

В-486



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

4-91-364

ВИНИЦКИЙ
Сергей Ильич

УДК 530.145, 539.184,
539.189, 539.19,
539.17.013

АДИАБАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ
ДЛЯ ТРЕХЧАСТИЧНЫХ
АТОМНЫХ И МЕЗОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1991

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
член-корреспондент АН СССР

С.С.Герштейн

доктор физико-математических наук
профессор

Ю.Н.Демков

доктор физико-математических наук
профессор

Я.А.Сморodinский

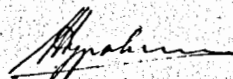
Ведущая организация - Институт теоретической и экспериментальной физики, г.Москва

Автореферат разослан " " _____ 1991 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1991 г. на заседании Специализированного совета Д047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук


В.И.Журавлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение элементарных процессов, происходящих в смеси дейтерия и трития в присутствии мюонов, является одной из фундаментальных проблем современной физики. Важную роль в этих процессах играют резонансные или квазистационарные состояния трехчастичных атомных и мезомолекулярных систем. Поскольку наличие таких резонансных состояний приводит к резкому увеличению сечений реакций, то без их учета невозможно получение надежных теоретических результатов, пригодных для практического использования. Для расчета спектров трехчастичных атомных и мезомолекулярных систем, а также сечений процессов рассеяния в системе трех частиц, например, таких как рассеяние электрона на атоме водорода, захват мюона атомом гелия, перезарядка мезоатомов и т.д. применяют различные варианты адиабатического приближения. Как известно, гиперсферическое адиабатическое приближение (без учета изотопических эффектов) дает неплохие оценки положений уровней энергии дваждывозбужденных состояний трехчастичных атомных систем, а стандартное адиабатическое приближение, в принципе, позволяет получить оценки энергий связи мезомолекул или сечений рассеяния мезоатомов на ядрах изотопов водорода. Однако ситуация качественно меняется для слабосвязанных состояний или резонансного рассеяния, поскольку задача учета изотопических эффектов и построения асимптотических состояний рассеяния в системе трех частиц (с конечными массами) требует для своего решения применения существенно многоуровневого адиабатического подхода, либо эффективных приближений, в которых учтено одновременное взаимодействие большого числа состояний. Так в стандартном адиабатическом приближении слабосвязанное состояние мезомолекулы $d\mu$ с энергией ~ 1 эВ выглядит как квазистационарное. Оно превращается в связанное лишь в многоуровневом адиабатическом подходе. Именно таким способом оно и было обнаружено в 1977 году. Это обстоятельство позволило в рамках резонансной модели получить теоретическую оценку скорости образования мезомолекул $\lambda_{d\mu} \sim 10^8 \text{ сек}^{-1}$, которая подтвердилась в эксперименте.

Не менее интересная ситуация имеет место в оценках параметров Γ_{p^0} резонанса формы в $e + H$ ($n=2$) рассеянии или сечения упругого рассеяния мезоатомов водорода на протонах. Так оценки параметров резонанса формы в гиперсферическом адиабатическом приближении в два раза превышают вариационные, а теоретическая оценка сечения упругого

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

рассеяния мезоатомов водорода на протонах в стандартном адиабатическом приближении на два порядка отличается от экспериментальной. Желания экспериментаторов иметь, а теоретиков получать более надежную информацию о спектрах трехчастичных атомных и мезомолекулярных систем, о сечениях процессов рассеяния электронов на атомах водорода или мезоатомов на ядрах изотопов водорода и т.п. с необходимостью определили цель настоящей диссертации.

Последовательная формулировка задач на связанные состояния и рассеяния в адиабатическом представлении, а также разработка эффективных приближений и методов решения подобного класса задач.

Общие цели работы определили конкретные задачи:

- исследование свойств и построение классификации состояний адиабатических базисов различных типов для трехчастичных атомных и мезомолекулярных систем;
- построение в адиабатическом представлении асимптотических состояний задачи рассеяния, согласованных с физическими граничными условиями с учетом специфики кулоновского вырождения асимптотического гамильтониана;
- расчет полного набора связанных состояний мезомолекул изотопов водорода, а также дваждывозбужденных состояний гелиеподобных атомов.

