

C-616

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4 - 11699

СОМОВ
Лев Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ
В РАССЕЯНИИ μ -МЕЗОАТОМОВ
И ОБРАЗОВАНИИ dd μ -МЕЗОМОЛЕКУЛ 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.П. СМИЛГА ,

доктор физико-математических наук

Б.Н. ЗАХАРЬЕВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Ленинградский государственный университет им. А.А. Жданова .

Защита диссертации состоится " " _____ 1978 года на заседании Специализированного ученого совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Московская область, г. Дубна).

Автореферат разослан " " _____ 1978 года.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И. ЖУРАВЛЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Процессы, протекающие при торможении отрицательно заряженных M -мезонов в смеси изотопов водорода, являются предметом многих экспериментальных и теоретических исследований^{/1/}. С вводом в строй мезонных фабрик (SIN, Los Alamos, TRIUMF и др.) возродился интерес к мезоатомным и мезомолекулярным процессам в веществе. В частности, в последнее время одной из актуальных задач стало детальное изучение мезоатомных и мезомолекулярных процессов в смеси изотопов водорода.

Среди процессов, протекающих при торможении отрицательно заряженных M -мезонов в смеси изотопов водорода, особый интерес представляет резонансное рассеяние образовавшихся M -мезоатомов и резонансное образование M -мезомолекул. Этот интерес, в частности, определяется тем обстоятельством, что успешное количественное описание этих процессов является наиболее критичной проверкой разработанных сейчас методов расчета характеристик системы трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.

Измеренные^{/2-3/} и вычисленные^{/1,4,5,6/} сечения процесса упругого рассеяния $pM(\uparrow\downarrow) \cdot p \rightarrow pM(\uparrow\downarrow) \cdot p$ в нижнем состоянии сверхтонкой структуры существенно различаются между собой, в некоторых случаях более чем на порядок величины. Для процесса образования ddm -молекул также имели место весьма сильные различия между вычисленными теоретически скоростями образования ddm -молекул^{/7/} и результатами экспериментов^{/8-12/}.

Настоящая диссертация посвящена дальнейшему теоретическому изучению процессов рассеяния мезоатомов и образования мезомолекул, которое необходимо как для выяснения причин указанных разногласий, так и в связи с увеличением числа экспериментальных работ в этой области физики, проводимых на сильноточных ускорителях и с более совершенной экспериментальной аппаратурой.

Основная цель работы состояла в том, чтобы развить соответствующие методы расчета, найти причину отмеченных расхождений между теоретическими и экспериментальными значениями, имевшими место при изучении процесса рассеяния $pM + p$ и скорости образования ddm -молекул, и устранить их.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна и практическая ценность

В данной диссертации впервые вычислены волновые функции непрерывного спектра задачи двух центров квантовой механики, а также неадиабатические матричные элементы, связывающие состояния дискретного и непрерывного спектров задачи двух центров, учет которых оказался очень существенным при расчете резонансных процессов в системе трех тел.

На основе непрерывного метода Ньютона^{/3,4/} развита схема решения задачи рассеяния как задачи на собственные значения, которая обладает достаточной общностью и применима к целому ряду задач и в которой необходимо находить фазы и волновые функции, соответствующие процессу рассеяния. Такая постановка задачи рассеяния является в значительной степени новой и вызвана тем, что классические методы решения задач рассеяния с учетом закрытых каналов наталкиваются на вычислительные трудности, связанные с неустойчивостью решений в закрытых каналах. Разработанный метод позволяет устранить эти трудности, а также проводить все вычисления с высокой точностью, особенно в области резонансного изменения фаз рассеяния^{/15/}. Во многих задачах рассеяния, рассмотренных в диссертации, метод решения представляется более естественным, чем общепринятое, поскольку в нем открытые и закрытые каналы реакции равноправны и граничные условия в них задаются единообразно.

Для процесса рассеяния $pM+p$ из проведенных нами исследований следует вывод о его критической зависимости от формы эффективных потенциалов задачи. Предложен алгоритм, позволяющий получать разумные результаты даже в этой критической области. Различные методы вычисления позволили также устранить расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями скорости образования ddM -молекул.

