

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ρ - 271

4-83-9

РАХИМОВ
Абдулла Маннабович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПИОНОВ И ГИПЕРОНОВ
С АТОМНЫМИ ЯДРАМИ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1983

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.Б. Беляев,

доктор физико-математических наук
профессор

М.М. Мусаханов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

В.Ф. Харченко,

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Р.А. Эрамзян.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Тбилисский государственный университет

Защита диссертации состоится " " _____ 1983 года
на заседании специализированного совета КО47.01.01.
лаборатории теоретической физики Объединенного института
ядерных исследований, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Автореферат разослан " " _____ 1983 года.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И. Куралев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Адекватный подход к изучению адрон-ядерного взаимодействия может служить источником информации о структуре атомного ядра и о природе адрон-нуклонного взаимодействия. Несмотря на большие успехи, достигнутые в этой области на основе модельных представлений, до сих пор не существует удовлетворительной микроскопической теории многочастичных систем, исходящей из элементарных взаимодействий между частицами. Основная трудность, возникающая при этом, заключается как в многочастичном характере адрон-ядерного взаимодействия, так и в многоканальности адрон-ядерного рассеяния. Стандартные методы, такие, как модель с оптическим потенциалом, модель "адрон + остов (ядро)" или метод, сводящийся к частичному суммированию ряда Ватсона, как правило, оказываются малоэффективными. Действительно, применимость этих методов обусловлена либо априорным допущением о малости вклада возбуждений ядра, либо наличием малого параметра в адрон-нуклонном взаимодействии.

В случае рассеяния пионов на ядрах возникает дополнительная трудность, связанная со значительностью вклада $^{1/1}$ реального поглощения пиона нуклонами ядра в упругое π -ядерное рассеяние. Однако корректная теоретическая формулировка задачи взаимодействия мезона с ядром с одновременным учетом рассеяния и поглощения до сих пор остается одной из центральных задач пион-ядерной физики. Следует отметить, что в настоящее время не существует микроскопических расчетов характеристик упругого рассеяния пиона на ядре тяжелее дейтрона с учетом эффектов поглощения. Между тем предъявляются все более высокие требования к надежности и однозначности теоретического анализа и интерпретации пион-ядерных данных.

В последнее время предложен и получил определенное развитие $^{2/2}$ метод рассмотрения свойств многочастичных систем, основанный на вариационном принципе Швингера. С помощью данного метода появляется возможность рассмотрения процессов адрон-ядерного рассеяния с эффективным учетом возбуждений ядра.

Цель работы - применение уравнений метода сильной связи каналов, переформулированных в работе $^{2/2}$, к решению задач π -ядерной физики, а также к описанию упругого Λ^4 -He рассеяния при низких энергиях и энергии связи ^3He ; модифицирование уравнений теории многократного рассеяния (ТМР) с эффективным учетом возбуждений ядра

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ

БИБЛИОТЕКА

и дальнейшее их обобщение для учета эффектов поглощения пионов нуклонами ядра на микроскопическом уровне; оценка роли эффектов поглощения в упругом π -ядерном рассеянии при низких энергиях.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

В диссертации впервые предложены на основе ВПШ уравнения теории многократного рассеяния, что позволило устранить ряд традиционных формулировок. Впервые уравнения, предложенные в работе [2], применены к описанию π -ядерного рассеяния с числом нуклонов ($3 \leq A \leq 64$) при низких энергиях. Обнаруженная при этом слабая чувствительность π -ядерных длин и объемов рассеяния к структуре атомного ядра позволила провести дискриминацию между имеющимися πN -данными. Впервые показана сильная чувствительность объемов π -ядерного рассеяния к протяженности ρ -волнового πN -потенциала. Этот факт может служить дополнительным источником информации о немассовом поведении амплитуды πN -взаимодействия.

В рамках уравнений работы [2] впервые произведен микроскопический расчет $A^4\text{He}$ упругого рассеяния при низких энергиях. Полученные результаты могут служить для интерпретации планируемых экспериментов по низкоэнергетическому $A^4\text{He}$ рассеянию.

Впервые показано, что с помощью довольно простого ΛN -потенциала при эффективном учете возбуждений ядра можно получить хорошее согласие с экспериментальным значением энергии связи ядра ^5He .

В диссертации впервые обнаружен узкий резонанс в системе $A^4\text{He}$ при энергиях $E_{\Lambda} \approx 6$ МэВ.

Новыми результатами также являются методы, развитые для учета поглощения π -мезона нуклонами ядра, с помощью которых впервые проведена оценка роли поглощения в упругом π -ядерном рассеянии при низких энергиях.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для дальнейшего развития теории π -ядерных систем. Отсутствие ограничения на число взаимодействующих частиц и на интенсивность двухчастичного взаимодействия в предложенных уравнениях является основой для дальнейшего их применения в задачах адрон-ядерной физики, в частности в задачах ρ -ядерных систем.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты:

I. Расчет низкоэнергетических характеристик фаз π -ядерного рассеяния. Сравнение полученных результатов с другими расчетами и экспериментальными данными для ядер от d до Z_n .

