовым функциям. Используется приближенный метод, в котором вклад континуума заменен вкладом подбарьерного квазистационарного состояния, тогда система уравнений для формфакторов становится конечной и снова можно использовать алгоритм решения, разработанный в § 2. Показано, что учет принципа Паули, состояний непрерывного спектра ядра-мишени и передаваемой частицы, которыми пренебрегают в обычных приближенных расчетах форм-

факторов и сечений однонуклонных передач, в некоторых случаях приводит к двукратному увеличению сечения. Поэтому обычно вводимый спектроскопический фактор S_{AB} не имеет строгого физического смысла за исключением случая, когда $S_{AB} \approx 1$.

В § 5 анализируются реакции срыва на вибрационные состояния ядра-мишени. Абсолютные значения сечений, вычисленные по методу связанных каналов (МСК), больше в 2-4 раза, чем соответствующие сечения в приближении искаженных волн (МВ).

Третья глава посвящена изучению реакций однонуклонных передач на деформированные ядра. По сравнению с реакциями передач на сферические ядра эта задача гораздо сложнее, так как необходимо принять во внимание виртуальные возбуждения ядра-мишени и ядра-продукта во входных и выходных каналах соответственно.

Действительно, если мы хотим более или менее точно учесть возбуждение низколежащих коллективных мод в ядре переданным нуклоном, было бы непоследовательным пренебрегать эффектами возбуждения этих состояний налетающими дейтронами или улетающими протонами. Поэтому мы приходим к необходимости пользоваться вместо МВ методом связанных каналов. С другой стороны, ситуация проще, так как при вычислении формфакторов реакции передач на деформированные ядра можно использовать более простую систему координат обобщенной модели и нет проблемы учета принципа Паули.

В результате в § I мы получаем систему дифференциальных (а не интегродифференциальных, как в случае реакции передач на сферические ядра) уравнений для формфакторов. Учет связи каналов не позволяет разбить амплитуду реакции передачи на кинематическую и спектроскопическую части, ибо теперь и функции относительного

движения и формфакторы зависят от внутриядерных координат. Из этого следует, что структурная часть задачи приобретает теперь важное значение не только в предсказании абсолютной величины сечения, как это было в МВ, но также и в описании формы углового распределения, которая в МВ была почти всегда чисто кинематической характеристикой процесса. Отсюда возникают достаточно жесткие требования на точность вычисления формфакторов, используемых в расчетах сечений реакций нуклонных передач на сильнодеформированные ядра. В § 2 продемонстрирована на многочисленных примерах большая чувствительность сечений передач к точности расчетов формфакторов, проведен критический анализ существующих методов нахождения формфакторов и подробно исследован метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля.

В рассматриваемой схеме вычислений сечений нет ни одного свободного параметра. Действительно, параметры обобщенного оптического потенциала подбираются из анализа экспериментальных данных по упругому и неупругому рассеянию в соответствующих каналах реакций, а параметры среднего поля при нахождении формфакторов берутся из структурных вычислений.

В главе III (§ 3 и § 4) на основе МСК проведено детальное сравнение теоретических сечений с экспериментальными данными для ядер от самых легких (${}^2\text{Mg}(d,p){}^2\text{Mg}$) до тяжелых (${}^{238}\text{U}(d,p){}^{239}\text{U}$), и полученное хорошее описание как относительных, так и абсолютных сечений говорит о правильности наших предположений о структуре ядра и механизме реакций передач.

Общий вывод состоит в том, что в реакциях передач на сильнодеформированные ядра многоступенчатые эффекты играют существ-

венную роль. Очень часто сечения непрямых и прямых переходов имеют один и тот же порядок величины, а в случае "запрещенных" передач сечение можно объяснить только многоступенчатыми эффектами.

Показано, что имеется простая связь между одночастичными волновыми функциями и формфакторами реакции передач. Существующая связь позволила получить информацию о свойствах исследуемых состояний ядер, уточнить параметры равновесных значений деформаций β_{20} и β_{40} , более точно определить коэффициенты $\Delta N = \pm 2$ и кориолисова смешивания и т.д.