Следующие результаты выдвигаются для защиты

- 1) Вычисление волновых функций непрерывного спектра задачи двух центров квантовой механики.
- 2) Создание метода вычисления фаз рассеяния задачи двух кулоновских центров.
- 3) Вычисление неадиабатических матричных элементов, связывающих состояния дискретного и непрерывного спектров задачи двух центров.

4) Создание метода решения задачи рассеяния как задачи на собственные значения.

5) Вычисление сечений процессов упругого рассеяния $pM+p$, $dM+d$.

6) Вычисление скорости резонансного образования молекул ddM .

Апробация работы. Результаты данной диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики, Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединённого института ядерных исследований, а также 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, 29 января – 2 сентября 1977 г.

Публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в шести работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения; она содержит 138 страниц машинописного текста, 47 рисунков и библиографический список из 79 названий.

Содержание работы.

Во введении сформулированы задачи, которые решаются в диссертации, и намечена схема их решения. Для значений сечения рассеяния $pM+p \rightarrow pM+p$ и скорости образования ddM -молекулы отмечаются существенные расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами.

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

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

В § I формулируется общий подход к решению такой задачи. Предлагаемый метод решения является реализацией адиабатического метода, который наиболее последовательно был развит в работах^{/16, 17/}. Использование этого метода основано на малости отношения массы мезона к массам ядер, участвующих в процессах столкновения, что

позволяет приближенно разделить движение мезонов и ядер. Для реализации адиабатического метода необходимо предварительно решить задачу двух центров квантовой механики, т.е. задачу о движении отрицательно заряженной частицы в поле двух закрепленных ядер с положительными зарядами Z_a и Z_b , разделенных расстоянием $R/18$. Усреднение гамильтониана трех частиц по решениям задачи двух центров приводит к бесконечной системе интегро-дифференциальных уравнений второго порядка, описывающей относительное движение ядер.

В § 2 рассмотрено двухуровневое приближение адиабатического метода, которое используется для решения задачи рассеяния $pM+p \rightarrow pM+p$. Приближение двух уровней соответствует учету лишь двух состояний задачи двух центров. Относительное движение ядер в этом случае описывается системой двух уравнений второго порядка:

$$\frac{d^2 \chi_1}{dR^2} + \left[2ME - \frac{J(J+1)}{R^2} \right] \chi_1 = H_{11} \chi_1 + H_{12} \chi_2 + 2Q_{12} \frac{d\chi_2}{dR},$$

$$\frac{d^2 \chi_2}{dR^2} + \left[2ME - \frac{J(J+1)}{R^2} \right] \chi_2 = H_{21} \chi_1 + H_{22} \chi_2 + 2Q_{21} \frac{d\chi_1}{dR}.$$

Здесь E - энергия столкновения, M - приведенная масса сталкивающихся частиц, H_{ij} и Q_{ij} - эффективные потенциалы, которые выражаются через термины задачи двух центров и неадиабатические матричные элементы от операторов ядерного движения по волновым функциям задачи двух центров.

Во II главе решается задача двух центров квантовой механики в непрерывном спектре.

В § I вводятся угловые кулоновские сфероидальные функции (УКСФ) $\Sigma_{mg}(\xi; k, R)$ и радиальные кулоновские сфероидальные функции (РКСФ) $\Pi_{mg}(\xi; k, R)$. В § 2 обсуждаются их простейшие аналитические свойства. Излагается алгоритм вычисления собственных значений $\lambda_{mg}(k, R)$ углового уравнения.

В § 3-5 рассматривается алгоритм вычисления УКСФ и РКСФ, позволяющий находить их с точностью $\sim 10^{-7}$.

