

4-81-447

СОЛОВЦОВА
Ольга Павловна

**ДИНАМИКА ПИОН-ЯДЕРНЫХ СИСТЕМ
В ЭВОЛЮЦИОННОМ ПО КОНСТАНТЕ СВЯЗИ МЕТОДЕ**

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

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

Дубна 1981

K

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы в основном благодаря появлению мезонных фабрик открылись новые возможности для изучения взаимодействия Π -мезонов с ядрами. Результаты, получаемые при исследовании пион-ядерных систем, содержат важную информацию о структуре ядра и о характеристиках пион-нуклонного (πN) взаимодействия. Сейчас в этой области накоплен богатый экспериментальный материал. В связи с этим особый интерес представляет разработка надежных теоретических методов для описания пион-ядерного взаимодействия.

В настоящее время существует много теоретических схем, в рамках которых описываются те или иные аспекты пион-ядерной динамики. Имеется ряд попыток формулировки проблемы на основе "первых принципов", т.е. на основе теоретико-полевого подхода^{1,2/}. Однако следует отметить, что теоретико-полевоe описание пион-ядерных систем встречает серьезные трудности, вызванные сложностью задачи, в которой вместе с проблемой описания πN -взаимодействия приходится решать проблемы теории многих тел. Пока не существует теоретической схемы, в которой до конца удалось бы обойтись лишь "первыми принципами". В большинстве подходов элементы феноменологии приходится вводить уже на элементарном уровне при описании πN -взаимодействия.

При данных обстоятельствах важное значение приобретают теоретические схемы, основанные на каких-либо модельных представлениях и приближениях, позволяющих упростить постановку задачи по сравнению с теоретико-полевоeй формулировкой.

В последнее время был предложен^{3/} и получил определенное развитие^{4/} эволюционный по константе связи (ЭКС) метод, который предоставляет новые возможности при рассмотрении задач малого числа тел в нерелятивистской ядерной физике низких энергий и задач квантовой теории поля. Существенным достоинством ЭКС-метода является тот факт, что при приближенном решении ЭКС-уравнений матрица рассеяния остается унитарной и причинной, поскольку приближенно строится фаза рассеяния. При решении ЭКС-уравнений методом последовательных приближений, как правило, для достижения результата

требуется гораздо меньшее число итераций, чем в обычном подходе^{/5/}. Среди других подходов (см., например, ^{/6-8/}), основанных на унитаризации приближенной амплитуды, ЭКС-метод выделяется относительной простотой. Здесь удается во многих случаях обойтись без громоздких численных расчетов и получить решение целого ряда задач, относящихся к проблеме малого числа тел, в аналитическом виде^{/4,9/}. В связи с отмеченными достоинствами ЭКС-метода представляет интерес применение этого метода к описанию пион-ядерных систем.

Цель работы -

применение ЭКС-метода для описания процесса упругого рассеяния Π -мезонов на легких ядрах и процесса порогового фоторождения Π^0 -мезонов на легчайших ядрах; формулировка обобщения ЭКС-метода; исследование поведения трехчастичной длины рассеяния в пределе нулевой энергии связи мишени.

Научная новизна и практическая ценность

В диссертации впервые на основе ЭКС-метода рассчитаны действительные части длин пион-ядерного рассеяния $Re a_{\pi A}$ для ядер от d до ^{23}Na . Обнаружена слабая зависимость $Re a_{\pi A}$ от структуры рассматриваемых ядер и значительная чувствительность к элементарным длинам πN -рассеяния. Проведенное исследование указывает на то, что из низкоэнергетических данных по пион-ядерному рассеянию надежная информация о структуре ядра может быть получена лишь при существенном уточнении экспериментального значения изоскалярной компоненты длины πN -рассеяния.

Новыми результатами является также описание процесса порогового фоторождения Π^0 -мезонов на легчайших ядрах на основе уравнений ЭКС-метода. Впервые найдено пороговое значение амплитуды фоторождения Π^0 -мезонов на ядре 6Li , которое описывается как трехтельная система на основе уравнений Фаддеева.

Предложено обобщение ЭКС-метода, позволяющее использовать в качестве начального условия решение задачи при любом значении константы связи. В качестве примеров найдены поправки к модели фиксированных центров и рассмотрен вклад, отвечающий непрямому взаимодействию.