Общая методика исследования. Для достижения цели работы наряду с традиционными методами теории рассеяния в системе нескольких частиц использовались формализм динамической группы симметрии атома водорода $O(4,2)$, техника операторной теории возмущений, а также основные понятия теории расслоенных пространств.

Научная новизна. Предложена формулировка задачи на связанные состояния и рассеяния ниже трехчастичного порога на основе адиабатического представления уравнений Фаддеева и Шредингера при различных параметризациях конфигурационного пространства. Проведен сравнительный анализ адиабатических базисов различных типов для трехчастичных атомных и мезомолекулярных систем. Для учета изотопических эффектов в гелиеподобных атомах введен адиабатический базис в барицентрических координатах. В адиабатическом подходе построены асимптотические состояния задачи рассеяния, согласованные с физическими граничными условиями с учетом кулоновского вырождения асимптотического гамильтониана. Дана адиабатическая классификация состояний и выявлена динамическая симметрия в трехчастичной кулоновской задаче с неразделяющимися переменными. Показано, что адиабатический базис задачи с неразделяющимися переменными топологически соответствует стандартному

адиабатическому базису с разделяющимися переменными и характеризуется сохраняющимся (при изменении масс частиц) числом точек квазипересечения. Предложены эффективные приближения, позволяющие работать в неполном адиабатическом базисе.

Дана новая вычислительная схема прямого решения краевых задач для уравнений Фаддеева, согласованная с адиабатическим пределом. Разработаны новые ньютоновские итерационные схемы с плавным включением возмущения для решения краевых задач в адиабатическом представлении уравнения Шредингера. Реализованы вычислительные схемы для многоканальных адиабатических расчетов спектров гелиеподобных атомов. Проведены многоканальные адиабатические расчеты основных и возбужденных состояний двухэлектронных атомных систем. Выполнены расчеты полного набора $3Z$ -связанных состояний мезомолекул изотопов водорода. Дано обобщение приближения внезапных возмущений на основе уравнений Фаддеева с резонансным каналом.

Практическая ценность. Представленная формулировка задач на связанные состояния и рассеяния в системе трех кулоновских частиц ниже трехчастичного порога дает единую концепцию применения адиабатического подхода к широкому кругу практически важных задач атомной и мезоатомной физики. Предложенные эффективные приближения, позволяющие работать в локально неполном адиабатическом базисе, дают возможность практически оценить погрешность вычислений. Новые вычислительные процедуры позволяют экономить ресурсы ЭВМ. Большинство полученных результатов на протяжении ряда лет, начиная с момента обнаружения слабосвязанного состояния мезомолекулы dtu , используются различными группами ОИЯИ, ЛИЯФ, ЛГУ, МГУ, ИФВЭ, ИТЭФ, ИАЭ в практических расчетах μCF .

Апробация работы. Результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах ЛГУ и ЛВТА ОИЯИ, кафедры квантовой механики и кафедры вычислительной физики ЛГУ, теоретического отдела ИТЭФ, ОМФ ИАЭ, на международных конференциях *Few-Body System*, ICPEAC, на международных симпозиумах μCF : Гатчина, 26-29 мая 1987 г., Флорида, 1-6 мая 1988 года, международном семинаре "Микроскопические методы в теории систем нескольких частиц", Калинин, 15-21 августа 1988 г.

Публикации. Основные результаты опубликованы в работах /1-40/.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, и списка литературы. Общий объем диссертации - 321 машинописных страниц. В диссертации содержится 56 рисунков и 40 таблиц. Список литературы включает 231 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждаются вопросы, связанные со спецификой применения адиабатического представления в трехчастичных атомных и мезо-молекулярных задачах, кратко изложено основное содержание и результаты диссертации.

В первой главе рассмотрено адиабатическое представление в фиксированной системе координат (SF), построенное на основе модифицированных уравнений Фаддеева. Дана адиабатическая формулировка многоканальной задачи рассеяния, позволяющая описывать процессы возбуждения $(ac)_A + b \rightarrow (ac)_A + b$ и перезарядки $(ac)_A + b \rightarrow a + (bc)_B$ мезоатомов.