В § 6 приводится алгоритм вычисления фаз рассеяния $\Delta_{mg}(k, R)$,

которые являются аналогами кулоновских фаз рассеяния на одном кулоновском центре. Вычисленные фазы рассеяния сравниваются с их асимптотическими разложениями в пределе $R \rightarrow 0$ и $R \rightarrow \infty$. Наконец, показано, что при определенном соотношении между k и R двухцентровая фаза равна одноцентральной фазе рассеяния на кулоновском потенциале с суммарным зарядом обоих центров.

В III главе излагается алгоритм вычисления неадиабатических матричных элементов, связывающих состояния дискретного и непрерывного спектров задачи двух центров. Эти матричные элементы, вместе с терминами $E_j(R)$ задачи двух центров и матричными элементами, связывающими состояния дискретного спектра, представляют собой полный набор эффективных потенциалов бесконечной системы дифференциальных уравнений, к которой сводится задача трех тел при разложении ее по адиабатическому базису.

В § I приводится вид матричных элементов в сфероидальной системе координат.

В § 2 приводится алгоритм вычисления этих матричных элементов.

В IV главе решается задача рассеяния как задача на собственные значения.

В § I формулируется общая постановка задачи рассеяния и перечисляются трудности, возникающие при решении задач рассеяния традиционными методами.

В § 2 приводится метод решения задачи рассеяния как задачи на собственные значения.

В § 3 рассматриваются некоторые вычислительные детали реализации алгоритма решения задачи рассеяния в предлагаемой постановке.

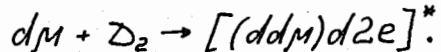
В § 4 приводится конкретный пример расчета задачи рассеяния с двумя открытыми каналами.

В V главе приводятся результаты вычислений сечения рассеяния для процесса $pM+p \rightarrow pM+p$ при энергиях $E < 0,3$ эВ, и вычисляется скорость резонансного образования ddM -молекул.

В § I рассматривается процесс рассеяния $pM+p \rightarrow pM+p$. Резонансный характер рассеяния этого процесса проявляется в том, что уже небольшие поправки к эффективным потенциалам существенно сказываются на сечении. Именно критическая зависимость сечения

от формы потенциала являлась основной причиной расхождения между экспериментальными^{/2,3/} и вычисленными^{/1,4-6/} сечениями рассеяния мезоатома водорода на протоне.

В § 2 изучается резонансный механизм образования μ -мезомолекул дейтерия. Суть резонансного механизма, предложенного Вессманом^{/7/}, состоит в том, что энергия, освобождающаяся при образовании $dd\mu$ -молекулы, передается на возбуждение колебаний молекулы D_2 , с которой сталкивается мезоатом $d\mu$:



Такой механизм возможен только в том случае, если среди уровней $dd\mu$ -молекулы существует уровень с энергией $\epsilon \approx -2$ эВ. К настоящему времени этот уровень вычислен с точностью $\sim 0,1$ эВ^{/19/}. Этой точности оказалось достаточно, чтобы вычислить скорость резонансного образования $dd\mu$ -молекул.

В § 3 приводятся результаты вычисления волновых функций молекулы D_2 на основе метода, изложенного в главе IV.

В § 4 излагается схема вычисления скорости резонансного образования $dd\mu$ -молекул, максимальное значение которой найдено равным $\lambda_{max} = 0,80 \cdot 10^6$ с⁻¹, что хорошо согласуется с результатами эксперимента, выполненного в Лаборатории ядерных проблем Объединённого института ядерных исследований.

Основные результаты диссертации

1. Введен и исследован новый класс специальных функций - радиальные и угловые кулоновские сфероидальные функции (РКСФ и УКСФ), являющиеся обобщением хорошо известных кулоновских функций.

2. Разработан эффективный алгоритм вычисления фаз рассеяния на двух кулоновских центрах.

3. Вычислены неадиабатические матричные элементы, связывающие состояния дискретного и непрерывного спектров задачи двух центров.

4. Развита схема решения задачи рассеяния как задачи на собственные значения. В рамках этой схемы получены функциональные зависимости нового типа для параметров матрицы рассеяния.

5. Вычислено сечение упругого рассеяния $p\mu + p \rightarrow p\mu + p$ при различных энергиях столкновений с учетом сверхтонкой структуры уровней мезоатома $p\mu$.