Впервые показано, что в пределе нулевой энергии связи мишени при нерезонансном характере взаимодействия сталкивающихся частиц трехчастичная длина рассеяния определяется лишь суммой длин рассеяния на отдельных составляющих. Полученный результат использован в качестве начального условия для уравнений ЭКС-метода.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для дальнейшего развития теории пион-ядерных систем. Представляет интерес применение развитых методов для учета процессов поглощения и испускания Π -мезонов ядрами, что позволило бы, например, рассчитать мнимые части длин пион-ядерного рассеяния. Полученные результаты, относящиеся к описанию фоторождения Π^0 -мезонов на ядрах, могут быть использованы при анализе процессов фоторождения других частиц, например η -мезонов и векторных мезонов. Предложенное обобщение ЭКС-метода можно применять в задачах атомной и ядерной физики, в которых удобно вначале рассматривать некоторый точно решаемый модельный случай, а затем перейти к реальной системе путем эволюции по "константе связи".

Доказанное в диссертации предельное соотношение для трехчастичной длины рассеяния в случае нерезонансного характера сил полезно при дальнейшем изучении свойств трехчастичных систем.

Проведенное в диссертации исследование показало эффективность использования ЭКС-метода для описания пион-ядерного взаимодействия при низких энергиях. Важным представляется обобщение развитых методов на случай более высоких энергий.

Следующие результаты выдвигаются для защиты:

1. Вывод в рамках ЭКС-метода выражений для действительных частей длин пион-ядерного рассеяния. Сравнение полученных на основе этих выражений результатов с другими расчетами и экспериментальными данными для ядер от d до ^{23}Na .

2. Исследование зависимости действительных частей длин пион-ядерного рассеяния от структуры ядра и различных экспериментальных наборов длин πN -рассеяния.

3. Результаты теоретического исследования, проведенного на основе ЭКС-метода, для процесса фоторождения Π^0 -мезонов вблизи порога на ядрах d , ^3He , ^3H , Li .

4. Количественное исследование эффекта двойного учета перерассеяний Π -мезонов.

5. Формулировка возможного обобщения ЭКС-метода и его использование для выхода за рамки модели фиксированных центров и оценки вклада непрямого взаимодействия для πd -системы.

6. Исследование поведения трехчастичной длины рассеяния для нерезонансного взаимодействия налетающей частицы с составляющими мишени в пределе нулевой энергии связи мишени. Использование полученного результата в качестве начального условия для решения ЭКС-уравнений.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах ЛТФ ОИЯИ, НИИФ МГУ, на II Всесоюзном семинаре по экспериментальным исследованиям на мезонной фабрике ИФИ АН СССР (Звенигород, 1981), на XIII Совещании по теории квантовых систем нескольких частиц с сильным взаимодействием (Тбилиси, 1981) и были представлены на IX Международную конференцию по проблемам нескольких тел (Орегон, 1980).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано пять статей.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения и четырех приложений, содержит 120 страниц машинописного текста, 13 рисунков и 9 таблиц. Библиографический список литературы включает 133 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится краткое обсуждение проблемы описания взаимодействия Π -мезонов с ядрами, обсуждение теоретических схем, в рамках которых строятся те или иные аспекты пион-ядерной динамики. Кратко излагается ЭКС-метод и обсуждается то место, которое он занимает среди других методов, основанных на унитаризации приближенной амплитуды. Рассмотрена общая структура диссертации.

Первая глава посвящена применению ЭКС-метода для нахождения действительных частей длин пион-ядерного рассеяния.

§ I содержит постановку задачи. В § 2 на основе ЭКС-метода рассматривается задача о рассеянии двух частиц, поясняются основные обозначения и приводятся формулы, необходимые в дальнейшем. Показывается, что в случае, когда взаимодействие задается в виде S - волнового одночленного сепарабельного потенциала, то двухчастичная длина рассеяния как функция g имеет вид

$$a(g) = \frac{g a^{exp}}{1 - \frac{g}{2} a^{exp} (g - 1)},$$

где a^{exp} - экспериментальное значение двухчастичной длины рассеяния, g^{-1} - протяженность потенциала.

