

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М - 473

4-81-463

МЕЛЕЖИК

Владимир Степанович

**ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА
В МЕЗОМОЛЕКУЛАХ
ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА**

**Специальность: 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика**

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

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Л. И. ПОНОМАРЕВ

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

И. В. ПУЗЫНИН

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Р. А. ЭРАМЕЯН

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

М. В. ШУКОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Ленинградский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР,
г. Гатчина.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1981 года
на заседании Специализированного совета К-047.01.01 при Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
Московская обл., г. Дубна.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1981 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В. И. ШУРАВЛЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Процессы, происходящие при попадании μ^- -мезонов в смесь изотопов водорода, являются предметом многих экспериментальных и теоретических исследований ^{/1-3/}. Среди разнообразных мезоатомных и мезомолекулярных явлений ^{/2/} в последние годы особое внимание уделяется изучению резонансного образования мезомолекул $d\mu$ и $dt\mu$ ^{/4-6/}.

Прецизионные измерения температурной зависимости скорости их образования предоставляют уникальные возможности для проверки методов решения квантовомеханической задачи трех тел, которая возникает при теоретическом описании различных мезомолекулярных процессов ^{/2/}. В свою очередь для надежной интерпретации экспериментальных данных необходимо развить методы, позволяющие решать эту задачу с высокой точностью. Однако достигнутая к настоящему времени точность вычисления уровней энергии и волновых функций μ^- -мезомолекул недостаточна ^{/2,4/}. Кроме того, не были учтены сильное взаимодействие ядер на малых расстояниях и поляризация электрон-позитронного вакуума.

Исследования резонансного образования мезомолекул возродили интерес к проблеме мюонного катализа ядерных реакций в смеси дейтерия и трития (D_2+T_2) (обзор и современное состояние проблемы см в ^{/7,1,8/}). В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ недавно измерена скорость $\lambda_{dt\mu} \geq 10^8 \text{ с}^{-1}$ образования мезомолекул $dt\mu$ ^{/6/}, которая оказалась на два порядка выше скорости образования других мезомолекул и скорости $\lambda_0 = 0,46 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ распада μ^- -мезона и совпала с предсказанной в работе ^{/4/}. В настоящее время проведены первые теоретические ^{/4,8/} и экспериментальные ^{/6/} исследования μ^- -катализа, а также рассмотрены возможности его практического использования ^{/9/}.

Для детального описания кинетики процесса μ^- -катализа в смеси D_2+T_2 ^{/10/} необходимо знать скорости λ_{jv}^{ju} ядерных реакций синтеза из различных состояний (j, v) вращательного и колебательного движения мезомолекул $d\mu$, $dt\mu$ и $tt\mu$, причем особый интерес представляет ядерная реакция $dt\mu \xrightarrow{\lambda_{\mu}^{\mu}} {}^4\text{He} + \mu^-$ ^{/8/}. До недавнего времени не существовало последовательного метода вычисления скоростей λ_{jv}^{ju} , а ранние оценки ^{/11,7,12,13/} нельзя признать удовлетворительными для планируемых экспериментов.

Основная цель работ: разработать метод расчета ширин и сдвигов уровней мезомолекул, обусловленных ядерным взаимодействием, и вычислить скорости ядерных реакций из различных состояний мезомолекул, а также сдвиги уровней энергии этих состояний.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна и практическая ценность. В данной работе впервые разработан универсальный метод расчета ширины и сдвигов уровней μ -мезомолекул, обусловленных сильным взаимодействием. Для этого, на основе непрерывного аналога метода Ньютона /14/, построены алгоритмы численного решения частичной задачи Штурма-Лиувилля для систем ~ 40 дифференциальных и $\sim 250-300$ интегродифференциальных уравнений специального вида, которые позволяют в адиабатическом представлении задачи трех тел /15/ вычислять с высокой точностью уровни энергии и волновые функции мезомолекул с учетом ядерного взаимодействия.

