

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

---

С.346  
П-563

Л.И. Пономарев

2402

МЕЗОАТОМНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
доктор физико-математических наук

С.С. Герштейн

Дубна 1965

Л.И. Пономарев

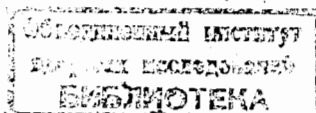
2402

МЕЗОАТОМНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
доктор физико-математических наук

С.С. Герштейн



Дубна 1985

Изучение взаимодействия мезонов низких энергий с веществом давно уже выделилось в самостоятельную и довольно обширную ветвь физики мезонов. Ее значение определяется прежде всего тем, что по необходимости изучение всех элементарных процессов происходит в веществе. При этом очень часто ядерные процессы существенным образом определяются предшествующими им мезоатомными и мезомолекулярными явлениями. Например, хотя захват  $K^-$ -мезонов ядром более вероятен из  $2p$ -состояния  $pK^-$ -мезоатома, специфические мезоатомные процессы (механизм Дзя, Сюю, Сачера /1/) приводят к тому, что захват происходит из  $nS$ -состояний.

Поэтому прежде чем изучать такие фундаментальные вопросы, как, например, проверка  $V-A$  варианта универсального взаимодействия Ферми для  $\mu^-$ -захвата или основные закономерности сильных взаимодействий при низких энергиях, необходимо изучить поведение мезонов в веществе, т.е. изучить все стадии взаимодействия мезонов с веществом, предшествующие ядерному захвату.

Наряду с этим изучение низкоэнергетических взаимодействий  $\pi^-$ ,  $\mu^-$  и  $K^-$ -мезонов с веществом представляет и самостоятельный интерес, т.к. дает новые сведения о строении вещества и приводит к ряду своеобразных процессов, например, катализу ядерных реакций  $\mu^-$ -мезонами и т.д.

Всякий процесс поглощения отрицательных мезонов в веществе включает в себя следующие стадии:

1. Захват мезона из непрерывного спектра в дискретный.
2. Процесс перехода на нижние мезоатомные уровни (или перехват другими системами).
3. Ядерная реакция.

Основной интерес обычно представляет изучение последней стадии, но для того, чтобы однозначно интерпретировать результаты опыта, необходимо изучить и предыдущие стадии. Этой последней задаче посвящено много экспериментальных и теоретических работ.

Диссертация посвящена одной из таких задач: объяснению особенностей поглощения остановившихся  $\pi^-$ -мезонов ядрами водорода, входящими в состав химических соединений типа  $Z-N$ ; в ней также решены некоторые математические вопросы, связанные с рассматриваемой задачей.

Согласно так называемому  $Z$ -закону Ферми и Теллера<sup>/2/</sup> относительная вероятность поглощения медленных  $\pi^-$ -мезонов ядрами различных веществ, находящихся в смеси или в химическом соединении, пропорциональна заряду их ядра  $Z$  и целиком определяется стадией 1) первоначального захвата. При этом, согласно<sup>/2/</sup>, основным механизмом, приводящим к захвату, является торможение мезонов в вырожденном газе электронных оболочек.

Эксперименты последних лет<sup>/3/</sup> показывают, однако, что  $Z$ -закон выполняется плохо. Особенно резко он нарушается в системах типа  $Z-H$ , содержащих водород ( $LiH$ ,  $CH$ ,  $CH_2$  и т.д.). В частности, оказывается сильно подавленной вероятность захвата  $\pi^-$ -мезона ядром водорода, если водород входит в состав химического соединения. Впервые такое подавление (в  $LiH$  и  $C_2H_4$ ) наблюдал Панофский<sup>/4/</sup>. (Процесс был подавлен настолько сильно, что его не удалось даже зарегистрировать, и Панофский дал только верхнюю оценку для его вероятности).

Наиболее полные количественные результаты в этой области получены в последние годы Петрухиным, Прокошкиным и другими<sup>/5/</sup> и частично также группой из Севна<sup>/8/</sup>. Существующие в этой области эксперименты можно разделить на две группы.

