

Р-191

4-85-301

РАКИТЯНСКИЙ  
Сергей Анатольевич

АДИАБАТИЧЕСКАЯ  
И КОНЕЧНОМЕРНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ  
ГАМИЛЬТониАНА  
В ЗАДАЧАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИОНОВ  
С ЛЕГЧАЙШИМИ ЯДРАМИ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В.Б. БЕЛЯЕВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор

А.Л. ЗУБАРЕВ

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В.Д. ЭФРОС

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

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1985 года.  
Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1985 года  
на заседании Специализированного совета КО.47.01.01 лабора-  
тории теоретической физики Объединенного института ядер-  
ных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

В.И. ЖУРАВЛЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Несмотря на значительные успехи, достигнутые к настоящему времени в квантовомеханической проблеме нескольких тел, решение задач на основе точных уравнений все еще остается очень трудоемким. Поэтому применение этих уравнений к описанию реальных физических процессов ограничено. По этой причине является актуальным развитие достаточно надежных приближенных подходов.

Многие из приближенных методов используют в качестве одной из основных аппроксимаций приближение фиксированных центров (ПФЦ) или, как его еще называют, адиабатическое приближение, сводящее многочастичную задачу к эффективно двухчастичной. Во-первых, ПФЦ является точнорешаемой моделью квантовомеханической задачи рассеяния и потому широко используется для исследования различных аспектов других приближенных подходов. Во-вторых, ПФЦ само по себе служит достаточно надежным методом расчета при описании взаимодействия легких частиц с системами, состоящими из тяжелых частиц, а также в задачах рассеяния при высоких энергиях. В-третьих, развивается ряд методов решения задачи нескольких тел с использованием ПФЦ в качестве нулевого приближения. Одним из таких подходов является метод, основанный на конечномерной аппроксимации гамильтониана мишени. Он позволяет вычислять неадиабатические поправки непertурбативным образом.

Широкое использование ПФЦ делает актуальным детальный анализ этого приближения, а также совершенствование методов решения уравнений ПФЦ.

Применение более совершенного способа решения задачи ПФЦ вместе с методом конечномерной аппроксимации ядерного гамильтониана позволяет довольно просто и в то же время с достаточной точностью проводить микроскопические расчеты различных физических процессов в малочастичных системах. Потребность в таких расчетах особенно сильно возросла в настоящее время в физике  $\pi A$  - взаимодействий в связи с получением на "мезонных фабриках" большого количества экспериментальных данных, точность которых существенно повысилась. Начато изучение таких тонких эффектов как нарушение зарядовой симметрии сильных взаимодействий, что требует теоретического анализа более адекватного,

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

чем дают существующие феноменологические и полуфеноменологические методы описания  $\mathcal{A}$ -систем.

Цель работы – формулировка нового подхода к адиабатическому описанию рассеяния частиц сложными системами, основанного на рекуррентных ( по числу частиц в мишени) уравнениях; разработка оптимального метода решения полученных уравнений; применение рекуррентных уравнений для анализа структуры ряда Ватсона в дифракционном приближении; исследование динамических эффектов в низкоэнергетическом рассеянии пионов на ядрах  $\alpha$ ,  ${}^3\text{H}$  и  ${}^3\text{He}$ , обусловленных расщеплением изомультиплетов пионов, нуклонов и ядер по массам; получение полуаналитического выражения для пороговой 4-х частичной волновой функции  $\mathcal{A}^3\text{He}$ -системы; изучение возможности приближенного учета кулоновских сил и адиабатического описания  $\mathcal{A}$ -рассеяния в резонансной области.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации предложена и развита новая формулировка адиабатического приближения в нерелятивистской квантовой теории рассеяния. Для задачи рассеяния на мишени с произвольным числом частиц впервые строго доказана сходимость ряда Ватсона в дифракционном приближении к амплитуде Ситенко – Глаубера. Впервые детально проанализировано влияние, оказываемое расщеплением пionicого, нуклонного и ядерного изомультиплетов по массам, на низкоэнергетические характеристики  $\mathcal{T}(\lambda N)$  и  $\mathcal{T}(\lambda N)$ -рассеяния. Выполнен наиболее корректный к настоящему времени расчет длин  $\mathcal{A}(\lambda N)$ -рассеяния. Впервые проведено исследование искажений волновой функции ядра, обусловленных его взаимодействием с рассеивающимся пионом. Изучена применимость адиабатического приближения для описания  $\mathcal{A}^3\text{He}$ -рассеяния в резонансной области.

Практическая ценность исследований, положенных в основу диссертации, обусловлена широким использованием адиабатического приближения в различных задачах ядерной физики, а также рядом экспериментальных программ по изучению свойств легчайших  $\mathcal{A}$ -мезоатомов и поиску возможного нарушения изотопической инвариантности сильных взаимодействий в  $\mathcal{A}$ -рассеянии при низких и средних энергиях, планируемых и проводимых на ускорителях ЛЯП ОИЯИ (Дубна), ИЯИ АН СССР (Троицк), ЛИЯФ АН СССР (Гатчина), TRIUMF (Ванкувер, Канада), LAMPF (Лос-Аламос, США) и других.

