

X-195



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-90-341

ХАНХАСАЕВ
Михаил Хадалаевич

УДК 539.172.5

**УНИТАРНАЯ ТЕОРИЯ
РАССЕЯНИЯ ПИ-МЕЗОНОВ НА ЯДРАХ**

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

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

Дубна 1990

Работа выполнена в лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор

Л. Д. Блохинцев

Доктор физико-математических наук,
профессор

Г. М. Ваградов

Доктор физико-математических наук,
член-корреспондент АН ГССР

Т. И. Копалейшвили

Ведущая организация - Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР, Москва.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1990 г.
в _____ час. на заседании Специализированного совета
Д 047.01.01 при лаборатории теоретической физики Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1990 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного совета
кандидат физико-математических наук

В. И. Журавлев

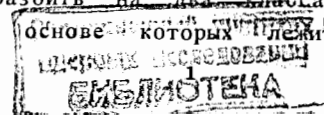
Актуальность темы:

Изучение взаимодействия пи-мезонов с ядрами является центральной задачей той области ядерной физики, которая в последние годы получила название физики промежуточных энергий. Знание динамики взаимодействия пионов с ядрами необходимо для получения информации о структуре ядер из пион-ядерных реакций, а также для анализа многочисленных процессов, сопровождающихся рождением и поглощением пионов.

Качественно новый этап в экспериментальном и теоретическом исследовании взаимодействия π -мезонов с ядрами начался в конце семидесятых годов в связи с пуском мезонных фабрик (сильноточные протонные ускорители). Наличие интенсивных пионных пучков позволяет систематически изучать пион-ядерные процессы с малыми поперечными сечениями такие как рассеяние пионов низкой энергии на ядрах, реакции однократной и двойной перезарядки, взаимодействие пионов с малонуклонными системами и др. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал, требующий детального теоретического анализа.

Принципиальное отличие пионов от других частиц, таких как нуклоны и электроны, обычно используемых для изучения структуры ядер, состоит в возможности поглощения пионов в ядерном веществе. Это делает неприменимыми чисто потенциальные подходы к описанию π -ядерного взаимодействия, переводит задачу в область квантовой теории поля. Следует также иметь в виду, что пока отсутствует последовательная теория пион-нуклонного взаимодействия. Поэтому в настоящее время теория взаимодействия пионов с ядрами по необходимости носит полуфеноменологический характер. В плане практических приложений, проблема сводится к построению теоретических схем с минимальным числом параметров, имеющих ясный физический смысл и определяемых, по возможности, из других независимых процессов.

Теоретические методы описания пион-ядерного взаимодействия можно условно разбить на два класса. К первому относятся исследования, в основе которых лежит потенциальная теория



многократного рассеяния частицы на составной системе. Естественной стартовой точкой для таких схем является задача об описании взаимодействия пионов с малонуклонными системами с последующим обобщением формализма на случай более тяжелых ядер, а также на случай с несохранением числа частиц для учета канала поглощения пиона. Ко второму классу можно отнести теоретические схемы, основанные на применении методов квантовой теории поля в задаче многих тел. Для него естественным пределом является теория распространения пиона в бесконечной ядерной материи.

С теоретической точки зрения теоретико-полевой подход представляется более последовательным, поскольку здесь распространяющийся в ядерной среде пион и виртуальные пионы в ядре рассматриваются на единой основе. Однако, в рамках такого подхода мы сразу сталкиваемся со всеми трудностями теории сильного взаимодействия, которые осложняются многочастичным характером π -ядерного взаимодействия. В практических расчетах обычно ограничиваются учетом лишь низших диаграмм, оставляя, таким образом, серьезный вопрос о сходимости соответствующих рядов. Отражением этого является то, что конкретные приложения таких схем носят пока качественный характер. В частности, до сих пор в теоретико-полевом подходе не удается согласованно воспроизвести параметры пион-ядерного оптического потенциала, полученные из многочисленных прецизионных пион-атомных данных.

При описании π -ядерного взаимодействия в рамках теории многократного рассеяния возникает сложная проблема обобщения такого подхода для учета канала поглощения пиона. С этой целью развивается метод связанных каналов. Наиболее полный анализ здесь проведен лишь для случая πNN -систем. Наличие точных уравнений Фаддеева для системы из трех частиц позволяет корректно рассчитать потенциальную часть задачи, а обобщенные на случай с несохранением числа частиц, они дают реальное представление о влиянии канала поглощения на другие каналы реакции. Для ядер с $A > 3$ для суммирования ряда многократного рассеяния применяются разные варианты оптической модели.

Оптический потенциал является сложным многочастичным оператором и при его построении приходится использовать целый ряд приближений. Установить каким неупругим каналам соответствует мнимая часть полученного так потенциала оказывается возможным лишь в частных случаях. Поэтому учет канала поглощения, который обычно проводится феноменологически путем введения дополнительного члена

в потенциал, становится неоднозначным: параметры поправки на поглощение зависят от принятой приближенной схемы. Таким образом возникает проблема согласования теории с общими требованиями, вытекающими из общего принципа унитарности. Лишь в этом случае можно получить правильное представление о роли канала поглощения в динамике пион-ядерного взаимодействия.

В этой связи является актуальным развитие таких подходов к описанию π -ядерного взаимодействия, в которых условие унитарности выступает в качестве основного принципа и согласованность теории с условием унитарности не нарушается при приближенных методах решения основных уравнений.

В настоящей работе для построения унитарной теории π -ядерного рассеяния используется нетрадиционная формулировка квантовой теории рассеяния - метод эволюции по константе связи (сокращенно ЭКС-метод). ЭКС-метод был сформулирован Д.А. Киржницем как метод квантовой теории поля, представляющий одну из реализаций аксиоматической программы. Его основу составляет замкнутая система уравнений, дающая полное описание частиц и полей с изменением константы связи в гамильтониане взаимодействия.