Численно исследована охотимость адиабатического разложения. Вычислены уровни энергии всех состояний μ -мезомолекул с абсолютной точностью $\sim 0,1$ эВ и их волновые функции. Точность вычисления энергии слабосвязанных состояний ($J=V=I$) $d\mu$ и dtu несколько выше и составляет $\sim 0,05$ эВ. Разработанные алгоритмы могут быть использованы для повышения точности вычислений уровней энергии мезомолекул, а также в различных задачах атомной и молекулярной физики.

Впервые построена асимптотика волновой функции задачи трех тел с кулоновским взаимодействием $\Psi(\vec{r}, \vec{R})$ в пределе $R \rightarrow 0$ ($r > R$). Показано, что все свойства предельного перехода $R \rightarrow 0$ ($r > R$) естественно содержатся в адиабатическом подходе /15/, если в разложении волновой функции задачи трех тел использовать достаточное число базисных функций. Полученная асимптотика важна для вычисления скоростей ядерных реакций синтеза в мезомолекулах и при постановке граничных условий задачи рассеяния для реакций типа $d\mu + p \rightarrow d\mu + p$ /2/.

С гамильтонианами, построенными при рассмотрении задач связанных каналов /16/ $dt; n^4\text{He}$ и $dt; n^4\text{He}, ^5\text{He}^*$, получено хорошее описание реакций синтеза ядер $dt \rightarrow n^4\text{He}$ и упругого рассеяния ($dt \rightarrow dt$) в низкоэнергетической области $E < 200$ кэВ /17/.

Исследовано влияние ядерного резонанса $^3_2 + ^5\text{He}^*$ /18/ на спектр мезомолекулы dtu . Получен количественный критерий возможности перестройки /19/ спектра системы, гамильтониан которой содержит два взаимодействия: дальнедействующее (кулоновское) и короткодействующее (ядерное). Полученный критерий позволяет заключить на основе экспериментальных данных по реакции $dt \rightarrow n^4\text{He}$, что в системе dtu перестройка спектра отсутствует.

Вычислены ядерные ширины уровней энергии мезомолекул dtu $\Gamma^{J^P}(\lambda^{J^P})$, причем ширины возбужденных вращательных состояний ($J \geq 1$) вычислены впервые. Найдена скорость ядерной реакции "на лету" $t\mu + d \rightarrow n^4\text{He} + \mu^-$ /11/. Полученные результаты важны для детального описания кинетики процесса μ -катализа в смеси $D_2 + T_2$ /10/.

Впервые найдены сдвиги уровней мезомолекул, обусловленные поля-

ризацией электрон-позитронного вакуума /20/ и сильным взаимодействием.

Следующие результаты выдвигаются для защиты:

1. Вычислительные схемы нахождения волновых функций и уровней энергии μ -мезомолекул с учетом сильного взаимодействия.
2. Алгоритмы численного решения частичной задачи Штурма-Лиувилля для систем ~ 40 дифференциальных уравнений и систем $\sim 250-300$ интегродифференциальных уравнений специального вида.
3. Вычисление уровней энергии μ -мезомолекул с абсолютной точностью $\sim 0,1$ эВ и их волновых функций.
4. Асимптотика волновой функции $\Psi(\vec{r}, \vec{R})$ задачи трех тел с кулоновским взаимодействием в пределе $R \rightarrow 0$ ($r > R$).
5. Совместное описание реакций синтеза $dt \rightarrow n^4\text{He}$ и упругого рассеяния $dt \rightarrow dt$ в рамках потенциальной задачи связанных каналов в области энергий $E < 200$ кэВ вблизи резонанса $E_r = 64$ кэВ ($^3_2 + ^5\text{He}^*$).
6. Метод и результаты расчета ширины и сдвигов уровней мезомолекул, обусловленных сильным взаимодействием.
7. Вычисление скорости ядерной реакции "на лету":
 $t\mu + d \rightarrow ^4\text{He} + \mu^-$.
8. Вычисление сдвигов мезомолекулярных уровней за счет поляризации электрон-позитронного вакуума.