2. Результаты исследования зависимости длин π -ядерного рассеяния от структуры ядра и различных экспериментальных наборов πN -данных.

3. Результаты исследования зависимости энергии связи ^5He от вида ΛN -потенциала в рамках предложенных уравнений.

4. Обобщение уравнений теории многократного рассеяния для одновременного рассмотрения как многократного рассеяния, так и поглощения π -мезона нуклонами ядра.

5. Оценка роли эффектов поглощения в упругом π -ядерном взаимодействии.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, кафедры теоретической физики ТашГУ, на Всесоюзных совещаниях по теории систем частиц с сильным взаимодействием (Ташкент, 1979; Вильнюс, 1980) и на Международном совещании по проблеме нескольких тел в ядерной физике (Дубна, 1979).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано пять работ

Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений, содержит 108 страниц машинописного текста, 12 рисунков и 18 таблиц. Библиографический список включает 137 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится краткое обсуждение современного состояния проблемы описания взаимодействия адрон-ядерных систем при низких энергиях, рассмотрена общая структура диссертации.

Первая глава посвящена переформулировке метода сильной связи каналов и уравнений теории многократного рассеяния на основе вариационного принципа Швингера.

В §1 дается постановка задачи.

В §2 приведен вывод уравнений метода сильной связи каналов, переформулированных на основе вариационного принципа Швингера (ВПШ).

В §3 на основе ВПШ получены уравнения, являющиеся модификацией уравнений ТМР. В этих уравнениях эффективно учитывается вклад от возбуждений ядра, а для описания упругого рассеяния ад-

рона на атомном ядре при энергиях ниже порога развала ядра достаточно иметь информацию об элементарном адрон-нуклонном потенциале и о волновой функции основного состояния ядра.

В §4 рассмотрены вопросы практического применения найденных уравнений. На примере полных сечений рассеяния пионов и гиперонов на ядрах, вычисленных с помощью локальных и нелокальных потенциалов, исследуется вопрос о справедливости приближений факторизации в выражении

$$V_{ii}(\vec{k}, \vec{k}') = \sum_i \langle \vec{k} \perp | V_i | \perp \vec{k}' \rangle, \quad (I)$$

где V_i - потенциал взаимодействия адрона с i -тым нуклоном, $|\perp\rangle$ - основное состояние ядра.

Показано, что выражение (I) можно с хорошей точностью представить в факторизованном виде для произвольного V_i , т.е.

$$V_{ii}(\vec{k}, \vec{k}') = F((\vec{k} - \vec{k}')^2) A \cdot U(\vec{k}, \vec{k}').$$

Здесь для простоты опущены спин-изоспиновые переменные, а $F(q^2)$ - формфактор основного состояния ядра. Приведены формулы, облегчающие вычисление V_{ii} с учетом спин-изоспиновых переменных.

Вторая глава посвящена описанию системы $\Lambda^4\text{He}$ с помощью введенных в главе I уравнений.

Во введении главы II рассмотрены специфические свойства ΛN - и Λ - ядерных взаимодействий, а также современное состояние теоретических подходов к Λ - ядерной системе.

В §1 формулируется постановка задачи.

В §2 исследуется зависимость сечений $\Lambda^4\text{He}$ рассеяния от той части ΛN - взаимодействия, которое вызывается обменом определенного мезона в системе ΛN . Расчеты говорят о наличии узкого резонанса в системе $\Lambda^4\text{He}$.

В §3 исследуется вопрос о пересвязности ядра ${}^5\Lambda\text{He}$. Расчеты показывают, что, используя ΛN - потенциал, полученный из теоретико-полевого рассмотрения ΛN - системы, можно добиться хорошего согласия с экспериментальным значением энергии связи ${}^5\Lambda\text{He}$. Этот же потенциал также хорошо описывает энергии связи ядер ${}^3\Lambda\text{H}$.

В §4 проводятся итоги рассмотрений Λ - ядерной системы. В частности, делается вывод о малости вклада тензорных и спин-орбитальных ΛN - сил в энергию связи гипергелия-5.

В главе III изучается динамика π - ядерного взаимодействия в рамках уравнений, полученных в главе I.

Во введении к главе III формулируется постановка задачи, в частности вопрос о том, насколько необходимо введение оптического потенциала для описания π - ядерного взаимодействия при низких энергиях.

В §1 модифицированные уравнения ТМР, предложенные в главе I, применены к вычислению длин рассеяния пионов на ядрах d , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$. Далее в рамках этих уравнений исследованы:

- оптическая модель;
- приближение "полноты";
- эффекты связи нуклонов в ядре.