Цель работы состоит в построении нового подхода - унитарной теории пион-ядерного рассеяния в рамках ЭКС-метода, альтернативного стандартному методу оптического потенциала, в разработке приближенных методов решения основных уравнений подхода, в приложении теории к описанию низкоэнергетического π -ядерного рассеяния (где известные подходы испытывают значительные трудности), и в изучении роли канала поглощения в динамике π -ядерного взаимодействия. Одна из задач, решаемых в диссертации, состоит также в обобщении ЭКС-метода на случай высоких энергий.

Научная новизна и практическая ценность

В работе предложен и разработан унитарный метод описания пион-ядерного рассеяния, основанный на законе эволюции системы с изменением константы связи в гамильтониане взаимодействия. Развитый подход носит общий характер и представляет собой новую формулировку квантовой теории рассеяния частицы на составной системе. В отличие от известной теории многократного рассеяния Ватсона, здесь унитарность T -матрицы сохраняется в каждом последовательном приближении.

Впервые сформулирован метод оптического потенциала в рамках рассматриваемого подхода для описания упругого рассеяния частицы на составной системе. Проведено обобщение формализма на случай с

несохранением числа частиц - метод связанных каналов.

В рамках унитарного подхода впервые удалось количественно описать рассеяние пионов низкой энергии на легких ядрах практически без свободных параметров. Это позволило, в частности, определить сдвиг и ширину $2p$ -уровня в пионном атоме гелия из данных по низкоэнергетическому рассеянию.

В рамках унитарного подхода удалось количественно оценить роль канала поглощения в динамике π -ядерного взаимодействия в области низких энергий. Впервые установлено, что при энергиях ~ 50 МэВ дифференциальные сечения возникают как результат сильной интерференции чисто потенциального рассеяния и канала поглощения.

Показано, что при описании низкоэнергетического π -ядерного рассеяния для учета структурных ядерных эффектов можно использовать двухуровневую модель для ядра с энергий возбуждения, лежащей в области гигантских резонансов (15-30 МэВ). В рамках такой модели исследована возможность проявления каспового эффекта в реакциях поглощения пионов низких энергий на ядрах.

Показано, что в рамках эволюционного по константе связи метода можно эффективно строить теорию высокоэнергетического рассеяния частиц.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации

1. Разработан новый подход к описанию пион-ядерного взаимодействия - унитарная теория рассеяния пионов на ядрах. В его основе лежит нетрадиционная формулировка квантовой теории рассеяния - метод эволюции по константе связи. Проведено обобщение эволюционного метода с одной константой связи на случай двух (и более) констант связи. В рамках такого формализма построен унитарный ряд многократного рассеяния пионов на ядрах для расчета непосредственно пион-ядерных фазовых сдвигов. Получено выражение для фаз рассеяния пиона на ядре, когда взаимодействие определяется суммой двух потенциалов.

2. Сформулирован метод оптического потенциала в рамках унитарного подхода для описания упругого рассеяния пионов на ядрах. Получена замкнутая система уравнений для определения оптического оператора взаимодействия, рассмотрены приближенные методы ее решения.

3. Для учета канала поглощения проведено обобщение потенциальной схемы на случай с несохраняющимся числом частиц. Сформулирован метод связанных каналов в рамках унитарного подхода,

позволяющий рассчитать поправку на поглощение в пион-ядерных фазах рассеяния. Получено приближенное выражение для поправки на поглощение в предположении доминирования двухнуклонного механизма поглощения пиона.

4. Проведено численное исследование сходимости ряда многократного рассеяния для пион-ядерных фаз рассеяния. Показано, что в области энергий пиона ниже 70-80 МэВ для ядер s - и p -оболочки достаточно учитывать лишь первые два члена ряда. Показано, что в рамках потенциальной модели нельзя описать данные по упругому рассеянию пионов на ядрах в этой области энергий.

5. Проведен совместный анализ пион-атомных данных и данных по упругому рассеянию пионов на ядрах ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ в области низких энергий. Показано, что всю совокупность экспериментальных данных можно описать с единым набором параметров поправки на поглощение. Установлено, что канал поглощения играет решающую роль в динамике пион-ядерного рассеяния при низких энергиях. В частности, при энергиях ~ 50 МэВ дифференциальные сечения возникают в результате сильной интерференции чисто потенциального рассеяния и канала поглощения. Показано, что параметры поглощения практически постоянны в интервале энергии пиона 0 - 50 МэВ, что подтверждает доминирование двухнуклонного механизма поглощения при низких энергиях. Определены сдвиг и ширина $2p$ -уровня в пионном атоме гелия из данных по рассеянию при низких энергиях.

6. Показано, что для описания пион-ядерного рассеяния в области низких энергий для учета ядерных структурных эффектов можно эффективно использовать двухуровневую модель ядра с энергией возбуждения, лежащей в области гигантских резонансов. В рамках такой модели исследована возможность наблюдения касповых эффектов в пион-ядерных реакциях при низких энергиях. Показано, что пороговые аномалии наиболее сильно должны проявляться в канале поглощения пиона.

7. Проведено обобщение эволюционного по константе связи метода на случай высоких энергий. Проанализирована связь метода эволюции по константе связи с другим известным квантовомеханическим методом - методом фазовых функций.