Апробация работы. Результаты данной диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики, Лаборатории вычислительной техники и автоматизации и Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, Института теоретической и экспериментальной физики, Института атомной энергии им. И.В.Курчатова, Физического института АН СССР им. П.Н.Лебедева, Ленинградского государственного университета, а также на Международной конференции по атомной физике (17-22 августа 1978 г., г.Рига) и на сессиях Отделения ядерной физики АН СССР.

Публикации. Результаты данной диссертации опубликованы в 10 работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений, она содержит 148 страниц машинописного текста, 21 рисунок и библиографический список из 96 названий.

Содержание работ

Во введении (гл. I) дан краткий обзор ядерных реакций синтеза в μ -мезомолекулах изотопов водорода и отмечены причины, по которым существующие оценки скоростей ядерных реакций нельзя признать удовлетворительными. Обсуждается постановка задачи на собственные значения для гамильтониана системы трех тел с кулоновским взаимодействием в адиабатическом представлении с учетом сильного взаимодействия ядер на малых расстояниях.

Рассмотрена общая структура диссертации и кратко перечислены основные результаты.

В главе 2 разработаны новые итерационные схемы решения частичной задачи Штурма-Лиувилля для системы обыкновенных интегродифференциальных уравнений, которая возникает при вычислении уровней энергии и волновых функций μ -мезомолекул в адиабатическом представлении /15/:

$$\left\{ \frac{d^2}{dr^2} + 2M\epsilon - U_{ij}(R) \right\} \chi_i(R) = \sum_{j \neq i} U_{ij}(R) \chi_j(R), \quad (I)$$

где $\sum = \sum_m \sum_{n_1, n_2} \left\{ \sum_{n_1} + Sdk \right\}$, $[n_1 n_2 m]$ - квантовые числа задачи двух центров /21/; M - приведенная масса системы; $U_{ij}(R)$ - эффективные потенциалы задачи трех тел /22/; ϵ - энергия связи; $\chi_j(R)$ - волновые функции относительного движения ядер в мезомолекуле.

В § 2.1 рассмотрена аппроксимация бесконечной системы интегродифференциальных уравнений (I) конечной системой дифференциальных уравнений и сформулирована соответствующая ей задача Штурма-Лиувилля. В § 2.2 построен вычислительный алгоритм решения разностным методом частичной задачи Штурма-Лиувилля для системы ~ 40 дифференциальных уравнений с матрицей потенциалов, заданной численно на отрезке $[0, R_m]$ с произвольным шагом. Итерационная схема построена на основе непрерывного аналога метода Ньютона /14/, рассмотрены также некоторые его модификации применительно к рассматриваемым задачам. В § 2.3 предложен итерационный метод решения системы $\sim 250-300$ интегродифференциальных уравнений специального вида, возникающей при решении задачи на собственные значения для гамильтониана мезомолекулы. В § 2.4 с помощью этих схем вычислены все уровни энергий и волновые функции мезомолекул изотопов водорода. Проведено численное исследование сходимости адиабатического разложения.

В главе 3 построена асимптотика волновой функции мезомолекулы $\Psi(\vec{r}, \vec{R})$ в пределе малых межъядерных расстояний $R \rightarrow 0$ ($r > R$). В § 3.1 найдена асимптотика системы (I) в пределе $R \rightarrow 0$ с помощью преобразования Чанга-Фано /23/, применяемого в теории рассеяния электронов на молекулах. В § 3.2 строится асимптотика волновой

функции задачи трех тел $\Psi(\vec{r}, \vec{R})$ при $R \rightarrow 0$ ($r > R$). Установлено, что все свойства предельного перехода $R \rightarrow 0$ ($r > R$) естественно следуют из асимптотического решения системы (I) без дополнительных искусственных преобразований, если в адиабатическом разложении оставить достаточное число членов. В качестве примера (§ 3.3) найденная асимптотика сравнивается с решениями $R^{-1} \chi_i(R)$, полученными при прямом вычислении энергии состояний мезомолекул с помощью алгоритмов, рассмотренных в § 2.2 и § 2.3. В § 3.3 проведено вычисление волновых функций и энергии состояния ($J = I, U = 0$) мезомолекулы dtu с учетом сильного взаимодействия между ядрами на малых расстояниях.

