

ор-179

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4 - 11184

ФАЙФМАН
Марк Петрович

ПРОЦЕССЫ РАССЕЯНИЯ μ^- -МЕЗОАТОМОВ
И ОБРАЗОВАНИЯ μ^- -МЕЗОМОЛЕКУЛ В СМЕСИ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук Л.И. ПОНОМАРЕВ.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук В.Б. БЕЛЯЕВ,
доктор физико-математических наук Б.М. СМЕРНОВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета.

Автореферат разослан " " 1978 года.

Защита диссертации состоится " " 1978 года
на заседании специализированного Ученого совета К-56 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследова-
ний (Московская обл., г. Дубна).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И. КУРАВЛЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Рассеяние μ^- -мезонов и образо-
вание μ^- -мезомолекул являются частью весьма разветвленной це-
почки мезонных процессов, протекающих при торможении μ^- -
мезонов в смеси изотопов водорода [1]. Знание скоростей этих
процессов необходимо для изучения каталитической реакции синтеза ядер
изотопов водорода в μ^- -мезомолекуле, а также для интерпрета-
ции экспериментов по изучению слабого взаимодействия μ^- -мезо-
нов с ядрами изотопов водорода.

Процессы рассеяния μ^- -мезонов водорода являются
предметом как экспериментальных работ [2,3], так и теоретиче-
ских исследований [4-6]. Оценки сечений упругого рассеяния
реакций $p\mu + p \rightarrow p\mu + p$, $d\mu + d \rightarrow d\mu + d$ весьма разли-
чаются между собой, причем в некоторых случаях [2,3] более
чем на порядок величины.

До недавнего времени также имели место заметные расхожде-
ния между вычисленной [4,5] и измеренной [7] скоростями образо-
вания мезомолекул $p\mu$, тогда как теоретические [4,5] и
экспериментальные [7,8] значения скорости образования молекул
 $p\mu\mu$ хорошо согласуются между собой.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Настоящая диссертация посвящена дальнейшему теоретическому изучению процессов рассеяния мезонов и образования мезомолекул, которое необходимо как для выяснения причины указанных расхождений, так и в связи с созданием более совершенной экспериментальной аппаратуры в этой области исследований.

Основная цель работы состояла в том, чтобы развить соответствующие методы расчета и устранить отмеченные выше отличия между теоретическими и экспериментальными данными, имевшими место при изучении процессов рассеяния мезонов и образования мезомолекул.

Научная новизна и практическая ценность. В данной диссертации впервые получены асимптотические разложения эффективных потенциалов задачи трех тел, взаимодействующих по закону Кулона, учет которых важен при расчетах таких систем.

На основе метода фазовых функций развита схема решения двухканальной задачи рассеяния, которая обладает достаточной общностью и применима к целому ряду задач, в которых необходимо находить фазы, сечения и волновые функции, соответствующие процессу рассеяния. Впервые получена не содержащая сингулярностей при численном интегрировании система дифференциальных уравнений для фазовых параметров, описывающих процесс рассеяния в случае одного закрытого канала.

Изложенная в диссертации схема расчетов реализована в виде алгоритма и соответствующего комплекса программ на языке FORTRAN и была эффективно использована для вычисления сечений процессов рассеяния мезонов и скоростей образования мезомолекул.

В сечении упругого рассеяния d -волны в реакциях $d\mu+p \rightarrow d\mu+p$ и $t\mu+p \rightarrow t\mu+p$ обнаружен резонанс,

наличие которого весьма существенно при исследовании процессов образования мезомолекул.

Устранены расхождения между экспериментальными данными и теоретическими оценками для значения величин скорости образования мезомолекулы $pd\mu$.

Следующие результаты выдвигаются для защиты

- 1) Асимптотические разложения эффективных потенциалов задачи трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.
- 2) Схема решения двухканальной задачи рассеяния, развитая на основе метода фазовых функций как для двух открытых каналов, так и для случая, если один канал закрыт.
- 3) Вычисление сечений процессов упругого рассеяния с учетом закрытого канала: $d\mu+p$ и $p\mu+p$, $d\mu+d$, $t\mu+t$.
- 4) Нахождение скоростей образования мезомолекул $pp\mu$, $pd\mu$, $pt\mu$, $dd\mu$, $dt\mu$, $tt\mu$.
- 5) Вычисление скоростей переходов мезомолекул $pd\mu$, $pt\mu$ и $dt\mu$ в основное состояние.