Апробация работы

Основные материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах лаборатории теоретической физики ОИЯИ, а также на семинарах Института ядерных исследований АН СССР, Физического института АН СССР, Научно-исследовательского института ядерной

физики МГУ, Института ядерной физики АН Каз.ССР, Института ядерной физики ЧСАН (г.Ржеж, Чехословакия), Центрального института физических исследований (г.Будапешт, Венгрия). Они также были представлены и докладывались на 2, 3, 4 и 5-м Всесоюзном семинаре по "Программе экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР", Всесоюзном совещании "Кварк-адронные и малочастичные системы" (г.Алма-Ата, 1984), 20-й Зимней школе ЛИЯФ АН СССР по физике ядра и элементарных частиц (1985), на сессиях ОЯФ АН СССР по ядерной физике (г.Москва, 1983 и 1989), на международных симпозиумах "Пионы и легкие ядра" (г.Либлице-1981, г.Бехине-1985 и 1988, Чехословакия), 10-й Всемирной конференции "Проблема малого числа тел в физике" (г.Карлсруэ, 1983, ФРГ), международной конференции "Частицы и ядра" (г.Киото, 1987, Япония), на 17-й Сессии секции Ученого совета ОИЯИ по теоретической физике (1983). Часть основных работ диссертации вошла в цикл работ "Новые методы в теории пион-ядерного взаимодействия", удостоенных 2-й премии ОИЯИ за 1985 г.

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 28 работ.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и пяти приложений. Она содержит 275 страниц машинописного текста, включая 13 таблиц, 22 рисунка и библиографический список литературы из 225 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дается общая характеристика диссертационной работы, обосновывается актуальность исследуемых проблем, формулируется цель работы и определяется метод исследования. Приводится краткое описание диссертации по главам и излагаются основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе "Теоретические методы описания рассеяния пионов на ядрах" рассматривается современное состояние оптической модели, являющейся одним из основных методов описания пион-ядерного взаимодействия в области энергий пиона до 300 МэВ. Главное внимание здесь уделяется проблеме согласованности теории с общим условием унитарности, возникающей при практических реали-

зациях теоретических схем построения оптического потенциала. Детально обсуждается задача об описании рассеяния пионов низкой энергии (ниже 50 МэВ) на ядрах, где стандартная оптическая модель испытывает большие трудности из-за необходимости учета целого ряда эффектов высших порядков, включая канал поглощения пиона, по отношению к достаточно хорошо изученному оптическому потенциалу первого порядка.

В §§ 1.1 и 1.2 рассматривается формализм оптической модели, основанный на теории многократного рассеяния Ватсона. Излагается процедура построения оптического потенциала первого и второго порядков. Отмечается, что микроскопические расчеты с потенциалами второго порядка имеются лишь для легчайших ядер таких как ^3He , ^4He из-за трудоемкости таких расчетов. В п. 1.2.5 приводится выражение для оптического потенциала второго порядка для pd -атома, полученного нами в [15].

В § 1.3 рассматриваются оптические потенциалы кислингеровского типа, широко используемые для описания пионных атомов и низкоэнергетического пион-ядерного рассеяния. Обсуждается проблема неоднозначности параметров этих потенциалов, зависимость параметров поглощения от энергии. В п. 1.3.4 отмечаются недостатки существующей процедуры расчета однонуклонных параметров оптического потенциала, предлагается новый способ их расчета [17]. В результате получен улучшенный оптический потенциал для описания пион-ядерного рассеяния в интервале энергий 0-50 МэВ.

В § 1.4 дается краткий обзор теоретико-полевого подхода к описанию пион-ядерного взаимодействия.

Во второй главе "Эволюционный по константе связи метод" излагаются основные элементы квантовой теории рассеяния, в основе которой лежит закон эволюции системы с изменением константы связи в гамильтониане взаимодействия. В § 2.1 формулируются основные уравнения. В § 2.2 рассматривается задача рассеяния двух частиц в рамках такого формализма. В § 2.3 дается краткий обзор приложений эволюционного метода в задачах ядерной физики.

Третья глава "унитарная теория потенциального рассеяния пионов на ядрах" посвящена построению нового подхода к описанию пион-ядерного рассеяния, в основе которого лежит метод эволюции по константе связи. В этой главе предполагается, что взаимодействие пиона с ядром является потенциальным (проблеме учета канала поглощения посвящена глава 5). Излагаемый здесь формализм носит общий характер и применим для описания рассеяния произвольной частицы на составной системе.

Главным преимуществом рассматриваемого подхода по сравнению со стандартным методом оптического потенциала является то, что согласованность теории с условием унитарности сохраняется при итерационных методах решения основных уравнений.

В § 3.1 проводится обобщение эволюционного по константе связи метода на случай двух констант связи, выводятся основные уравнения подхода.

Эволюционное уравнение для определения T-матрицы рассеяния пиона на ядре имеет вид

$$\frac{d}{d\lambda} T(E, \lambda) = V(\lambda) - 2\pi i T(E, \lambda) \delta(E - h) V(\lambda) \quad (1)$$

с граничным условием $T(E, \lambda=0)=0$. Динамическая переменная λ , изменяющаяся в пределах от 0 до реального значения 1, играет роль константы связи пN-взаимодействия в гамильтониане

$$H = K_{\pi} + H_A + \lambda V_{\pi A}, \quad V_{\pi A} = \sum_{i=1}^A v_{\pi N}^i \quad (2)$$

Здесь H_A - гамильтониан ядра, K_{π} - оператор кинетической энергии пиона, $v_{\pi N}^i$ - парный пион-нуклонный потенциал. Решение чисто ядерной задачи с канальным гамильтонианом.

$$h = K_{\pi} + H_A \quad (3)$$

предполагается известным.

Оператор $V(\lambda)$ представляет собой матричные элементы от исходного потенциала взаимодействия по точным волновым функциям полного гамильтониана:

$$V(\lambda) = \Omega^{(+)}(\lambda) V_{\pi A} \Omega^{(+)}(\lambda), \quad (4)$$

где $\Omega^{(+)}$ - оператор Меллера для полного гамильтониана (2). Для эрмитова потенциала $V_{\pi A}$ оператор $V(\lambda)$ является также эрмитовым оператором.