В главе 4 предложен метод расчета ширин и сдвигов уровней мезомолекул, обусловленных сильным взаимодействием. В § 4.1 построен обобщенный оптический потенциал, соответствующий задаче связанных каналов dt и $n^4\text{He}$. Получено хорошее совместное описание экспериментальных данных по реакциям $dt \rightarrow n^4\text{He}$ и $dt \rightarrow dt + \text{He}^+$ в низкоэнергетической области $E < 200$ кэВ вблизи резонанса $E_R = 64$ кэВ ($\frac{3}{2}^+ \text{He}^*$) /18/. В § 4.2 рассмотрен метод расчета ширин и сдвигов уровней мезомолекул, обусловленных сильным взаимодействием. Ширин и сдвиги находятся при решении задачи на собственные значения для гамильтониана, содержащего наряду с кулоновским взаимодействием оптический потенциал, построенный в § 4.1. Для вычисления волновых функций и уровней мезомолекул используются алгоритмы, рассмотренные в главах 2 и 3. В § 4.3 вычислены скорости ядерных реакций синтеза из различных состояний dtu . В § 4.4 исследованы условия, при которых возможна перестройка /19/ кулоновского спектра мезомолекулы под влиянием короткодействующего ядерного потенциала без учета поглощения в системе.

В § 4.5 рассмотрен резонансный механизм реакции $dt \rightarrow n^4\text{He}$ в рамках задачи трех связанных каналов dt , $n^4\text{He}$ и $^5\text{He}^*$. Ядерные ширин и сдвиги уровней мезомолекулы dtu , обусловленные резонансным взаимодействием d и t в s -волне /18/, выражены через сечение реакции $dt \rightarrow n^4\text{He}$. Показано, что на основании экспериментальных данных надежно исключается возможность перестройки спектра системы dtu , т.к. благодаря малой вероятности нахождения d и t в области действия ядерных сил в мезомолекуле и большой неупругой ширине резонанса $^5\text{He}^*$ ($\frac{3}{2}^+$) его влияние на спектр мезомолекулярных состояний является пренебрежимо малым. Найденные значения ядерных ширин совпали с точностью $\sim 10\%-15\%$ с результатами расчета § 4.3. В § 4.6 вычислена скорость ядерной реакции "на лету" $tu + d \rightarrow n^4\text{He}$, которая при $E < 10$ кэВ оказалась довольно малой $\lambda < 10^6$ с $^{-1}$. Скорость ядерной реакции синтеза в мезомолекуле dtu из возбужденного

вращательного состояния $\gamma = I$ равна $\lambda_{\gamma}^I \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$, что на два порядка превышает скорость распада μ -мезона $\lambda_0 = 0,46 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

В §4.7 вычислены скорости ядерных реакций λ_{γ}^{μ} в мезомолекулах $d\mu$ и $tt\mu$. В § 4.8 найдены сдвиги уровней энергии мезомолекул за счет сильного взаимодействия между ядрами и поляризации электрон-позитронного вакуума, которые сравниваются со сдвигами, обусловленными релятивистскими эффектами и электромагнитной структурой ядер [24].

В приложении I приведены некоторые детали исследования сходимости итерационной схемы, рассмотренной в § 2.3. В приложении II рассмотрено решение задачи рассеяния $dt \rightarrow dt$ для локального эрмитового потенциала dt взаимодействия. Некоторые технические детали вычисления сдвигов уровней энергии мезомолекул, обусловленных поляризацией вакуума, приведены в приложении III.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. В адиабатическом представлении задачи трех тел с помощью вычислительных схем, построенных на основе непрерывного аналога метода Ньютона, найдены волновые функции и энергии состояний μ -мезомолекул изотопов водорода с учетом ядерного взаимодействия.