Апробация работы. Результаты данной диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики и Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, а также на III Всесоюзной школе по физике атомных столкновений (г. Рига, 1974 г.), на VI Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Санта Фе, 1975 г.), на Международном симпозиуме по проблемам мезонной химии и мезомолекулярным процессам в веществе (г. Дубна, 1977 г.) и на VII Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (г. Цюрих, 1977 г.).

Публикации. Результаты настоящей диссертации опубликованы в пяти работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений; она содержит 119 страниц машинописного текста, 21 рисунок и библиографический список из 74 названий.

Содержание работы

Во введении дан короткий обзор цепочки процессов, протекающих при торможении μ^- -мезонов в смеси изотопов водорода. Из связанной картины этих процессов выделены процессы рассеяния мезонов и образования мезомолекул. Для этих процессов отмечены факты существования расхождений между теоретическими и экспериментальными оценками. В этой же главе сформулированы задачи, поставленные в данной диссертации, приведены в общих чертах методы их решения и кратко перечислены основные полученные результаты.

Малые размеры нейтральных мезонов позволяют пренебречь влиянием электронных оболочек атомов водорода на процессы столкновения мезонов с ядрами изотопов водорода и рассмотреть эти процессы как квантовомеханическую задачу о медленных столкновениях в системе трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.

В главе II приводится постановка задачи трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.

В § I формулируется общий подход к решению такой задачи. Предлагаемый метод решения является последовательной реализацией адiabатического метода, развитого в работах [9,10]. Использование этого метода основано на малости отношения массы мезо-

на к массам ядер, что позволяет приближенно разделить мезонное и ядерное движения. Излагаемый метод состоит в разложении полной волновой функции системы трех частиц по решениям задачи двух центров, т.е. задачи о движении отрицательно заряженной частицы (μ^- -мезона) в поле двух закрепленных ядер с положительными зарядами Z_1 и Z_2 , удаленных на расстояние R .

[II]. Усреднение гамильтониана системы трех частиц по решениям задачи двух центров приводит к бесконечномерной системе связанных уравнений Шредингера, описывающей относительное движение ядер.

В § 2 приведены оценки точности двухуровневого приближения адiabатического метода, которое используется для решения задач, поставленных в диссертации. Приближение двух уровней соответствует учету лишь двух состояний задачи двух центров и приводит к системе двух связанных уравнений Шредингера, имеющей вид:

$$\frac{d^2 \chi_1}{dR^2} + \left[k_1^2 - \frac{J(J+1)}{R^2} \right] \chi_1 = K_{11} \chi_1 + K_{12} \chi_2 + 2Q_{12} \frac{d\chi_2}{dR},$$
$$\frac{d^2 \chi_2}{dR^2} + \left[k_2^2 - \frac{J(J+1)}{R^2} \right] \chi_2 = K_{21} \chi_1 + K_{22} \chi_2 + 2Q_{21} \frac{d\chi_1}{dR}. \quad (I)$$

Здесь k_1 и k_2 - импульсы в соответствующих каналах реакции, K_{ij} и Q_{ij} - эффективные потенциалы, которые выражаются через термы задачи двух центров и матричные элементы от операторов ядерного движения по волновым функциям задачи двух центров. Погрешность двухуровневого приближения определяет-

ся матрицей эффективных потенциалов в задаче рассеяния (I), которая задается с точностью $\sim m/M$ включительно, где

$$M = \frac{M_0}{m}, \quad \frac{1}{m} = \frac{1}{M_\mu} + \frac{1}{4M_0}, \quad \frac{1}{M_0} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}. \quad (2)$$

M_1 и M_2 - массы ядер изотопов водорода ($M_1 \geq M_2$), M_μ - масса μ^- - мезона.

В главе III получены асимптотические разложения по степеням R^{-1} эффективных потенциалов $K_{ij}(R)$ и $Q_{ij}(R)$, входящих в систему уравнений (I). Для нахождения асимптотики этих потенциалов были использованы асимптотические выражения для собственных функций задачи двух центров при больших значениях R [12].

В главе IV изложена методика решения системы уравнений (I), описывающей процессы рассеяния.

В § I формулируется двухканальная задача рассеяния как для двух открытых каналов, так и для случая, если один канал закрыт. Приводятся основные понятия и определения, характеризующие процесс рассеяния.

В § 2 система уравнений (I) решается методом фазовых функций [13], который состоит в получении и решении системы семи уравнений: трех нелинейных уравнений первой степени для параметров, через которые выражаются фазы рассеяния, и четырех линейных уравнений для параметров, определяющих нормировку волновых функций. Схема вычислений развита как для случая, когда оба канала открыты, так и для рассеяния с учетом закрытого канала.

В главе V исследуются процессы упругого рассеяния мезоатомов в смеси изотопов водорода с учетом закрытого канала.