Показано, что использование для расчетов сечений передач на сильнодеформированные ядра волновых функций, полученных в обычных структурных вычислениях, может привести к непреднамеренной ошибке. Однако использование приближенных одночастичных волновых функций допустимо, если вклад в сечение передачи дает малое число сферических гармоник при более или менее одинаковой энергии связи, а состояние деформированного ядра лежит вблизи поверхности Ферми. Другими словами, в таких случаях применение метода подгонки глубины ямы оправдано.

Четвертая глава посвящена изучению двухнуклонных передач на сферические ядра. Основной целью таких исследований является анализ парных корреляций нуклонов в ядрах. Эти корреляции в общем имеют коллективную природу, и сечения двухнуклонных передач содержат в себе информацию о парном поле ядер. Хотя имеются определенные успехи в описании угловых распределений двухнуклонных передач на различные состояния ядер-продуктов, однако абсолютные значения теоретических сечений меньше эксперимен-

тальных в $10+10^3$ раз. Эти отличия наблюдаются не только в ядрах, имеющих больше парных корреляции, а и во всех случаях двухнуклонных передач.

Как уже говорилось, достоверная информация о спектроскопических факторах двухнуклонных реакций передач может быть получена с помощью МИБ только в случае, если передача нуклона происходит на ядра с замкнутыми оболочками, где S -факторы близки к единице. Поэтому вполне логично, пока не сделаны окончательные выводы о роли сильных парных корреляций в реакциях двухнуклонных передач, попытаться получить согласие между теорией и экспериментом в простейших случаях, когда два передаваемых нуклона будут заселять уровни ядер с замкнутыми оболочками. В случае реакций передач между сложными ионами это означает, что одно из ядер должно иметь заполненные оболочки, а другое — две частицы сверх замкнутых оболочек. Несмотря на простоту рассматриваемой системы, она сохраняет основные характерные черты многочастичных систем, и методы решения, пригодные для решения простого случая, легко обобщаются на многочастичные системы. В § I подробно исследуется метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля для решения указанной задачи. В этом случае не только уравнения, но и асимптотическое поведение волновых функций более сложно, чем при передаче одной частицы.

В § 2 показано, что и в этом случае можно построить базисные функции Штурма-Лиувилля, которые с хорошей точностью описывают асимптотическое поведение искомой волновой функции.

Предложенный метод является обобщением метода разложения по оболочечным функциям, но в отличие от последнего он дает воз-

возможность учета вклада состояний с одной и двумя частицами в сплошном спектре. Пренебрежение состояниями с двумя частицами в континууме в расчетах формфакторов двухнуклонных передач может привести к ошибочным результатам. Например, из-за этого может появиться дополнительный узел формфактора на больших расстояниях.

Разработан простой способ антисимметризации (учет принципа Паули) волновой функции по координатам всех частиц системы. Для антисимметризации волновой функции достаточно добавить в гамильтониан "псевдопотенциал", роль которого сводится к ортогонализации занятых состояний кора с основным и возбужденными состояниями изучаемой системы.

В § 3 проведен анализ сечений двухнуклонных передач для реакций $^{18}\text{O}(p,t)^{16}\text{O}$, $^{42}\text{Ca}(p,t)^{40}\text{Ca}$, $^{48}\text{Ca}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{50}\text{Ca}$, $^{48}\text{Ca}(^{16}\text{O}, ^{14}\text{C})^{50}\text{Ti}$, $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{210}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}(^{16}\text{O}, ^{14}\text{C})^{210}\text{Po}$, причем рассматривались передачи только с основного состояния в основное. В результате показано, что увеличение абсолютных значений теоретических сечений может быть значительным (в 3 раза), если в расчетах формфакторов используется полный набор базисных функций. Это увеличение не зависит от деталей механизма реакций двухнуклонных передач и приближений, допущенных при расчетах амплитуды реакции.

На сечение двухнуклонных реакций передач очень сильно влияет конкретный вид остаточных сил, при допустимом изменении параметров этих сил сечения могут меняться на порядок и больше.