Эволюционное уравнение для $V(\lambda)$ имеет вид

$$\frac{d}{d\lambda} V(\lambda) = \sum_{\sigma} [\hat{P}_{\sigma} V(\lambda) G^{(-)}(E_{\sigma}) V(\lambda) + \text{э.с.}] \quad (5)$$

с граничным условием $V(\lambda=0)=V_{\pi A}$. Здесь $G^{(\pm)}(E) = (E - h \pm i\delta)^{-1}$ - функция Грина, а \hat{P}_{σ} - оператор проектирования на состояния канального гамильтониана (3).

Уравнения (1) и (5) представляют собой замкнутую систему уравнений, дающую полное описание динамики взаимодействия частицы с составной системой.

В § 3.2 для описания упругого пион-ядерного рассеяния форму-

лируется метод оптического потенциала в рассматриваемом подходе. Выводится уравнение для определения T-матрицы упругого рассеяния:

$$\frac{d}{d\lambda} T_0(E, \lambda) = U_0(E, \lambda) - 2\pi i T_0(E, \lambda) \hat{P}_0 \delta(E - h) U_0(E, \lambda), \quad (6)$$

где оператор $U_0(E, \lambda)$, играющий роль оптического потенциала, определяется системой уравнений:

$$U_0(E, \lambda) = V(\lambda) - 2\pi i K(E, \lambda) \hat{Q} \delta(E - h) V(\lambda), \quad (7)$$

$$\frac{d}{d\lambda} K(E, \lambda) = U_0(E, \lambda) + 2\pi i U_0(E, \lambda) \hat{P}_0 \delta(E - h) K(E, \lambda), \quad (8)$$

с граничным условием для вспомогательного оператора $K(E, \lambda)$: $K(E, \lambda=0)=0$. Здесь $\hat{P}_0 = |0\rangle\langle 0|$ - оператор проектирования на основное состояние ядра, а $\hat{Q} = 1 - \hat{P}_0$ - на возбужденные.

Пион-ядерные фазы рассеяния выражаются через оптический оператор $U_0(E, \lambda)$ следующим образом

$$\delta_{\pi A}(k) = -\pi \epsilon_{\pi A}(k) \int_0^1 d\lambda \langle k', 0 | U_0(E, \lambda) | k, 0 \rangle, \quad (9)$$

где $\epsilon_{\pi A}(k) = k^2 / [2\pi^2 dE_0(k)/dk]$ - плотность уровней состояний рассеяния, $E_0(k)$ - энергия столкновения, k и k' - импульсы пиона до и после рассеяния.

В § 3.2 рассматриваются итерационные схемы решения уравнений (7)-(8) для оптического оператора $U_0(E, \lambda)$.

В § 3.3 выводится ряд многократного рассеяния для оператора взаимодействия $V(\lambda)$ в терминах парных u-матриц, описывающих в рамках эволюционного метода пион-нуклонное рассеяние. Разложение строится в два этапа. Сначала вводится вспомогательная v^i -матрица, описывающая взаимодействие пиона со связанным в ядре нуклоном. В терминах этой величины ряд для $V(\lambda)$ имеет вид, аналогичный известному ряду многократного рассеяния Ватсона,

$$V(\lambda) = \sum_i v^i(\lambda) + \sum_{i \neq j} \left(\int_0^{\lambda} d\lambda_1 v^i(\lambda_1) \hat{A} G^{(-)}(E) v^j(\lambda_1) + \text{э.с.} \right) + \dots \quad (10)$$

Здесь \hat{A} - оператор проектирования на антисимметричные состояния ядра. На втором этапе v^i -матрица выражается через свободную пар-

ную u -матрицу πN -рассеяния. Существенно, что эрмитовость оператора $V(\lambda)$, а следовательно, и унитарность T -матрицы рассеяния сохраняется в каждом последовательном приближении.

В § 3.4 унитарный ряд многократного рассеяния строится непосредственно для π -ядерных фаз рассеяния. В § 3.5 рассматривается пион-нуклонное рассеяние в рамках эволюционного метода.

В § 3.6 развивается формализм для описания рассеяния пиона на ядре, когда его взаимодействие определяется суммой двух потенциалов. Получено общее выражение для пион-ядерных фаз рассеяния в этом случае. Наконец, в § 3.7 излагается процедура учета кулоновского взаимодействия в рамках рассматриваемого подхода.

В четвертой главе "Потенциальное рассеяние пионов на ядрах при низких энергиях" исследуется вопрос о возможности описания пион-ядерного рассеяния в рамках потенциальной теории. Основное внимание здесь уделено проблеме сходимости унитарного ряда многократного рассеяния для π -ядерных фаз рассеяния, полученного в предыдущей главе (§ 3.4).

В § 4.1 π -ядерные фазовые сдвиги рассчитываются в приближении первого порядка по парной u -матрице πN -рассеяния, а в §§ 4.2 и 4.3 - поправки второго порядка. Показано, что в конечном счете фазы рассеяния пиона на ядре можно выразить через пион-нуклонные фазы рассеяния, ядерные формфакторы и корреляционные функции.

Исследована роль эффектов второго порядка, обусловленных принципом Паули и связанностью нуклонов в ядре. Показано, что эти эффекты практически не влияют на вещественные части π -ядерных фаз рассеяния (в § 4.2 дается аналитическая оценка). Однако, их учет крайне важен для мнимых частей фаз, т.е. для параметров неупругости.

В § 4.4 исследуется численно сходимость ряда многократного рассеяния на примере рассеяния пионов на дейтроне, ^4He , ^{12}C и ^{16}O . Установлено, что при энергиях пиона ниже 70-80 МэВ достаточно учитывать лишь первые два члена рассматриваемого ряда.

Приводятся результаты расчетов дифференциальных сечений упругого π -ядерного рассеяния, энергетической зависимости фаз рассеяния и параметров неупругости в области сходимости теории. Сравнение с экспериментальными данными для сечений и данными фазовых анализов показывает, что в рамках потенциальной модели низкоэнергетическое π -ядерное рассеяние описать нельзя.