В § I проведен расчет процесса рассеяния мезоатомов дейтерия $d\mu$ на протонах. Получены волновые функции, представляющие процесс рассеяния $d\mu+p$ в случае двух открытых каналов. Приводятся результаты численных расчетов процесса

$$d\mu+p \rightarrow d\mu+p \quad (3)$$

при различных энергиях столкновения ниже порога реакций. При энергии столкновения $E \approx 0,6$ эВ сечение упругого рассеяния

S-волны реакции (3) имеет глубокий минимум, найденный ранее в работе [5] при $E \approx 0,2$ эВ. Существование этого минимума важно для интерпретации результатов экспериментов по изучению каталитиза ядерных реакций синтеза. Существенный вклад в полное сечение вносит d-фаза, поскольку упругое рассеяние d-волны носит резонансный характер. Вычислены волновые функции процесса рассеяния (3) в случае закрытого канала.

В § 2 изучаются процессы упругого рассеяния

$$\begin{aligned} p\mu+p &\rightarrow p\mu+p, \\ d\mu+d &\rightarrow d\mu+d, \\ t\mu+t &\rightarrow t\mu+t. \end{aligned} \quad (4)$$

При описании процессов (4) в области тепловых энергий столкновений необходимо учитывать наличие сверхтонкого расщепления ΔE уровней энергии мезоатомов водорода. Система уравнений, представляющая процессы рассеяния (4) в нижнем состоянии сверхтонкой структуры мезоатомов с учетом влияния закрытого канала на открытый, совпадает с системой (I) [14]. Результаты вычислений сечений процессов упругого рассеяния (4) сравниваются с прежними теоретическими оценками и экспериментальными дан-

ными. Анализ результатов показывает, что в нерезонансных ситуациях (реакция $d\mu + d$) достигнуто хорошее совпадение с прежними значениями сечений упругого рассеяния, тогда как для резонансной ситуации (реакция $p\mu + p$) результаты вычислений расходятся с прежними расчетами и с экспериментальными оценками. Указана причина этих расхождений, заключенная в том, что прежние теоретические работы использовали приближение длинным рассеянием для всей области энергии столкновений $\epsilon < \Delta E$, тогда как это понятие справедливо лишь в узкой области $\epsilon \ll \Delta E$. Основной причиной различия между экспериментальными данными и проведенными расчетами является недостаточная точность двухуровневого приближения. Отмечено, что последовательный учет вклада высших уровней и уточнение формы эффективных потенциалов за счет спин-спиновых взаимодействий мезона и ядер должно привести к лучшему согласию с экспериментом.

В главе VI представлены процессы образования μ -мезомолекул водорода.

В § I вычислены скорости образования мезомолекул $pp\mu$, $pd\mu$, $pt\mu$, $dd\mu$, $dt\mu$, $tt\mu$ и изучена их зависимость от энергии столкновения соответствующих мезонов. В качестве механизма образования мезомолекул рассмотрены электрические дипольные E1 и монопольные E0 переходы с отдачей энергии связи на конверсию электрона молекулы изотопов водорода [1,4,5]. Вычисленные значения скоростей образования мезомолекул сравниваются результатами предыдущих теоретических расчетов и экспериментальными данными. Достигнуто хорошее согласие для скоростей образования мезомолекулы $pp\mu$, а также устранено расхождение между прежними теоретическими и экспериментальными значениями скоростей образования мезомолекулы $pd\mu$.

В § 2 вычислены скорости оже-переходов образованных в возбужденных состояниях мезомолекул $pd\mu$, $pt\mu$ и $dt\mu$ в основное состояние. Большие значения для скорости девозбуждения этих мезомолекул ($\sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$) показывают, что реакции синтеза ядер мезомолекул протекают именно из основного состояния соответствующих мезомолекул.

В приложении I изложены детали расчетов, существенные при практической реализации метода фазовых функций.

В приложении II приведены эквивалентные системе уравнений (I) уравнения для фазовых параметров в предельных случаях

$$k_i \rightarrow 0 \quad (i = 1, 2).$$

В приложении III вынесены технические детали вычисления интегралов, которые используются для нахождения скоростей образования мезомолекул.

Основные результаты диссертации

1. Получены асимптотические разложения эффективных потенциалов задачи трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.

2. Развита схема решения двухканальной задачи рассеяния на основе метода фазовых функций как для двух открытых каналов, так и для случая, если один канал закрыт. Получены удобные при численном интегрировании системы дифференциальных уравнений для фазовых параметров, описывающих процессы рассеяния.