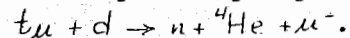
2. Реализованы алгоритмы численного решения частичной задачи Штурма-Лиувилля для систем ~ 40 дифференциальных уравнений и систем $\sim 250-300$ интегродифференциальных уравнений специального вида.

3. Построена асимптотика волновой функции задачи трех тел с кулоновским взаимодействием $\Psi(\vec{r}, \vec{R})$ в пределе $R \rightarrow 0$ ($r > R$).

4. В двухканальном ($dt, n^4\text{He}$) и трехканальном ($dt, n^4\text{He}$ и ${}^5\text{He}^*$) подходах получено совместное описание реакций $dt \rightarrow n^4\text{He}$ и $dt \rightarrow dt$ в области $E < 200$ кэВ вблизи резонанса $E_R = 64$ кэВ (${}^3_2^+ {}^5\text{He}^*$).

5. Разработан метод расчета ширины и сдвигов уровней мезомолекул, обусловленных сильным взаимодействием, и с его помощью вычислены скорости ядерных реакций синтеза из различных состояний мезомолекул и сдвиги уровней энергии этих состояний.

6. Вычислена скорость ядерной реакции "на лету":



7. Исследован вопрос об условиях перестройки кулоновского спектра мезомолекул под влиянием ядерного взаимодействия.

8. Найдены сдвиги уровней энергии μ -мезомолекул, обусловленные поляризацией электрон-позитронного вакуума.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

I. Виницкий С.И., Мележик В.С., Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Со-

мов Л.Н. Программа численного решения частичной задачи Штурма-Лиувилля для системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка. Сообщение ОИЯИ, P5-12787, Дубна, 1979.

2. Виницкий С.И., Мележик В.С., Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Сомов Л.Н. Численное исследование некоторых модификаций непрерывного аналога метода Ньютона при решении частичной задачи Штурма-Лиувилля. Сообщение ОИЯИ, P5-12788, Дубна, 1979.
3. Мележик В.С., Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Сомов Л.Н. Решение частичной задачи Штурма-Лиувилля для системы интегродифференциальных уравнений специального вида. Сообщение ОИЯИ, P5-12789, Дубна, 1979.
4. Мележик В.С.; Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Сомов Л.Н. Решение частичной задачи Штурма-Лиувилля для системы интегродифференциальных уравнений, возникающей при вычислении уровней энергии μ -мезомолекул в адиабатическом представлении. Сообщение ОИЯИ, P5-12790, Дубна, 1979.
5. Виницкий С.И., Мележик В.С., Пономарев Л.И., Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Сомов Л.Н., Трускова Н.Ф. Вычисление уровней энергии μ -мезомолекул изотопов водорода в адиабатическом представлении задачи трех тел. ЖЭТФ, 1980, 79, 698.
6. Мележик В.С., Пономарев Л.И., Виницкий С.И. Адиабатическое представление в задаче трех тел с кулоновским взаимодействием. IV. Асимптотика решения при $R \rightarrow 0$. Препринт ОИЯИ, P4-80-775, Дубна, 1980.
7. Bogdanova L.N., Markushin V.E., Melezhik V.S., Ponomarev L.I. Nuclear synthesis reaction in the muonic molecule $dt\mu$. Prepr. JINR, E4-80-819, Dubna, 1980.
8. Богданова Л.Н., Маркушин В.Е., Мележик В.С. Ядерные ширины и сдвиги уровней энергии мезомолекулы $dt\mu$. ЖЭТФ, 1980, т. 81, 701.
9. Melezhik V.S., Ponomarev L.I. Vacuum-polarization in μ -mesic molecules of hydrogen isotopes. Phys. Lett., 1978, 77B, p.217.
10. Иксару Л.Гр. Мележик В.С. Вычисление уровней энергии μ -мезомолекул численным методом возмущений. Сообщение ОИЯИ, P4-80-749, Дубна, 1980.

Литература

- I. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. Mesomolecular processes induced by μ^- and π^- mesons. In: Muon physics. Ed. Hughes V.W. and Wu C.S. Academic Press, New York, vol. III, 1975, p.141.