Показано, что часто применяемую процедуру вычисления форм-

факторов двухнуклонных передач в приближении WDP невозможно обосновать в отличие от случая реакций однонуклонных передач, где эта процедура могла быть оправдана.

Все описанные выше результаты относились к реакциям, в которых исследуемые состояния принадлежат дискретному спектру. А это означает, что формфакторы таких реакций являются квадратично-интегрируемыми функциями координат передаваемых нуклонов, поэтому учет вклада континуума при вычислении формфакторов можно проводить методом разложения по функциям Штурма-Лиувилля. Однако этот метод не приемлем, если заселяемые или виртуально возбужденные состояния лежат в сплошном спектре. Таким образом, возникает необходимость построения подходящего дискретного базиса для разложения функций непрерывного спектра.

В главе У формулируется подход, основанный на разложении функций континуума по дискретному базису функций. Кратко обсуждается ряд предложенных ранее возможностей построения дискретного набора. В предлагаемом подходе ключевыми моментами являются применение теоремы Миттаг-Леффлера и использование системы резонансных функций в ограниченной области пространства.

В § I доказано, что система резонансных функций является полной в ограниченной области пространства, причем эти функции определены так, что их собственные значения соответствуют подсам S -матрицы. Такое определение резонансных функций позволяет единым образом рассматривать резонансные, антисвязанные и связанные состояния, ввести общую нормировку и доказать ортогональность этих функций. Для потенциалов конечного радиуса дей-

ствия были получены общие выражения для разложения функций сплошного спектра, функции Грина (следовательно, S -матрицы) по резонансным функциям в ограниченной области, при этом полученные разложения имеют равномерную сходимость. Показаны способы улучшения сходимости этих разложений.

В § 2 обобщается метод разложения Миттаг-Леффлера для случая, когда среднее поле ядер описывается аксиально-симметричным потенциалом. Показано, что в случае учета в разложении функций континуума только одного полюса получается факторизованное выражение $\Psi^*(kz) \approx F(k) \varphi(z)$, достаточно точное в окрестности острого резонанса. Ранее такое выражение использовалось рядом авторов в расчетах ядерных реакций без обоснования. Оказалось, что для узких резонансов все приближенные методы вычисления положений и ширин (следовательно, все определения резонансов) эквивалентны.

В § 3 сформулирован метод единого описания структуры ядер и ядерных реакций, позволяющий учесть вклад как открытых, так и закрытых каналов. Этот метод может быть рассмотрен как естественное обобщение R -матричного подхода в теории ядерных реакций, но в отличие от последнего в предложенном подходе нет зависимости от радиуса канала. При получении уравнений в предлагаемом подходе существенна единственность разложений Миттаг-Леффлера и полнота резонансных функций в ограниченной области пространства.

В § 4 исследуется плотность одночастичных состояний $\rho(E)$ континуума и показано, что точки "стучения" $\rho(E)$ при $E \rightarrow 0$, появляющиеся при использовании диагонализационной процедуры в

пространстве осцилляторных функций при вычислении $\rho(E)$, обусловлены отсутствием принципа минимума для состояний рассеяния.

В § 5 кратко анализируется срыв на несвязанные одночастичные состояния и показывается, что использование резонансных функций при вычислении соответствующих матричных элементов дает возможность проводить интегрирование по энергии аналитически.

Таким образом, в настоящей диссертации рассмотрены вопросы, которые, с одной стороны, связаны проблемой адекватного описания прямых реакций передач и извлечения из их обработки спектроскопической информации, и, с другой стороны, имеют самостоятельные значения и приложения в других областях атомной и ядерной физики.

Развитые в диссертации методы носят достаточно общий характер и математически обоснованы. При разработке этих методов ставилась задача построения набора дискретных базисных функций, которые являлись бы решениями уравнения того же типа с подобными граничными условиями, что и уравнения исследуемой физической задачи. Тогда, как это показано в диссертации, сходимость полученных разложений будет наилучшей. Многочисленные сравнения результатов теоретических расчетов, проведенных развитыми в диссертации методами, с экспериментальными данными служат подтверждением вышеприведенных выводов.