3. Обнаружен резонанс в сечении упругого рассеяния d -волны в реакциях $d\mu + p$ и $t\mu + p$. Уточнено положение минимума в сечении упругого рассеяния для S -волны (для реакции $d\mu + p \rightarrow d\mu + p$ при энергии столкновения $\epsilon \approx 0,6 \text{ эВ}$; для реакции $t\mu + p \rightarrow t\mu + p$ при $\epsilon \approx 1,6 \text{ эВ}$).

4. Вычислены сечения процессов упругого рассеяния $p\mu+p$, $d\mu+d$, $t\mu+t$ в нижнем состоянии сверхтонкой структуры мезоатомов с учетом закрытого канала. Для реакции $d\mu+d$ получено хорошее согласие с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными.

5. Вычислены скорости образования мезомолекул $pp\mu$, $p d\mu$, $p t\mu$, $dd\mu$, $d t\mu$, $t t\mu$. Устранены прежние несогласования между теоретическими расчетами и экспериментальными оценками для скорости образования мезомолекул $p d\mu$. Получено также хорошее согласие с экспериментом для скорости образования мезомолекулы $pp\mu$.

6. Вычислены скорости оже-переходов мезомолекул $p d\mu$, $p t\mu$ и $d t\mu$ в основное состояние.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. А.В.Матвеевко, Л.И.Пономарев, М.П.Фейфман. ЖЭТФ, 68, 437, 1975; Препринт ОИЯИ Р4-8232, Дубна, 1974.
2. М.Р.Фаифман, Л.И.Пономарев, С.И.Винитский. J. Phys. B, 9, 2255, 1976; Препринт ОИЯИ Р4-9312, Дубна, 1975.
3. Л.И.Пономарев, М.П.Фейфман. ЖЭТФ, 71, 1689, 1976; Препринт ОИЯИ Р4-9736, Дубна, 1976.
4. М.П.Фейфман. ЯФ, 26, 433, 1977; Препринт ОИЯИ Р4-9960, Дубна, 1976.
5. Л.И.Пономарев, М.П.Фейфман. Сообщение ОИЯИ Р4-10635, Дубна, 1977.

Литература

1. S.S.Gerstein, L.I.Ponomarev. Mesomolecular Processes Induced by μ^- and π^- Mesons, in "Muon Physics", ed. W.Hughes and C.S.Wu, v. III, 143, Academic Press, New York, 1975.
2. В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.И.Москалев, В.В.Фильченков, М.Фримл. ЖЭТФ, 47, 1243, 1964; В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.В.Фильченков. ЖЭТФ, 49, 393, 1965; В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.И.Москалев, В.В.Фильченков. ЖЭТФ, 50, 1235, 1966.
3. A.Alberigi Quaranta, A.Bertin, G.Matone, F.Palmonari, A.Placchi, P.Dalpiatz, G.Torelli, E.Zavattini. Nuovo Cim., 47B, 72, 1967.
4. Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн. УФН, 71, 581, 1960.
5. S.Cohen, D.L.Judd, R.J.Riddell. Phys. Rev., 119, 384, 1960.
6. А.В.Матвеевко, Л.И.Пономарев. ЖЭТФ, 59, 1953, 1970.
7. E.Bleser, L.Lederman, J.Rosen, J.Rothberg, E.Zavattini. Phys. Rev., 132, 2679, 1963; G.Conforto, C.Rubbia, E.Zavattini, S.Focardi. Nuovo Cim., 33, 1001, 1964; В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, В.И.Петрухин, А.И.Руденко, В.М.Суворов, В.В.Фильченков, Г.Хемниц, Н.Н.Хованский, Б.А.Хоменко. ЖЭТФ, 71, 1680, 1976.
8. В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, Е.А.Кушниренко, В.И.Москалев, С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 42, 439, 1962; Ю.Г.Будяшов, П.Ф.Ермолов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.И.Мухин, К.О.Огянесян. Препринт ОИЯИ Р15-3964, Дубна, 1968.
9. А.В.Матвеевко, Л.И.Пономарев. ТМФ, 12, 64, 1972.
10. С.И.Виницкий, Л.И.Пономарев. ЯФ, 20, 576, 1974.
11. И.В.Комаров, Л.И.Пономарев, С.Ю.Славянов. Сфероидальные и кулоновские сфероидальные функции. М., Наука, 1976.
12. R.J.Damburg, R.Kh.Propin. J. Phys. B 1, ser. 2, 681, 1968.
13. В.В.Бабинов. Метод фазовых функций в квантовой механике. М., Наука, 1976.
14. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 34, 463, 1958; ЖЭТФ, 40, 698, 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 декабря 1977 года.