В § 3 получено выражение для действительной части пион-ядер-

ной длины рассеяния в линейном по кратности πN -соударений приближении, которое для ядра с массовым числом A , числом протонов Z и числом нейтронов N имеет вид

$$a_{\pi A}^{(1)} = A \bar{a}_0 \pm (Z - N) \bar{a}_1,$$

где знаки \pm отвечают рассеянию положительных и отрицательных Π -мезонов соответственно, а величины \bar{a}_0 и \bar{a}_1 выражаются через экспериментальные длины πN -рассеяния с полными изоспинами $1/2$ и $3/2$ следующим образом:

$$a_0 = \frac{2}{3\gamma} \left(\ln |1 + \frac{a_{3/2}\gamma}{2}| + 2 \ln |1 + \frac{a_{1/2}\gamma}{2}| \right),$$

$$a_1 = -\frac{2}{3\gamma} \left(\ln |1 + \frac{a_{3/2}\gamma}{2}| - \ln |1 + \frac{a_{1/2}\gamma}{2}| \right).$$

Отметим, что выражение для $a_{\pi A}^{(1)}$ несмотря на линейность приближения по $a_{\pi N}$ содержит, как это следует из последних формул, эффекты перерассеяния Π -мезона во всех порядках. Проведенное сравнение с экспериментальными данными для ядер от d до ^{23}Na показывает, что уже в линейном приближении имеется удовлетворительное согласие полученных теоретических значений $a_{\pi A}^{(1)}$ с экспериментальными, в то время как линейное приближение в обычном подходе согласуется с опытными данными плохо.

В § 4 рассмотрено квадратичное приближение по πN -соударениям. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными значениями и другими теоретическими расчетами. Для πd -рассеяния исследована зависимость от πN -длины. Результат согласуется с расчетом, выполненным на основе трехчастичных уравнений Фаддеева.

В § 5 подводятся итоги проведенного исследования. В частности, рассматривается вопрос о сравнении построенного "унитаризованного" ряда многократного рассеяния с обычным рядом Ватсона и вопрос о том, какую информацию о структуре ядра можно извлечь, изучая длины пион-ядерного рассеяния?

Во второй главе диссертации на основе ЭКС-метода описан процесс порогового фоторождения Π^0 -мезонов на легчайших ядрах.

§ I содержит краткий обзор экспериментального и теоретического материала по фоторождению Π -мезонов вблизи порога на легчайших ядрах и постановку задачи.

Во втором параграфе рассмотрен процесс фоторождения Π^0 -мезонов на дейтроне. Находится приближенное решение ЭКС-уравнения для волновой функции πd -системы, анализируется вклад в этот процесс

NN -взаимодействия и количественно исследуется вопрос о роли эффектов двойного учета перерассеяний Π -мезонов. Найденное значение амплитуды $M_{\gamma d \rightarrow \pi^0 d} = -8,2 \cdot 10^{-3}$ см находится в согласии с экспериментальным $M_{\gamma d \rightarrow \pi^0 d}^{\text{экс}} = (-8,90 \pm 0,45) \cdot 10^{-3}$ см.

В § 3 и § 4 рассмотрен процесс фоторождения Π^0 -мезонов на ядрах ${}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}$ и ${}^6\text{Li}$. Найденное значение амплитуды для ядра ${}^3\text{He}$, равное $-5,85 \cdot 10^{-3}$ см, довольно хорошо согласуется с экспериментальным ($M_{\gamma {}^3\text{He} \rightarrow \pi^0 {}^3\text{He}}^{\text{экс}} = (-5,80 \pm 0,60) \cdot 10^{-3}$ см). Для ядер ${}^3\text{H}$ и ${}^6\text{Li}$ экспериментальных значений пока нет. Полученные теоретические значения равны: $M_{\gamma {}^3\text{H} \rightarrow \pi^0 {}^3\text{H}} = -10,1 \cdot 10^{-3}$ см, и $M_{\gamma {}^6\text{Li} \rightarrow \pi^0 {}^6\text{Li}} = -6,3 \cdot 10^{-3}$ см, причем ядро ${}^6\text{Li}$ было описано как система из трех тел, $d + n + p$, на основе уравнений Фаддеева. Показано, что найденная волновая функция ядра ${}^6\text{Li}$ хорошо описывает зарядовый формфактор этого ядра при малых переданных импульсах.

В § 5 обсуждаются полученные результаты применения ЭКС-метода к описанию процесса фоторождения Π^0 -мезонов на ядрах.

В третьей главе предложено обобщение ЭКС-метода и рассмотрены примеры его использования.

В § 1 отмечается, что "естественная" формулировка задачи на основе ЭКС-метода, при которой начальные условия отвечают случаю, когда взаимодействие выключено ($g = 0$), может быть обобщена. В результате такого обобщения в качестве начальных условий можно использовать решение для любого модельного гамильтониана, тем самым описывать эволюцию системы начиная не от свободного движения, а от некоторого произвольного $g = g_0$.

§ 2 посвящен выводу основных уравнений обобщенной формулировки ЭКС-метода.