Апробация диссертации. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на Всесоюзном совещании по теории систем частиц с сильным взаимодействием (Ташкент, 1979), на Всесоюзном совещании-семинаре "Кварк-адронные и малочастичные системы" (Алма-Ата, 1984), на Научной сессии ОЯФ АН СССР (Москва, 1984), а также на семинарах ЛТФ ОИЯИ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано семь работ.

Объем работ. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 122 страницы машинописного текста, 7 рисунков, 11 таблиц. Библиографический список включает 163 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткий обзор различных аспектов использования адиабатического приближения в ядерно-физических исследованиях. Обсуждается ряд актуальных задач физики  $\mathcal{A}$ -взаимодействий, которые могут быть решены с применением ПФЦ.

Первая глава посвящена обсуждению традиционной формулировки адиабатического приближения в квантовой механике, выводу рекуррентных уравнений и их применению для чисто теоретического анализа амплитуд рассеяния.

В § 1 рассмотрены основные положения адиабатической теории.

В § 2 показано, что в ядерно-физических задачах рассеяния использование ПФЦ в его традиционной формулировке сопряжено со значительными вычислительными трудностями. По этой причине подавляющее большинство практических расчетов, использующих ПФЦ, выполнено с применением дополнительных приближений.

В § 3 дана новая формулировка ПФЦ. Получены рекуррентные уравнения

$$T_N = T_{N-1} + (1 + T_{N-1} G_0) \mathcal{C}_N (1 + G_0 T_{N-1}), \quad (1)$$

$$\mathcal{C}_N = t_N + t_N G_0 T_{N-1} G_0 \mathcal{C}_N, \quad (2)$$

связывающие амплитуды рассеяния на  $N$  частицах  $T_N$ , на подсистеме из  $(N-1)$  частиц  $T_{N-1}$  и на  $N$ -ой частице  $t_N$ .

В § 4 показано, что рекуррентная структура полученных уравнений обеспечивает возможность выбора своего удобного базиса для каждого из них и тем самым существенно упрощает решение задачи.

В § 5 рассмотрена структура ряда Ватсона в приближении Ситенко – Глаубера, являющемся частным случаем ПФЦ. Методом математической индукции получена рекуррентная цепочка уравнений

$$T_N = T_N^D + \Delta_N,$$

$$T_N^D = t_N + T_{N-1} + t_N G_0^{on} T_{N-1} + T_{N-1} G_0^{on} t_N,$$

$$T_{N-1} = T_{N-1}^D + \Delta_{N-1},$$

где  $G_0^{on}$  — функция распространения на массовой поверхности и все  $\Delta_i$  в дифракционном пределе обращаются в ноль. Эта цепочка позволяет выделять из ряда Ватсона конечное число членов, суммирующихся в дифракционном пределе в амплитуду Ситенко-Глаубера.

В § 6 рассмотрены существующие методы формального преобразования ряда многократного рассеяния в конечную сумму. Показано, что уравнения (1,2) представляют собой удобную схему вычисления членов такой суммы для так называемого спектаторного разложения.

В § 7 рассмотрены методы вычисления неадиабатических поправок. Дан вывод уравнения

$$T(z) = T_{\pi\phi\psi}(z) + T_{\pi\phi\psi}(z) G_0(z) H_A G_0(z - H_A) T(z), \quad (3)$$

позволяющего в рамках конечномерной аппроксимации гамильтониана мишени  $H_A$  вычислять неадиабатические поправки непertурбативным образом.

Вторая глава посвящена исследованию низкоэнергетического  $\pi d$ -рассеяния на основе уравнений (1-3).

В § 8 путем решения уравнений (1,2) получено аналитическое выражение для амплитуды рассеяния пиона на двух фиксированных нуклонах.

В § 9 с учетом неадиабатических поправок вычислена длина  $\pi d$ -рассеяния. Путем её сравнения с соответствующим решением уравнений Фаддеева установлено, что точность используемого метода не хуже 10%.

В § 10 предложен способ последовательного учета расщеплений изомюльтиплетов частиц по массам в нерелятивистском анализе  $\pi A$ -рассеяния. Выполнен расчет длин  $\pi d$ ,  $\pi^0 d$  и  $\pi^+ d$  рассеяния и соответствующих  $S$ -фаз (при энергиях до порога развала ядра) с учетом разностей масс пионов и нуклонов.

В § 11 в рамках адиабатической модели упругого  $\pi^+ d$ -рассеяния изучается возможность приближенного учета кулоновских сил.

Третья глава посвящена исследованию рассеяния пионов трехнуклонными ядрами.

В § 12 получено аналитическое выражение для амплитуды рассеяния пиона на трех фиксированных нуклонах.