Характерной качественной закономерностью потенциального пове-

дения параметров неупругости ($\eta \approx \exp(-2\text{Im}\delta)$) является их увеличение с ростом орбитального момента: $\eta_S < \eta_P < \eta_D < \dots$, что естественно объясняется увеличением роли центробежного барьера. Поэтому отклонение от этой закономерности, имеющееся как правило в данных фазовых анализов, является указанием на сильное влияние канала поглощения пиона.

В пятой главе "Метод связанных каналов: учет канала поглощения" развит формализм для учета канала поглощения пиона в рамках рассматриваемого подхода.

При обобщении любой потенциальной теории многократного рассеяния на случай с несохраняющимся числом частиц возникает целый ряд проблем таких как проблема "двойного счета", необходимость проведения перенормировок и т.п. Существенно усложняется формализм из-за увеличения числа основных уравнений, что, в сочетании с многотельным характером задачи, приводит к большим трудностям технического порядка при их решении.

В § 5.1 излагаются основные идеи метода связанных каналов в теории пион-ядерного рассеяния. Для πNN -систем метод связанных каналов строится путем обобщения уравнений Фаддеева на случай с несохраняющимся числом частиц, а для описания взаимодействия пионов с произвольными ядрами - оптической модели, основанной на теории многократного рассеяния Ватсона.

Следующие параграфы этой главы посвящены формулировке метода связанных каналов в рамках унитарной теории π -ядерного рассеяния. В § 5.2 определяется исходный гамильтониан и выводится замкнутая система эволюционных уравнений для определения S - и T -матриц рассеяния. Вывод уравнений проводится в ин-формализме, позволяющем обойти трудность с построением асимптотических состояний в терминах "нефизических" частиц.

В § 5.3 развивается обобщенная оптическая модель для описания упругого пион-ядерного рассеяния с учетом канала поглощения. Получена полная система уравнений для определения T -матрицы упругого рассеяния. Общее выражение для π -ядерных фаз рассеяния имеет следующий вид

$$\delta_{\pi A}(k) = \delta_{\pi A}^{\text{pot}}(k) + \delta_{\pi A}^{\text{abs}}(k) \quad (11)$$

Первый член - $\delta_{\pi A}^{\text{pot}}$ определяется формулой (9) и представляет собой фазовый сдвиг за счет потенциального рассеяния. При его микроскопическом расчете для избежания двойного счета проводится

вычитание полюсной части (нуклонный полюс) в пион-нуклонной P_{11} -волне. Поправка на поглощения дается выражением

$$\delta_{\pi A}^{\text{abs}}(k) = -\pi \epsilon_{\pi A}(k) \int_0^1 d\eta \langle \psi_{k,0}^{(+)} | R_0(E, \eta) | \psi_{k',0}^{(+)} \rangle, \quad (12)$$

где $\psi_{k,0}^{(+)}$ и $\psi_{k',0}^{(+)}$ описывают искажение пионной волны потенциальным взаимодействием, а оператор $R_0(E, \eta)$ включает в себя все процессы с промежуточными беспионными состояниями. Для этого оператора получена система точных уравнений. Динамическая переменная η играет роль константы связи каналов.

В § 5.4 развивается итерационная процедура решения уравнений для оператора $R_0(E, \eta)$ в терминах однонуклонных вершинных операторов рождения и поглощения пиона. Получено последовательное разложение поправки $\delta_{\pi A}^{\text{abs}}$ по степеням парных u -матриц и вершинных операторов. Дается диаграммное представление возникающих рядов.

В § 5.5 выводится приближенное выражение для $\delta_{\pi A}^{\text{abs}}$ в предположении доминирования двухнуклонного механизма поглощения

$$\delta_{\pi A}^{\text{abs}}(k) = A(A-1) k \frac{1 + \xi}{1 + 2\xi/A} \hat{\rho}^2(q) [\tilde{B}_0(k) + \tilde{C}_0(k) (\kappa \cdot \kappa')], \quad (13)$$

где $\xi = w_{\pi}(k)/2M$, w_{π} - энергия пиона, M - масса нуклона, $\hat{\rho}^2(q)$ - Фурье-образ квадрата ядерной плотности, $q = k - k'$ - переданный импульс, κ и κ' импульсы пиона в с.ц.м. ($\pi, 2N$)-системы, а \tilde{B}_0 и \tilde{C}_0 параметры поглощения, микроскопическая схема расчета которых представлена в предыдущем параграфе.

В области энергий до ~ 50 МэВ параметры \tilde{B}_0 и \tilde{C}_0 практически постоянны и могут быть определены из пион-атомных данных с помощью системы уравнений

$$\alpha_0^{\text{exp}} - \alpha_0^{\text{pot}} = \gamma \hat{\rho}_0^2(0) \tilde{B}_0, \quad \gamma = A(A-1)(1+\xi)/(1+\xi/2A), \quad (14)$$

$$\alpha_1^{\text{exp}} - \alpha_1^{\text{pot}} = \gamma [\tilde{B}_0 \delta + \tilde{C}_0 \beta \hat{\rho}_0^2(0)/3],$$

где $\alpha_l = \lim_{k \rightarrow 0} \delta_l(k)/k^{2l+1}$ при $k \rightarrow 0$, $\hat{\rho}_l^2$ - парциальная волна от $\hat{\rho}^2(q)$, а α и β параметры углового преобразования из ($\pi 2N$)-с.ц.м. в с.ц.м. "пион-ядро". Длины и объемы рассеяния $\alpha_{0,1}^{\text{pot}}$ рассчитываются в рамках потенциальной схемы, а $\alpha_{0,1}^{\text{exp}}$ определяются из экспериментальных данных для сдвигов и ширин уровней в пионных атомах.