6. Вычислена скорость резонансного образования мезомолекул $dd\mu$ и устранено прежнее рассогласование между теоретическими и экспериментальными значениями этой скорости.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. L.I.Ponomarev, L.N.Somov, J.Comp.Phys. 20, 183, 1976.
2. L.I.Ponomarev, T.P.Puzynina and L.N.Somov. J.Phys. B: Atom. Molec. Phys., v.10, N 7, 1977.
3. L.I.Ponomarev, I.V.Puzynin, T.P.Puzynina and L.N.Somov. Annals of Physics, 110, 274, 1978.
4. Д.И. Абрамов, А. Казаков, Л.Н. Пономарев, С.Ю. Славянов, Л.Н. Сомов. Препринт ОИЯИ, Р4-11331, Дубна, 1978.
5. Л.И. Пономарев, Л.Н. Сомов, М.П. Файфман. Препринт ОИЯИ Р4-11446, Дубна, 1978.
6. С.И. Виницкий, Л.И. Пономарев, И.В. Пузынин, Т.П. Пузынина, Л.Н. Сомов, М.П. Файфман. ЖЭТФ; 74, 849, 1978.

Литература:

1. S.S.Gerstein, L.I.Ponomarev. Mesomolecular Processes Induced by π and μ Mesons, in "Muon Physics", ed W.Bughes and C.S. Wu, t.III, 143, Academic Press, New York, 1975.
2. В.П. Желепов, П.Ф. Ермолов, В.В. Фильченков. ЖЭТФ, 49, 393, 1965.
3. A.A.Alberigi Quaranta, A.Bertin, G.Matone, F.Palmonari, A.Placce, P.Dalpiatz, G.Terelli, E.Zavattini. Nuovo Cim. 47B, 72, 1967.
4. Я.Б. Зельдович, С.С. Герштейн. УФН, 71, 581, 1960.
5. А.В. Матвеевко, Л.И. Пономарев, М.П. Файфман. ЖЭТФ, 68, 437.
6. S.Cohen, D.L.Judd, R.J.Riddell. Phys. Rev., 119, 384, 1960.

7. Э.А.Весман. ЖЭФ, Письма. 5, 113, 1967.
8. J.Fetkovic, J.Fields, G.Yodh, M.Derrick. Phys. Rev. Lett, 4, 570, (1960).
9. В.П.Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, В.В. Фильченков. ЖЭФ, 50, 1235, 1966.
10. J.Doede. Phys. Rev. 132, 1782, (1963).
11. В.М. Быстрицкий, В.П. Джелепов, К.О. Оганесян, М.Н. Омеляненко, С.Ю. Пороховой, А.И. Руденко, В.В. Фильченков. ЖЭФ, 66, 6 1974.
12. В.М. Быстрицкий, В.П. Джелепов, В.И. Петрухин, А.И. Руденко, Л.Н. Сомов, В.Н. Суворов, В.В. Фильченков, И. Хемниц, Н.Н. Хованский, Б.А. Хоменко, Д. Хорват. Мезон в веществе. В сб.: Труды Межд. симпозиума по проблемам химии и мезомолекулярных процессов в веществе. Д1-10908, Дубна, 1977.
13. Е.Н. Лидков, Г.И. Макаренко, И.В. Пузынин. ЭЧАЯ, 4 (1), 127 (1973).
14. L.I.Ponomarev, I.V.Puzynin, T.P.Puzynina, J.Comp.Phys.13,1,1973.
15. Вычислительные методы в физике атомных и молекулярных столкновений. Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. Мир, М., 1974.
16. С.И. Виноцкий, Л.И. Пономарев. ЯФ, 20, 576, 1974.
17. С.И. Виноцкий, Л.И. Пономарев. Препринт ОИЯИ, Р4-11332, Дубна 1978.
18. И.В. Комаров, Л.И. Пономарев, С.Ю. Славянов. Сфероидальные и кулоновские сфероидальные функции. М., "Наука" 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июня 1978 года.