Первая группа опытов посвящена измерению величины отношения  $P$  вероятности захвата остановившихся  $\pi^-$ -мезонов ядрами водорода, входящими в состав химических веществ типа  $Z-H$ , к вероятности захвата чистым водородом. Оказалось, что  $P$  очень мало и равно (при  $Z \leq 10$ ):

$$P = \frac{W_{Z-H}}{\frac{1}{2} W_{H_2}} \approx Z^{-3}.$$

При этом важно следующее: отношение  $P$  не зависит от плотности, агрегатного состояния вещества и небольшой добавки примесей других веществ с большими зарядами  $Z$ .

Эти факты являются совершенно неожиданными, т.к. указывают на однозначную и сильную зависимость вероятности ядерной реакции от химического состава вещества.

Вторая группа опытов посвящена изучению процессов поглощения  $\pi^-$ -мезонов в смесях газов типа  $H_2 + Z_0$  и  $Z-H + Z_0$ , а также в жидком водороде при небольших концентрациях  $C_{Z_0}$ <sup>/7/</sup>. Оказалось, что с ростом концентрации примеси  $C_{Z_0}$  относительная вероятность захвата  $\pi^-$ -мезона ядром водорода также падает, но совершенно по другому закону, который определяется только концентрацией  $C_{Z_0}$  и слабо зависит от заряда примеси  $Z_0$ . Кроме того (что особенно интересно), вероятность захвата  $\pi^-$ -мезона обнаруживает свойства насыщения при  $C_{Z_0} > 1$ .

Первая часть диссертации посвящена анализу и объяснению этих экспериментальных данных. В главе I подробно обсуждаются и анализируются эксперименты, связанные с

поглощением медленных  $\pi^-$ -мезонов в водородосодержащих веществах, и различные попытки их объяснения. Показано, что ни одна из существующих схем процессов поглощения  $\pi^-$ -мезонов не может объяснить всю совокупность экспериментальных данных. Показано, что в химических соединениях, типа  $Z-H$ , содержащих водород, захват мезонов происходит на общий уровень всей системы  $Z-H$ , а не на уровне изолированных мезоатомов.

В связи с этим указано, что необходимо пересмотреть прежнюю оценку Вайтмана<sup>/8/</sup> для адиабатического захвата  $\pi^-$ -мезона из непрерывного спектра в дискретный, т.к. она не учитывает влияния второго ядра в молекуле.

С учетом факта захвата мезона на высокий общий уровень системы  $Z-H$ , предложена модель больших мезомолекул, основное содержание которой заключается в следующем: в водородосодержащих веществах относительная вероятность захвата  $\pi^-$ -мезона ядрами различных веществ определяется не стадией 1) первоначального захвата (как у Ферми-Теллера) а стадией 2), т.е. процессом последующего перераспределения. Из-за нарушения центральной симметрии поля снимается запрет по орбитальному моменту для радиационных переходов, и они дают основной вклад в вероятность перехода  $\pi^-$ -мезона с общего уровня системы  $Z-H$  на уровни изолированных мезоатомов  $p\pi^-$  и  $Zp\pi^-$ .

С помощью техники, развитой в главе III, вычисляются вероятности таких радиационных переходов и находится выражение для  $P$ , которое оказывается  $\approx Z^{-4}$ . Тем самым полуколичественно объяснена резкая  $Z$ -зависимость процесса ядерного захвата  $\pi^-$ -мезонов ядром водорода от химического строения веществ. Обсуждается вклад других возможных механизмов перехода мезона на нижние уровни, влияние экранировки электронными оболочками, а также процессы захвата в системах типа  $Z_1 - Z_2$ .

Обсуждаются и анализируются новые работы по изучению  $\mu^-$ -мезорентгеновской серии в химических веществах<sup>/9/</sup>, результаты которых авторы интерпретируют, используя модель больших мезомолекул<sup>/10/</sup>. В частности, оказывается, что с этой точки зрения можно понять интересные особенности этих опытов: аномально большой вклад  $K_{\nu}$ -серии, отсутствие средней части спектра, зависимость выхода  $K_{\nu}$ -серии от заряда вещества  $Z$ , а также от вида химического соединения, в которое оно входит.