В § 3 на основе полученных уравнений рассмотрена задача о рассеянии частицы на системе двух связанных частиц. Эволюционная константа g ставится перед полным гамильтонианом мишени. Показывается, что при $g = 0$ задача решается точно и что использование уравнений ЭКС-метода можно рассматривать как способ выхода за рамки приближения фиксированных центров. Построено приближенное решение эволюционных уравнений и проведен количественный расчет длины рассеяния πd -системы с целью демонстрации эффективности метода.

§ 4 также посвящен рассмотрению трехчастичной πd -системы в случае, когда эволюционная константа выключает взаимодействие между частицами мишени. При такой формулировке имеется возможность для оценки вклада от так называемого непрямого взаимодействия, ко-

торый для πd -системы составляет $\sim 35\%$. Найденное численное значение длины πd -рассеяния хорошо согласуется с расчетом на основе уравнений Фаддеева и экспериментальной величиной.

Четвертая глава посвящена исследованию поведения трехчастичной длины рассеяния в пределе нулевой энергии связи мишени при нерезонансном характере сил и использованию найденного значения в качестве начального условия для ЭКС-уравнений.

§ I содержит постановку задачи. В § 2 предел нулевой энергии связи мишени проанализирован в рамках модели фиксированных центров. Показано, что в этом пределе члены, отвечающие перерассеяниям, отсутствуют.

В § 3 исследование предела нулевой энергии связи мишени для длины рассеяния проводится на основе точных трехчастичных уравнений Фаддеева. Показывается, что в пределе нулевой энергии связи мишени трехчастичная длина рассеяния так же, как в модельном примере, определяется суммой элементарных длин рассеяния, т.е. перерассеяния в этом пределе исчезают.

В § 4 полученное соотношение между трехчастичными и двухчастичными длинами рассеяния в пределе нулевой энергии связи мишени использовано в качестве начального условия при описании длины рассеяния Π -мезонов на дейтроне на основе ЭКС-метода, который в данном случае позволяет найти вклад от членов, связанных с отличием от нуля энергии связи мишени.

В § 5 проведено качественное сравнение рассматриваемого случая нерезонансного взаимодействия налетающей частицы с составляющими мишени со случаем резонансного взаимодействия всех трех частиц в пределе нулевой энергии связи мишени и приведены качественные соображения на случай обобщения рассмотренного предельного соотношения на n -тельные системы.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении А на основе уравнений Фаддеева для рассеяния Π -мезонов на дейтроне анализируется вклад NN -взаимодействия в статическом пределе.

В приложении Б сформулирована трехчастичная модель ядра ${}^6\text{Li}$.

В приложении В найдено в статическом пределе точное решение системы интегральных уравнений Фаддеева для длины πd -рассеяния.

В приложении Г приводятся уравнения Фаддеева для рассеяния частицы на дейтроне с учетом конечности радиуса действия сил и спиновой (изоспиновой) структуры взаимодействий.

Основные результаты, полученные в диссертации

1. В рамках ЭКС-метода получены выражения для действительной части длины пион-ядерного рассеяния, согласно которым выполнен расчет для ядер от d до ^{23}Na . Результаты расчета сравниваются с другими расчетами и экспериментом. Найденные значения хорошо согласуются с экспериментальными. Исследована зависимость действительной части длины пион-ядерного рассеяния от структуры рассматриваемых ядер и от наборов элементарных длин πN -рассеяния.

2. На основе ЭКС-метода исследован процесс фоторождения Π^0 -мезонов вблизи порога на легчайших ядрах: d , ^3He , ^3H , ^6Li . Полученные значения амплитуд фоторождения на ядрах d и ^3He хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для ядер ^3H и ^6Li сделано теоретическое предсказание, причем ядро ^6Li рассмотрено на основе уравнений Фаддеева для трех частиц: $d + n + p$. Найденная волновая функция ядра ^6Li хорошо описывает экспериментальные данные по зарядовому фактору ядра при малых переданных импульсах. Обнаружена слабая чувствительность амплитуды процесса фоторождения Π^0 -мезонов к наборам πN -данных и к унитаризации, даваемой ЭКС-методом. Проведен количественный анализ роли двойного учета перерассеяний Π -мезонов.