2. Ponomarev L.I. Mesic atomic and mesic molecular processes in the hydrogen isotope mixtures. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Atomic Physics, August 17-22, 1978. Riga, USSR. "Zinatne", Riga, Plenum Press, New York, 1979, p.181.
3. Zavattini E. Muon capture. In: Muon Physics. Ed. Hughes V.W. and Wu S.C. Academic Press, New York, v.II, 1975, p.219.
4. Виницкий С.И., Пономарев Л.И., Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Сомов Л.Н., Файфман М.П. Резонансное образование μ -мезомолекул изотопов водорода. ЖЭТФ, 1978, т. 64, с. 849.
5. Выстрицкий В.М. и др. Резонансная зависимость скорости образования мезомолекул $dd\mu$ в газообразном дейтерии. ЖЭТФ, 1979, т. 76, с. 460.
6. Выстрицкий В.М. и др. Экспериментальное обнаружение и исследование мюонного катализа реакции синтеза дейтерия и трития. ЖЭТФ, 1981, т. 80, с. 1700.
7. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. Ядерные реакции в холодном водороде. УФН, 1960, т. 71, с. 581.
8. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. μ -Meson catalysis of nuclear fusion in mixture of deuterium and tritium. Phys.Lett., 1977, v.72B, p.80.
9. Petrov Yu.V. Muon catalysis for energy production by nuclear fusion. Nature, 1980, v.285, p.466.
10. Герштейн С.С., Петров Ю.В., Пономарев Л.И., Сомов Л.Н., Файфман М.П. Кинетика процессов мюонного катализа в смеси дейтерия и трития. ЖЭТФ, 1980, т. 78, с. 2099.
11. Зельдович Я.Б. Реакции, вызываемые μ -мезонами в водороде. ДАН, 1954, т. 95, с. 493.
12. Jackson J.D. Catalysis of nuclear reactions between hydrogen isotopes by μ^- mesons. Phys.Rev., 1957, v.106, p.330.
13. Весман Э.А. О скорости реакции синтеза в мезомолекуле $dd\mu$ с моментом I. Изв. АН Эстонской ССР, физика, математика, 1968, т. 17, № 1, с. 65.
14. Жидков Е.П., Макаренко Г.И., Пузынин И.В. Непрерывный аналог метода Ньютона в нелинейных задачах физики. ЭЧАЯ, 1973, т. 4, с. 125.
15. Ponomarev L.I., Vinitzky S.I. Adiabatic representation in the three-body problem with the Coulomb interaction. I. Colce of the effective Hamiltonian. J.Phys., 1979, v.112, p.567.
16. Ньютон Р. Теория рассеяния волн и частиц. Москва, "Мир", 1969, с. 456.
17. Liskien H., Paulsen A. Neutron production cross sections and energies for the reactions $T(p,n)^3He$, $D(d,n)^3He$ and $T(d,n)^4He$. Nucl.Data Tables, 1979, v.11, p.569.
18. Alzenberg-Selov F. Energy levels of light nuclei A = 5-10. Nucl.Phys., 1979, A320, p.1.
19. Кудрявцев А.Е., Маркушин В.Е., Шапиро И.С. Ядерный сдвиг уровней (pp)-атома. ЖЭТФ, 1978, т. 74, с. 432.
20. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Релятивистская квантовая теория, ч. II. "Наука", М., 1971.
21. Комаров И.В., Пономарев Л.И., Славянов С.Ю. Сферические и кулоновские сферические функции. "Наука", М., 1976.
22. Ponomarev L.I., Puzynina T.P., Truskova N.F. Effective potentials of the three-body problem in the adiabatic representation. J.Phys. B., 1978, v.11, p.3861.
23. Chang E.S., Fano U. Theory of electron-molecules collisions by frame transformations. Phys.Rev., 1972, A6, p.173.
24. Бакалов Д.Д. Релятивистские поправки и поправки на электромагнитную структуру ядер к уровням энергии μ -мезомолекул изотопов водорода. ЖЭТФ, 1980, т. 79, с. 1149.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 июля 1981 года.