Оценивается вклад от закрытых каналов в действительные части длин π - ядерного взаимодействия. Эффекты связанности нуклона в ядре, изученные в приближении $H_N = E_1 |1\rangle \langle 1|$ (H_N - гамильтониан ядра, E_1 - энергия основного состояния ядра), оказались весьма незначительными.

В §2 с целью получения модельно-независимого представления о величине эффектов, обусловленных процессами поглощения и рождения пионов, рассчитаны фазы рассеяния пионов на легчайших ядрах с помощью уравнений, приведенных в §2 главы I данной диссертации. Полученные при этом фазы π - ядерного рассеяния находятся в хорошем согласии с расчетами других авторов.

§3 посвящен расчету длин и объемов рассеяния пионов на ядрах от d до ${}^{20}\text{Zn}$. При этом исследованы следующие вопросы:

- роль формы волновой функции основного состояния,
- вклад закрытых каналов в S - и P - волновые длины π - ядерного взаимодействия,
- зависимость от величины протяженности ρ - волнового πN - потенциала,
- оценка вклада от процессов перезарядки в характеристики π - ядерного рассеяния.

Расчеты показывают, что вклад от возбуждений ядра в объемы π - ядерного рассеяния довольно незначителен, тогда как этот же вклад в длины рассеяния весьма существен. При сравнении полученных результатов с экспериментальными данными использован феноменологический рецепт учета эффектов поглощения, предложенный в работе [1], который оказался весьма эффективным. Результаты III главы, а именно, вычисленные длины и объемы пион-ядерного рассеяния находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Исследования, проведенные в главе III, показывают, что много-частичную задачу, в частности π - ядерное взаимодействие, мож-

но описать довольно простыми уравнениями, не прибегая к модели с оптическим потенциалом и сопутствующими приближениями.

Четвертая глава настоящей диссертации целиком посвящена учету поглощения пиона нуклонами ядра в упругом π -ядерном рассеянии.

Во введении главы IV рассмотрен современный статус рассматриваемой проблемы. Приведен краткий обзор работ^{/3/}, являющейся основой использованного в диссертации подхода.

В §I получены уравнения для практического расчета характеристик упругого π -ядерного рассеяния при низких энергиях с учетом поглощения, имеющие следующий вид:

$$T(\vec{k}, \vec{k}') = T^{MS}(\vec{k}, \vec{k}') + T^{abs}(\vec{k}, \vec{k}')$$

$$T^{MS}(\vec{k}, \vec{k}') = A \langle \vec{k} | \tau_{11} | F_{\vec{k}'}^+ \rangle, \quad (2)$$

$$T^{abs}(\vec{k}, \vec{k}') = \langle F_{\vec{k}}^{(-)} | U_{abs}^{(2)} | F_{\vec{k}'}^{(+)} \rangle,$$

где $|F\rangle$ удовлетворяют уравнению

$$\begin{aligned} \tau_{11} |F_{\vec{k}}^{(+)}\rangle &= \tau_{11} |\vec{k}\rangle + (A-1) \tau_{11} G_0^+(E-E_1) \tau_{11} |F_{\vec{k}}^{(+)}\rangle + \\ &+ (A-1) [\langle 1 | \tau_{11} G_0(E) \tau_{21} | 1 \rangle - \\ &- \tau_{11} G_0(E) \tau_{11}] |F_{\vec{k}}^{(+)}\rangle, \end{aligned}$$

а

$$U_{abs}^{(2)}(\vec{p}, \vec{p}') = \sum_{i \neq j} \langle 1 | \vec{p} | \tau_{ij} G_0(E) \Gamma_{ij}^j D(E) \Gamma_{ij}^i G_0(E) \tau_{ij} | 1 | \vec{p}' \rangle, \quad \tau_{11} = \langle 1 | \sum_i \tau_{i1} | 1 \rangle / A,$$

τ - матрица взаимодействия с учетом связанности нуклона в ядре,

$$G_0^+(E) = (E - h_{\pi} + i\epsilon)^{-1}, \quad G_0(E) = (E - h_{\pi} - H_M)^{-1},$$

h_{π} - гамильтониан относительного движения пиона и ядра,

Γ_{ij} - оператор эффективного рождения пиона,

$\Phi(\epsilon)$ - пропагатор ядра, поглотившего η -мезон.

Микроскопический расчет $U_{abs}^{(2)}$ приведен в ряде работ^{/4/}.