3. Предложено обобщение ЭКС-метода, позволяющее в качестве начальных условий использовать известные решения для некоторого модельного гамильтониана или для некоторой части исходного гамильтониана. При этом оставшаяся часть гамильтониана не обязательно должна быть малой. Предложенное обобщение ЭКС-метода иллюстрируется двумя примерами, связанными с πd -системой. В первом примере в качестве начального условия взяты решения по модели фиксированных центров. Показано, как с помощью ЭКС-метода можно выйти за рамки этой модели. Во втором примере рассмотрена эволюция системы по константе, включающей взаимодействие между частицами мишени. Оценен вклад от непрямого взаимодействия. Полученные в рассмотренных примерах значения длин πd -рассеяния находятся в согласии с расчетом на основе уравнений Фаддеева.

4. В пределе нулевой энергии связи мишени исследовано поведение трехчастичной длины рассеяния одной частицы на связанной паре из двух других при условии, что взаимодействие налетающей частицы с частицами мишени не имеет резонансного характера. Показано, что в этом пределе трехчастичная длина рассеяния равна сумме элементарных длин, т.е. перерассеяния отсутствуют. Исследование проведено в модели фиксированных центров и на основе точных трехчастичных

уравнений Саидеева. Полученное соотношение между трехчастичной и двухчастичными длинами рассеяния в пределе нулевой энергии связи мишени использовано в качестве начального условия при описании

πd -рассеяния в ЖК-методе, который в данном случае применен для нахождения членов, связанных с отличием от нуля энергии связи мишени. Полученные таким способом значения длины πd -рассеяния хорошо согласуются с экспериментальным.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. V.V. Belyaev, O.P. Solovtsova. Calculation of π -nuclear scattering lengths for light nuclei. In: Proceedings of the Ninth International Conference on the Few Body Problem, ed. M.J. Moravcsik et al., Oregon, 1980, p. V5 - M5.
2. В.В.Беляев, О.П.Соловцова. Расчет длин π -ядерного рассеяния для легких ядер. ИФ, 1981, т. 33, с. 699-708; препринт ОИИ, P4-80-524, Дубна, 1980.
3. В.В.Беляев, О.П.Соловцова. О возможных обобщениях эволюционного по константе связи метода. ИФ, 1981, т. 34, с. 339-343; preprint JINR E4-80-637, Dubna, 1980.
4. В.В.Беляев, О.П.Соловцова. Об одном предельном соотношении в теории трехчастичного рассеяния. Препринт ОИИ, P4-81-199, Дубна, 1981.
5. V.V. Belyaev, O.P. Solovtsova. Threshold π^0 -meson photoproduction on the lightest nuclei. Preprint JINR, E4-81-282, Dubna, 1981.

Литература

1. T. Mizutani, D.S. Koiten. Coupled channel theory of Pion-Deuteron Reaction Applied to Threshold Scattering. Ann.Phys., 1977, v. 109, p. 1-40; Coupled Channel theory of Pion-Nucleus Reactions. Phys. Rev., 1980, v. 22, p. 1657-1669.
2. Г.М.Ваградов. Пион-ядерные взаимодействия и структура ядра. В сб.: Труды Международной школы по структуре ядра. Алуста, ОИИ, Д4-80-385, Дубна, 1980, с. 189-209.
3. Д.А.Киржниц. О неоднозначности решения задачи рассеяния. ЖЭТФ, 1965, т. 49, с. 1544-1555; Дифференциальная по константе связи формулировка квантовой теории поля. В сб.: Проблемы теоретической физики. Памяти И.В.Тамма, "Наука", М., 1972, с. 74-85.
4. Д.А.Киржниц, Г.Ю.Кричков, Н.Ж.Такибаев. Новый подход в квантовой теории. УАН, 1979, т. 10, с. 741-783.
5. Д.А.Киржниц, Н.Ж.Такибаев. Новый подход в задаче трех и более

тел. АФ, 1977, т. 25, с. 700-710.

6. I.H.Sloan. Approximation Method for Three-Body Collisions. Phys.Rev., 1968, v.165, p. 1587-1594.
7. K.L.Kowalski. K Matrix for Three-Particle Scattering. Phys. Rev. D, 1972, v. 5, p. 395-403.
8. L.S.Kisslinger. Determination of Nuclear Spectroscopic Factors by Dispersion Relations. Phys.Rev.Lett., 1977, v.29, p.505-509.
9. Д.А.Киржниц, Н.Ш.Такибаев. Об энергии связи тритона. Письма в ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 73-76.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июля 1981 года.

Редактор Н.Н.Зрелова.

Макет Т.Е.Жильцовой.

Подписано в печать 08.07.81.

Формат 60x90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 1,01.

Тираж 140. Заказ 29896.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Дубна Московской области.