Глава 6 посвящена описанию упругого рассеяния пионов низкой энергии на ядрах s - и p -оболочек в рамках унитарного подхода. В § 6.1 дается обзор экспериментальной ситуации. Отмечается, что в

настоящее время имеется практически полный набор экспериментальных данных, представляющий хорошую возможность для проверки теории в области низких энергий.

В § 6.2 на основе системы уравнений (14) определяются параметры поправки на поглощение \tilde{B}_0 и \tilde{C}_0 . С этой целью рассчитываются потенциальные длины и объемы рассеяния $\alpha_{0,1}^{\text{pot}}$, исследуется сходимость ряда многократного рассеяния для этих величин, определяются величины $\alpha_{0,1}^{\text{exp}}$ из пион-атомных данных. Отмечается, что имеющаяся неопределенность в пион-нуклонных данных вносит существенные ошибки в значения вещественных частей параметров поглощения.

В § 6.3 представлены результаты расчетов дифференциальных и полных сечений рассеяния пионов на ядрах ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ в области низких энергий. Показано, что в рамках унитарного подхода удастся количественно описать экспериментальные данные для этих ядер в области энергий до 50 МэВ с единым набором параметров поглощения \tilde{B}_0 и \tilde{C}_0 , определенных из π -атомных данных. Постоянство параметров поглощения в этой области энергий подтверждает доминирование двухнуклонного механизма поглощения.

Единственным свободным параметром теории является величина Δ , имеющая физический смысл средней энергии возбуждения ядра. Этот параметр возник (глава 4) в результате использования приближения полноты при расчете поправок второго порядка для $\delta_{\pi A}^{\text{pot}}$. Предполагалось, что все возбужденные состояния ядра являются вырожденными, т.е. для учета структурных эффектов использовалась двухуровневая модель ядра. Как показано в § 4.2, от параметра Δ существенно зависят лишь параметры неупругости.

Рис. 1 демонстрирует описание экспериментальных данных для дифференциальных сечений в рамках унитарного подхода на примере π - ${}^{12}\text{C}$ рассеяния. Разница между сплошной и пунктирной линиями показывает чувствительность результатов к величине Δ : сплошная - $\Delta = 25$ МэВ, а пунктирная $\Delta = 5$ МэВ.

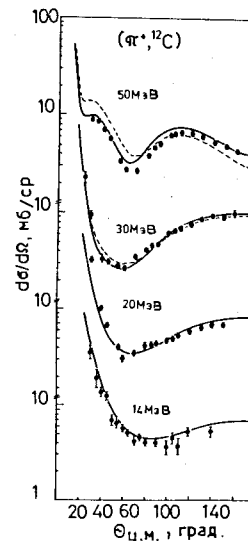


Рис. 1. Упругое π - ${}^{12}\text{C}$ рассеяние.

Видно, что лучшее описание достигается при $\Delta \approx 20$ МэВ. Аналогичное значение для Δ получается и из анализа полных сечений рассеяния. В этой связи представляется естественным предположить, что важную роль в формировании параметров неупругости играют процессы с возбуждением гигантских резонансов, в частности, гигантского дипольного резонанса.

Чувствительность к параметру Δ уменьшается при уменьшении энергии пиона, что отражает доминирование канала поглощения в формировании параметров неупругости при энергиях ниже ~ 30 МэВ. При энергиях ~ 50 МэВ дифференциальное сечение возникает как результат интерференции между каналом поглощения и чисто потенциальным рассеянием. Влияние канала поглощения на дифференциальное сечение π -ядерного рассеяния при 50 МэВ показано на рис. 2, где сплошные кривые представляют полный расчет, а штриховые - потенциальное рассеяние ($\delta_{\pi A}^{abs} = 0$).

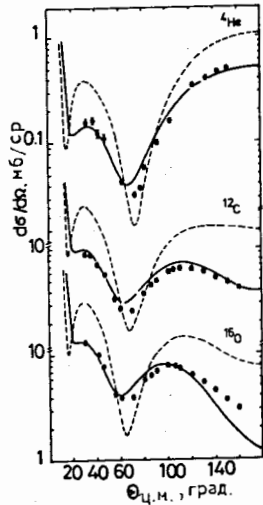


рис. 2. Упругое рассеяние π^+ -мезонов при 50 МэВ.

полных сечений имеются лишь при энергиях больших 50 МэВ, где согласие теории и эксперимента удовлетворительное, то представленные результаты для энергий ниже 50 МэВ носят пред-

проведено совместное описание данных рассеяния (дифференциальных сечений и полных сечений реакции) для π^+ и π^- мезонов в области низких энергий. Отмечается, что описание данных для π^+ мезонов на ^{12}C и ^{16}O , как правило лучше, чем для π^- , что можно было бы интерпретировать как проявление эффекта нарушения зарядовой симметрии. Однако, в настоящее время именно для π^- -мезонов имеются противоречия между данными разных экспериментальных групп. Поэтому для определенного вывода следует прежде всего решить эту экспериментальную проблему.

На рис. 3 показан результат расчета энергетической зависимости полного (σ^{tot}) и полного упругого (σ^{el}) сечений рассеяния, а также полного сечения поглощения (σ^{abs}) для ядер ^{12}C и ^{16}O . Поскольку данные для

сказательный характер. В частности, как видно из рис. 3, известный $1/v$ -закон определяет поведение полных сечений σ^{tot} и σ^{abs} в узкой области энергий: ниже 5 МэВ.

В § 6.4 в рамках унитарного подхода решается задача об определении сдвига и ширины $2p$ -уровня в пионном атоме гелия за счет сильного взаимодействия. В легчайших пионных атомах ($A < 10$) прямым образом в настоящее время можно измерить эти величины лишь для $1s$ -уровня. Поэтому представляет значительный интерес определить сдвиги и ширины более высоких уровней из данных по рассеянию пионов низкой энергии.