В § 13 с учетом неадиабатических поправок вычислена и представлена в полуаналитическом виде 4-х частичная волновая функция  $\pi^3 He$ -системы для пороговой энергии.

В § 14 вычислены длины  $\pi^+ \pi H$  и  $\pi^+ \pi He$ -рассеяния с учетом разностей масс пионов, нуклонов и ядер-изобар и исследована чувствительность результатов к вариациям параметров  $\pi N$ -потенциала.

В § 15 сделан расчет дифференциального сечения упругого рассеяния и перезарядки пионов на  ${}^3 He$  в области промежуточных энергий. Исследована роль непрерывного спектра  $H_A$  в формировании неадиабатических поправок и возможность их учета с помощью импульсного приближения.

#### Основные результаты, выдвигаемые для защиты:

1. Предложена новая формулировка адиабатического приближения, основанная на рекуррентных уравнениях, которые связывают амплитуду рассеяния на  $N$ -частицах с соответствующей амплитудой для  $(N-1)$  частиц, и разработан метод решения этих уравнений.

2. Получена рекуррентная цепочка уравнений, позволяющая для случая мишени с произвольным числом частиц в явном виде выделять из ряда Ватсона конечное число членов, суммирующихся в дифракционном приближении в амплитуду Ситенко-Глаубера.

3. Исследованы динамические эффекты, возникающие в низкоэнергетическом  $\pi d$ -рассеянии за счет расщепления пионного и нуклонного изомюльтиплетов по массам, и их чувствительность к вариациям параметров  $\pi N$ -потенциала.

4. В рамках адиабатической модели упругого  $\pi^+ d$ -рассеяния установлено, что при энергиях пиона, не превышающих порог развала дейтрона, точность традиционного способа учета кулоновских сил путем сложения ядерной и кулоновской фаз составляет несколько процентов.

5. Вычислена и представлена в полуаналитическом виде 4-х частичная волновая функция  $\pi^3 He$ -системы для пороговой энергии. Обнаружены сильные искажения ядерной конфигурации, вносимые пионом.

6. Выполнен наиболее корректный к настоящему времени расчет комплексных длин  $\pi^+ \pi H$ ,  $\pi^+ \pi He$ -рассеяния, в котором впервые учтено расщепление пионного и ядерного изомюльтиплетов по массам, и исследована чувствительность результатов к вариациям параметров  $\pi N$ -потенциала. Показано, что учет разностей масс при вычислении длин  $\pi^+ \pi He$  и  $\pi^+ \pi H$ -рассеяния является необходимым, так как существенно ( $\sim 100\%$ ) меняет их действительные части и приводит к появлению мнимых частей  $\sim 10^{-3}$  фм.

7. Показано, что для процесса упругого  $\pi^3 He$  рассеяния в области промежуточных энергий неадиабатические поправки в основном

формируются за счет непрерывного спектра ядерного гамильтониана и в значительной степени исчерпываются импульсным приближением.

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в работах:

1. Беляев В.Б., Вжеционко Е., Ракитянский С.А.  
Учет кулоновского взаимодействия в расчете упругого рассеяния  $\pi^+$ -мезона на дейтроне.  
ЯФ, 1980, 31, с. 1462 - 1468.
2. Belyaev V.B., Rakityansky S.A., Wrzeczionko J.  
The elastic scattering and charge-exchange of pions by  $^3\text{He}$  at intermediate energies.  
(Упругое рассеяние и перезарядка пионов на  $^3\text{He}$  при промежуточных энергиях).  
Nucl. Phys., 1981, A368, p. 394-408.
3. Беляев В.Б., Ракитянский С.А.  
Рекуррентные уравнения приближения фиксированных центров.  
ЯФ, 1985, 41, с. 67-77.
4. Пупышев В.В., Ракитянский С.А.  
Длины *ad*-рассеяния с учетом разностей пионных и нуклонных масс.  
ЯФ, 1985, 41, с. 1159-1165.
5. Belyaev V.B., Pupyshov V.V., Rakityansky S.A.  
Lengths of  $\pi^\pm$   $^3\text{H}$ ,  $\pi^\pm$   $^3\text{He}$  scattering and mass differences of pions, nucleons and the nuclei.  
(Длины  $\pi^\pm$   $^3\text{H}$ ,  $\pi^\pm$   $^3\text{He}$  рассеяния и разности пионных, нуклонных и ядерных масс).  
Preprint JINR, E4-84-675, Dubna, 1984.
6. Беляев В.Б., Ракитянский С.А.  
О сумме ряда Ватсона в дифракционном приближении.  
Препринт ОИЯИ, P4-84-814, Дубна, 1984.
7. Pupyshov V.V., Rakityansky S.A.  
Four-body wave function of  $\pi^3\text{He}$ -system at the threshold energy.  
(Четырехчастичная волновая функция  $\pi^3\text{He}$ -системы для пороговой энергии).  
Preprint JINR, E4-85-122, Dubna, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 апреля 1985 года