В главе II содержится феноменологический анализ второй группы опытов: поглощение  $\pi^-$ -мезонов в газах с примесями других веществ. Показано, что обычный механизм перехвата  $\pi^-$ -мезонов от мезоатомов  $p\pi^-$  к ядрам других веществ (модель Панофского<sup>/4/</sup>) не может объяснить все особенности процесса и должен быть дополнен с учетом процесса Дзя, Сиоу, Сачера<sup>/11/</sup>. В этих предположениях получены формулы, которые удовлетворительно описывают экспериментальные данные, в частности отмеченный выше факт насыщения, а также слабую зависимость перехвата от заряда  $Z_0$  примеси.

Предложенная модель больших мезомолекул автоматически приводит к задаче двух центров и, т.к. по предположению основную роль при этом играют переходы с высоко-возбужденных уровней, то к необходимости квазиклассического ее рассмотрения. В связи с этим в главе III рассматривается квазиклассическое решение задачи 2-х центров, а также некоторые другие вопросы квазиклассики. В § I показано, что обычный способ<sup>/11/</sup> приведения возникающих в задаче уравнений к квазиклассическому виду здесь не применим, т.к. он приводит к расходимостям фазовых интегралов и к неправильной фазе волновых функций. (С этим явлением сталкивались уже давно<sup>/12/</sup>). В § 2 предложен общий способ приведения квантово-механических уравнений к квазиклассическому виду, свободный от перечисленных недостатков<sup>/13/</sup>. Предложенное преобразование может рассматриваться как обобщение аналогичных результатов Лангера<sup>/14/</sup> при обосновании замены  $l(l+1) \rightarrow (l + \frac{1}{2})^2$  в радиальной части уравнения Шредингера для электрона в центрально-симметричном поле.

Используя результаты § 2, в § 3 гл. III методом, идея которого предложена Цвааном<sup>/14/</sup> и Кемблом<sup>/15/</sup>, решена задача квазиклассического квантования задачи двух центров<sup>/17/</sup>. В частности: получены замкнутые условия квантования, справедливые при любом межцентровом расстоянии  $R$ ; в предельных случаях  $R \ll 1$  и  $R \gg 1$  найдены явные выражения для уровней энергии  $E(R)$  мезона и константы разделения<sup>/16/</sup>  $A$  в уравнениях задачи двух центров; показано, что они мало отличаются от точных даже для основного состояния; в случае  $Z_1 = Z_2$  получены очень простые замкнутые формулы квантования и вычислено расщепление симметричного и антисимметричного термов при  $R \gg 1$ .

Из полученных условий квантования на электронно-вычислительной машине получены значения термов при любых значениях  $R$  и сравнены с точными. Показано, что относительная погрешность квазиклассических условий квантования нигде не превосходит 5% даже для основного уровня.

В § 4 выписаны асимптотические выражения для нормированных волновых функций дискретного и непрерывного спектра  $\pi^-$ -мезона в поле двух фиксированных кулоновских центров с зарядами  $Z_1$  и  $Z_2$  в предельных случаях  $R \gg 1$  и  $R \ll 1$ ; как частный случай, получены выражения для асимптотики сфероидальных функций.

Отметим, что результаты, полученные в главе III, имеют самостоятельный интерес даже безотносительно к вопросам, затронутым в диссертации, и могут быть использованы в дальнейшем.

Глава IV посвящена точному численному решению задачи двух центров при произвольных зарядах  $Z_1$  и  $Z_2$ . Рассмотрены различные разложения решений по спецфункциям, их применимость и сходимость. Получены термы для ряда систем  $Z_1 \pi^- Z_2$ . Подробно рассмотрена система  $H\pi^- Li^{+++}$ . Доказано существование устой-

чивого состояния высоковозбужденной молекулы  $He-Li^{+++}$  при больших значениях равновесного расстояния  $R_0$  и вычислена его энергия.