Для сдвига (ϵ) и ширины (Γ) $2p$ -уровня в π ^4He -атоме получены следующие значения: $\epsilon_{2p} = 4.0 \times 10^{-3}$ эВ и $\Gamma_{2p} = 1.6 \times 10^{-3}$ эВ. Величина отношения $\Gamma_{2p} / \Gamma_{1s} \approx 3.6 \times 10^{-5}$ хорошо согласуется с имеющимися теоретическими оценками.

В главе 7 "унитарный подход и стандартная оптическая модель" обсуждается связь рассматриваемого подхода с методом оптического потенциала, основанным на теории многократного рассеяния ватсона. Именно это сравнение привело нас к идее улучшенного оптического потенциала для низкоэнергетического пион-ядерного рассеяния (см. п. 1.3.4 главы 1).

Наиболее просто связь унитарного подхода со стандартной оптической моделью можно проследить, рассматривая борновское разложение для пион-ядерных фаз рассеяния. В § 7.1 показано, что в рамках унитарного подхода это разложение получается в результате итерационного решения основных уравнений в терминах вспомогательной $\tau(E, \lambda)$ -матрицы рассеяния, описывающей взаимодействие пиона со связанным нуклоном ядра. Получено приближенное выражение этого оператора через свободную t -матрицу πN -рассеяния, в которой влияние ядерной среды учитывается путем определенного выбора энергии столкновения пион-нуклонной подсистемы. В § 7.2 дается вывод оптического потенциала первого и второго порядков в терминах этой модифицированной t -матрицы в рамках стандартного подхода.

В § 7.3 развита процедура приближенного учета эффекта искаже-

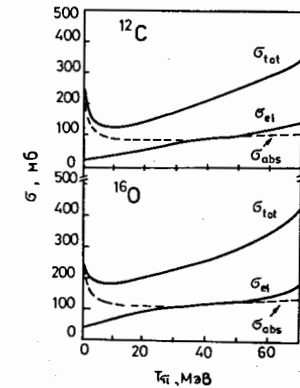


рис. 3. Полные сечения рассеяния пионов на ^{12}C и ^{16}O .

ния пионной волны за счет потенциального взаимодействия в поправке на поглощение (12). Для ядер s - и p -оболочек вычислены в явном виде коэффициенты, определяющие величину этого эффекта для параметров поглощения \tilde{V}_0 и \tilde{C}_0 . В § 7.4 развит формализм для описания неупругого пион-ядерного рассеяния в рамках рассматриваемого подхода, реализующий идею метода искаженных волн.

В главе 8 "О возможности наблюдения касповых явлений в пион-ядерных реакциях при низких энергиях" обсуждаются наблюдаемые на эксперименте особенности в энергетической зависимости сечений поглощения и рождения пионов низких энергий на ядрах. Предлагается объяснение этих особенностей как проявление пороговых аномалий в пион-ядерном взаимодействии, связанных с резонансным механизмом возбуждения ядра.

В § 8.1 рассматривается простая трехканальная модель для описания π -ядерного взаимодействия в области энергий ниже 50 МэВ, приводится общий формализм для описания влияния неупругого канала на упругий и на канал поглощения, определяются квантовые числа пион-ядерной системы для основного, с точки зрения каспового эффекта, канала.

В § 8.2 проводится оценка эффекта в рамках унитарного подхода для случая взаимодействия пионов с углеродом. Показано, что пороговый эффект должен проявляться в канале поглощения более сильно, по сравнению с упругим каналом. Сильная связь неупругого канала с каналом поглощения объясняется $1/v$ -законом для сечения поглощения пиона вблизи порога. С учетом того, что $1/v$ -закон распространяется на область не более 5 МэВ (см. рис. 3), наблюдаемые аномалии в энергетическом сечении поглощения должны быть достаточно узкими. Ожидаемая оценка эффекта составляет около 4% от полного сечения поглощения.

В главе 9 "Теория высокоэнергетического потенциального рассеяния в эволюционном по константе связи методе" обсуждается проблема обобщения ЭКС-метода на случай высоких энергий, когда длина волны рассеиваемой частицы значительно меньше характерного масштаба области взаимодействия. В § 9.1 обсуждается связь ЭКС-метода с известным квантовомеханическим методом фазовых функций. В § 9.2, в отличие от стандартной формулировки, где основные уравнения формулируются для фаз рассеяния, выводится точное уравнение для полной амплитуды рассеяния в рамках эволюционного метода. В § 9.3 рассматривается способ решения

полученного интегро-дифференциального уравнения в терминах так называемой полной фазовой функции. Этот метод решения успешно использовался нами ранее [26-28] при решении аналогичных уравнений в методе фазовых функций для поиска высокоэнергетических приближений для амплитуды рассеяния. В § 9.4 в качестве примера получено известное эйкональное приближение для амплитуды рассеяния в пределе коротких волн.

В заключении формулируются основные результаты диссертации, обсуждаются возможности дальнейшего развития и приложений рассматриваемой теории.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах

1. Беляев В. Б., Киржниц Д. А., Такибаев Н. Ж., Ханхасаев М. Х. - Низкоэнергетическое pd -рассеяние в эволюционном по константе связи методе. - Ядерная физика, 1980, т. 32, с. 1120 - 1131.
2. Khankhasayev M. Kh. - Unitary approach to the description of pion-nucleus elastic scattering. - Dubna, 1980, -13 p. (Сообщение ОИЯИ, Е4-80-691). (Унитарный подход к описанию упругого пион-ядерного рассеяния).
3. Ханхасаев М. Х. - О новом подходе к описанию упругого пион-ядерного рассеяния. - Труды второго Всесоюзного семинара по "Программе экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР" (Звенигород, 1981), М., 1982, с. 121-125.
4. Khankhasayev M. Kh. - On a unitary description of low-energy pion-nucleus scattering. - Czech. J. Physics B, 1982, v. 32, p. 207 -211. (К унитарному описанию низкоэнергетического пион-ядерного рассеяния).
5. Ханхасаев М. Х. - Унитарное описание низкоэнергетического упругого пион-ядерного рассеяния. - Ядерная физика, 1982, т. 36, с. 633 - 645.
6. Ханхасаев М. Х. - Потенциальное описание низкоэнергетического упругого рассеяния пионов на ${}^4\text{He}$. - Ядерная физика, 1983, т. 37, с. 1196-1208.
7. Беляев В. Б., Ханхасаев М. Х. О влиянии канала поглощения на низкоэнергетическое пион-ядерное рассеяние. - Труды третьего Всесоюзного семинара по "Программе экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР" (Звенигород, 1983), М., 1984, с. 228-233.