В §2 рассчитаны длины π -ядерного рассеяния с помощью уравнения (2), изучается зависимость длин π - ^4He -рассеяния от вне-массового поведения t - матрицы πN -взаимодействия. Показано,

что формфактор πN -вершин типа $q(k) = \beta^2 (k^2 + \beta^2)^{-1/2}$ и формфактор^{/6/}, полученный в киральной модели кварковых мешков вида:

$$q(k) = e^{-LkR} / (1 - i k R), \quad \beta = 1,25 \text{ Фм}^{-1}, \quad R = 1,2 \text{ Фм};$$

приводит к одинаковым длинам π -ядерного рассеяния. Оценка эффектов поглощения в рамках уравнений (2) показывает, что их роль при низких энергиях довольно велика. Полученные в §2 действительные и мнимые части длин π -ядерного рассеяния, а также дифференциальное сечение упругого π - ^4He рассеяния при $E_{\pi} = 24 \text{ МэВ}$, с учетом поглощения, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении А приводится альтернативный вывод основных уравнений, использованных в настоящей диссертации.

В приложениях Б, В, Г даны некоторые полезные формулы, использованные в главах II-IV.

Основные результаты, полученные в диссертации

1. Выведены модифицированные уравнения ТМР, позволяющие в отличие от традиционной оптической модели, эффективно учитывать вклад от возбуждений ядра в процессе упругого рассеяния. Разработаны практические методы решения этих уравнений, а также уравнений работ^{/2/}.

2. В предположении о том, что одной из причин возникновения проблемы пересвязанности ядра ^5He в расчетах^{/7/} является недостаточный учет возбуждений ядра ^4He , с помощью предложенных уравнений вычислена энергия связи ^5He . Вычисления показали, что при этом можно получить неплохое согласие с экспериментом, используя сравнительно простой ΛN -потенциал, правильно описывающий так же $B_{\Lambda}(^3\text{H})$. Обнаружено резонансное поведение сечения Λ - ^4He - рассеяния при энергии $E_{\Lambda} \sim 6,5 \text{ МэВ}$.

3. С применением уравнений, предложенных в настоящей диссертации, к изучению π -ядерного рассеяния при $E < E_{\text{пор}}$ ($E_{\text{пор}}$ - порог развала ядра) сделана оценка вклада от закрытых каналов в длины и объемы рассеяния, который оказался довольно значительным. Расчеты показали слабую зависимость низкоэнергетических характеристик π -ядерного рассеяния от вида волновой функции ядра, тогда как имеется сильная чувствительность к параметрам πN -взаимодействия. Это обстоятельство дает возможность дискриминировать

различные наборы данных. Найденные длины и объемы хорошо согласуются с экспериментальными данными.

4. На основе предложенных уравнений и метода связанных каналов^{/3/} разработан практический метод для микроскопического учета эффектов поглощения при упругом π -ядерном рассеянии.

Найденные с помощью этого метода длины π^+He , π^+C - π^+O -рассеяния и дифференциальное сечение π^+He - рассеяния при $E_\pi = 24$ МэВ находятся в хорошем согласии с экспериментом. Результаты расчетов показывают, что вклад эффектов поглощения в упругое π -ядерное рассеяние довольно велик.

Результаты диссертации опубликованы в работах

1. Belyaev V.B., Rahimov A.M., Zubarev A.L. Calculation of Low-energy characteristics of pion Scattering on 3He and 4He nuclei. Journ. of Phys., 1980, 6, p. 149.
2. Беляев В.Б., Рахимов А.М. Длины π^+He рассеяния в методе сильной связи каналов. Труды Международного совещания по проблеме нескольких тел в ядерной физике, ОИЯИ, Д4-12366, Дубна, 1980.
3. Мусаханов М.М., Рахимов А.М. Длины π -ядерного рассеяния в теории многократного рассеяния. ЯФ, 1982, 35, с. 897.
4. Беляев В.Б., Рахимов А.М. Длины и объемы рассеяния пионов на ядрах, ОИЯИ, Р4-81-672, 1981.
5. Беляев В.Б., Мусаханов М.М., Рахимов А.М. Ядро 5He и Λ^4He рассеяния. ОИЯИ, Е4-82-572, 1982; ЯФ, 1983, т. 35, вып. 8.

Литература

1. Brueckner K.A. Energy Levels of π -mesic Atoms. Phys. Rev., 1954, 98, p. 769.
2. Зубарев А.Д. Вариационный принцип Швингера в квантовой механике. Энергоиздат, М., 1981.
3. Koltun D.S. and Mitutani Coupled Channel theory of pion nucleus reactions. Phys.Rev., 1980, C22, p. 1657.
4. Riska D.O. The reactive two-body part of pion nucleus optical potential. Nucl.Phys., 1979, A329, p. 429.
5. Afnan I.R., Thomas A.W., Faddeev Approach to pion production and pion deuteron scattering. Phys.Rev., 1974, C10, p. 109.
6. Мусаханов М.М. ЯФ, 1981, 34, с. 1123.
7. Gal N. Λ - HIPERNUCLEI, Adv. in Nucl. Phys. Plenum Press, New York, 1975, 8, p. 1.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 января 1983 года.