Доказательство факта существования таких высоковозбужденных систем является основным результатом этой главы, так как, во-первых, это является предварительным подтверждением гипотезы гл. I о существовании таких уровней, а во-вторых, этот факт может представить интерес для химиков и при изучении катализа ядерных реакций.

Диссертация включает четыре приложения, которые содержат математические детали и иллюстрацию методов основной части.

В Приложении I даны примеры применения предложенного в гл. III способа приведения уравнений квантовой механики к квазиклассическому виду и этим методом получены асимптотики некоторых спецфункций и ортогональных полиномов.

В Приложении II подробно изложен метод квазиклассического квантования уравнения Шредингера с потенциалом типа "двойной ямы", основанный на работах<sup>/14,15/</sup>.

Приложение III содержит вычисление квазиклассических матричных элементов, которые определяют вероятности радиационных переходов в системе  $ZH\pi^-$ . В качестве проверки и обоснования метода вычислений тем же способом вычислены вероятности перехода в атоме водорода и сравнены с точными. Совпадение оказывается хорошим, с правильными функциональными зависимостями.

Приложение IV посвящено общему решению уравнений, описывающих процессы каскадных переходов мезона вниз с одновременным перехватом другими системами. Выписано общее решение для такой системы через времена жизни и константы перехвата.

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах<sup>/10,13,17/</sup>.

#### Л и т е р а т у р а

1. T.B.Day, G.A.Snow, J.Sucher. Phys. Rev.Lett., 3, 61 (1959); Phys.Rev. 118, 864 (1960).
2. E.Fermi, E.Teller. Phys.Rev., 78, 399 (1947).
3. H.Eckhause, T.A.Fillipas, R.B.Sutton, R.E.Welsh, T.A.Romanowski, Nuovo Cim. 24, 66 (1962).
4. W.K.Panofsky, R.L.Aamodt, J.Handly. Phys.Rev., 81, 556 (1951).
5. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. ЖЭТФ, 42, 1080 (1962).  
V.I.Petrukhin, Yu.D.Prokoshkin, Nuovo Cim., 28, 99 (1963); V.I.Petrukhin, Yu.D.Prokoshkin, Preprint E-1471, Dubna, 1964.
6. M.Charbe, P.Depommier, J.Heintze, V.Sorgel, Phys.Lett., 5, 67 (1963).
7. В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, Е.А. Куширенко, В.И. Москалев, С.С. Герштейн. ЖЭТФ, 42, 439 (1962);

- О.А. Займидорога, М.М. Кулюкип, Р.М. Суляев, А.Н. Филиппов, В.М. Цупко-Ситников, Ю.А. Шербаков. ЖЭТФ, 44, 1852 (1983).
8. A.S.Wightman, Phys.Rev., 77, 521 (1950).
  9. В.Г. Зинов, А.Д. Конин, А.И. Мухин. Препринт ОИЯИ, Р-2039, Дубна, 1985;  
В.Г. Зинов, Л.Д. Конин, А.И. Мухин. Препринт ОИЯИ, Р-2185, Дубна, 1985.
  10. Л.И. Пономарев. Ядерная физика, 2, 223 (1965).
  11. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика, Физматгиз, Москва, 1963.
  12. E.M.Engers, H.A.Kramers, Zsf.Phys., 82, 328 (1933).
  13. Л.И. Пономарев. ДАН, 162, 1023 (1965).
  14. A.Zwaan, Arch.Neerl. des Seiences, 12, 33 (1929).
  15. E.C.Kembl, Phys.Rev., 48, 549 (1935).
  16. С.С. Герштейн, В.Л. Кривченко. ЖЭТФ, 40, 1491 (1961).
  17. С.С. Герштейн, Л.И. Пономарев, Т.П. Пузынина. ЖЭТФ, 48, 632 (1985).

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 октября 1985 г.