8. Belyaev V. B., Khankhasayev M. Kh.- On the theory of low-energy pion-nucleus scattering. - Phys. Letters B, 1984, v.137, p.299-302. (К теории низкоэнергетического пион-ядерного рассеяния).
9. Ханхасаев М. Х.- О некоторых приложениях метода эволюции по константе связи в задачах ядерной физики.- Дубна, 1983, 14с. (Препринт ОИЯИ, Р4-83-110)
10. Ханхасаев М. Х.- Проблемы взаимодействия π -мезонов с ядрами при низких энергиях. -Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1985, т. 16, вып. 16, с. 1223 - 1273.
11. Ханхасаев М. Х.- Рассеяние пионов низкой энергии на ядрах.- Труды 4-го Всесоюзного семинара по "программе экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР" (Звенигород, 1985), М., 1986, с.213-226.
12. Ханхасаев М. Х.- Рассеяние пионов низкой энергии ядрами р-оболочки. - Труды 5-го Всесоюзного семинара по "программе экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР" (Звенигород, 1987), М., 1987, с.216-222.
13. Belyaev V. B., Khankhasayev M. Kh.- The influence of the pion absorption channel on the low-energy π - ^4He scattering.- Proc. 10th Intern. Conf. on Few Body Problems, Karlsruhe, 1984, v.11, p. 470-472. (Влияние канала поглощения на низкоэнергетическое π - ^4He рассеяние).
14. Khankhasayev M. Kh., Sapozhnikov A. P.- On the pion-nucleus dynamics at low energies. - Phys. Letters B, 1988, v. 201, p. 17-21. (К динамике пион-ядерного взаимодействия при низких энергиях).
15. Khankhasayev M. Kh., Adam J.(Jr.), Truhlik E.- The second-order optical potential for the πd system at threshold. - Czech. J. Physics B, 1985, v. 35, p. 420-427. (Потенциал второго порядка для πd -системы при низких энергиях).
16. Khankhasayev M. Kh.- Unitary scattering theory of low-energy pions by light nuclei.- Czech. J. Physics B, 1986, v. 36, p. 257-259. (Унитарная теория рассеяния пионов низкой энергии на легких ядрах)
17. Khankhasayev M. Kh., Topilskaya N. S.- On the reactive content of the pion-nucleus optical potential at low energies.- Phys. Letters B, 1989, v. 217, p.14-18. (О мнимой части пион-ядерного оптического потенциала при низких энергиях).
18. Khankhasayev M. Kh.- Problems of pion-nucleus interaction. - Czech. Journ. Physics B, 1989, v. 39, p. 836-842. (Проблемы пион-ядерного взаимодействия).
19. Khankhasayev M. Kh.- New approach to the description of pion-nucleus scattering at low energies.- In the Contr. to 9th Intern. Conf. on Particles and Nuclei, Kyoto, 1987, v.1, p.334-335. (Новый подход к описанию пион-ядерного рассеяния при низких энергиях)
20. Khankhasayev M. Kh.- Unitary scattering theory of low-energy pions by light nuclei: formalism. Dubna, 1989, 19p.- (Препринт ОИЯИ, Е4-89-443). (Унитарная теория рассеяния пионов низкой энергии на легких ядрах: формализм).
21. Khankhasayev M. Kh.- Unitary scattering theory of low-energy pions by light nuclei: applications. - Dubna, 1989, 23p.- (Препринт ОИЯИ, Е4-89-444). (Унитарная теория рассеяния пионов низкой энергии на легких ядрах: приложения).
22. Khankhasayev M. Kh.- Unitary scattering theory of low-energy pions by light nuclei - Nucl. Phys A, 1989, v.505, p. 717-754. (Унитарная теория рассеяния пионов низкой энергии на легких ядрах).
23. Khankhasayev M. Kh.- On determination of the 2p-energy level shift and width for π^- - ^4He atom. - Czech. J. Physics B, 1990, v.40, p.176-181. (К определению сдвига и ширины 2p-уровня в пионном атоме гелия).
24. Khankhasayev M. Kh.- Is it possible to observe the cusp phenomena in pion-nucleus reactions at low energies? - Dubna, 1989, 11p.- (Препринт ОИЯИ, Е4-89-821). (О возможности наблюдения касповых явлений в пион-ядерных реакциях при низких энергиях).
25. Ханхасаев М. Х.- К теории высокоэнергетического потенциального рассеяния в методе эволюции по константе связи. - Дубна, 1989, 16с. - (Препринт ОИЯИ, Р2-89-754).
26. Бабилов В. В., Ханхасаев М. Х.- К обобщению метода фазовых функций в теории потенциального рассеяния - Изв. АН СССР (сер. физ) т.38, с.725-729.
27. Ханхасаев М. Х.- Потенциальное рассеяние на большие углы в методе фазовых функций.- ТМФ, 1976, т.29, с.221-234.
28. Ханхасаев М. Х.- Об уравнении для полной амплитуды рассеяния в методе фазовых функций.- ТМФ, 1978, т.34, с.172-179.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 мая 1990 года.