В заключении кратко перечисляются основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах

1. Гареев Ф.А., Иванова С.П., Ширикова Н.Ю. Применение функций Штурма-Лиувилля для решения уравнения Шредингера с анизотропным потенциалом Саксона-Вудса. - ТМФ, 1971, 8, с. 97-109.
2. Schulz H., Wiebicke H.J., Gareev F.A Deuteron stripping of deformed nuclei. - Nucl.Phys., 1972, A180, p. 625-638; Препринт ОИЯИ Р4-5863, Дубна, 1971.
3. Gareev F.A., Jamalejev R.M., Schulz H., Bang J. A Method for calculation of stripping form factors in CCBA.- Nucl. Phys., 1973, A215, p. 570-582; Препринт ОИЯИ Р4-6916, Дубна, 1973.
4. Bang J., Bunakov V.E., Gareev F.A., Jamalejev R.M., Schulz H. On the Possibilities in calculations of stripping form factors.- Phys.Scripta, 1974, 10, p.115-120; Препринт ОИЯИ Р4-7425, Дубна, 1973.
5. Bang J., Dasso C.H., Gareev F.A., Igorashi M., Nilsson B.S. Two-Particle Overlaps in a Strumian Basis.- Nucl.Phys., 1976, A264, No.1, p. 157-172.
6. Банг Е., Бунаков В.Е., Гареев Ф.А., Шульц Г. Эффекты смешивания конфигураций в реакции однонуклонных передач. - ЭЧАЯ, 1974, т. 5, вып. 2, с. 263-307.
7. Bang J., Gareev F.A., Jamalejev R.M. Two Particle wave Functions in a Sturm-Liouville Basis.- Phys.Lett., 1974, 49B, No. 3, p. 239-242.
8. Bang J., Gareev F.A. Wave Functions and Two Particle Transfer Form Factors of ^{42}Ca and ^{18}O . - Nucl.Phys., 1974, A232, No.1, p. 45-57.
9. Bang J., Gareev F.A. Some Mathematical Aspects of the Sturm Liouville Expansion with Special Reference to the Nucleon-Nucleus Potential. I. - Physica Scripta, 1978, 18, No. 5, p. 285-296.
Препринт ОИЯИ Е2-10624, Дубна, 1977.
10. Bang J., Gareev F.A. Some Mathematical aspects of the Sturm-Liouville Expansion with Special Reference to the Nucleon-Nucleus Potential. II. - Physica Scripta, 1978, 18, No. 5, p. 297-303; Препринт ОИЯИ Е2-10625, Дубна, 1977.
11. Гареев Ф.А., Пузынина Т.П., Пузынин И.В., Ямалеев Р.М. Программа вычисления одночастичных волновых функций в деформированном ядре с помощью непрерывного аналога метода Ньютона. - Дубна, 1974. - 27 с.
(Препринт/ Объед. ин-т ядер. исслед.: II-808I).
12. Гареев Ф.А., Шульц Г., Ямалеев Р.М., Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Кухтина И.Н. Подбарьерные реакции срыва и подхвата на ядрах области актинидов. - ЯФ, 1975, т. 22, с. II36-II43.
13. Банг Е., Гареев Ф.А., Иванова С.П. Метод разложения по функциям Штурма-Лиувилля в задачах ядерной физики. - ЭЧАЯ, 1978, т. 9, вып. 2, с. 286-326.
14. Bunakov V.E., Gareev F.A. On the use of Sturmian functions in the calculations of stripping form factors. - Phys.

28. Гареев Ф.А., Банг Е. Метод разложения по резонансным функциям в задачах ядерной физики. - ЭЧАЯ, 1980, т. II, вып. 4, с. 813-850.
29. Bang J., Ershov S.N., Gareev F.A., Kazacha G.S.
Discrete Expansions of Continuum Wave Functions. -
Nucl.Phys., 1980, A339, 89-124;
Препринт ОИЯИ Е4-12538, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 мая 1981 года.