В § 1.1 рассмотрена постановка задачи рассеяния $(ac)_A + b \rightarrow a + (bc)_B$ в координатном пространстве $X = \vec{x}_a \oplus \vec{y}_b \in M \sim \mathbb{R}^6 \setminus \{0\}$ на основе модифицированных уравнений Фаддеева. Приведены ведущие асимптотики трехчастичной волновой функции, составленные в виде суммы фаддеевских компонент. Даны выражения для амплитуды перехода f_{BA} через матричные элементы оператора рассеяния $\hat{S} = S \hat{I}_{\gamma_\alpha}$ (\hat{I}_{γ_α} — оператор инверсии координаты столкновения γ_α , $\alpha = a, b$) в дипольном представлении $\hat{\Lambda}_\alpha$. В § 1.2 рассмотрена параметризация задачи трех тел в гиперсферических координатах $\vec{X} = \{X, \hat{X}\} \in \mathbb{R}_+^1 \times \hat{M} \sim \mathbb{R}_+^1 \times S^5(\hat{X})$. Дано определение оператора полной инверсии \hat{I} , позволяющее ввести представление собственных фазовых сдвигов для парциальной амплитуды. Приведено выражение для амплитуды упругого рассеяния на (гипер)сферически симметричном потенциале.

В § 1.3 рассмотрен переход к адиабатическому пределу в модифицированных уравнениях Фаддеева, который достигается "замораживанием" медленной радиальной переменной $X = |\vec{X}|$ в парциальных компонентах. Определен адиабатический базис $\{\Phi_j(X, \cdot)\} \in \mathcal{F}_X \sim L^2(\hat{M}, d\hat{M})$, составленный в виде суммы атомных орбиталей (АО) — решений модифицированных уравнений Фаддеева на "сфере" $\hat{X} \in \hat{M} \sim S^5(\cdot)$ при фиксированных значениях медленной переменной $X \in B = \mathbb{R}_+^1$. Дана классификация спектра быстрого гамильтониана в соответствии с возможными каналами задачи рассеяния. Сконструированное таким образом гильбертово расслоение $\mathcal{H}(\mathcal{F}_X, \pi, B)$ с типовым слоем \mathcal{F}_X , проекцией π на базу B и кососимметричной формой связности $A(x): A_{ij}(X) = \langle i | \partial_x | j \rangle = -A_{ji}(X)$ задает адиабатическое представление для трехчастичной волновой функции. Матричные элементы $A(x)$ в асимптотической области обеспечивают согласование решений системы радиальных уравнений, содержащей удлиненную производную $(1 \oplus \partial_x + A(X))$; с физическими граничными условиями задачи рассеяния; а в области

реакции ответственны за переходы между каналами. В § 1.4 определены регулярные и физические решения, а также решения и функции Йоста и представление собственных фазовых сдвигов для унитарного оператора рассеяния $\hat{S} = S \hat{I}$, согласованное с дальнедействующим дипольным потенциалом $X^{-2} \Lambda_\alpha$. Получены выражения для дипольной амплитуды перехода f_{BA} в адиабатическом базисе ниже трехчастичного порога.

Вторая глава посвящена вопросам построения адиабатического представления во вращающейся системе координат (RF) на основе уравнений Фаддеева и Шредингера. Основное внимание уделено анализу асимптотик, и классификации остояний адиабатического базиса с неразделяющимися переменными. В § 2.1А введены необходимые обозначения RF, определены дискретные симметрии и биосферический базис D-функций, приведены выражения для сечений перехода ξ_{BA} . В § 2.1Б дана параметризация нецентральных амплитуд перехода ξ_{BA} с помощью собственных векторов дипольного оператора $\hat{\Lambda}_\alpha$ в (RF). Получено простое и удобное выражение для матричных элементов дипольного оператора в RF, образующих секулярное уравнение, и дана классификация базиса в пределе разъединенных атомов. В § 2.2А выписаны уравнения для адиабатических компонент Фаддеева, которые образуют адиабатический базис атомных орбиталей (АО) в RF. Для соответствующей краевой задачи кратко обсуждаются перспективные методы ее решения типа чебышевской процедуры построения системы ортогональных полиномов дискретной переменной. Дана классификация базиса в окрестности точки тройного соударения. В § 2.2Б приведены основные уравнения для адиабатического базиса молекулярных орбиталей (МО) в RF с осью, направленной по якобиевскому вектору пары (a, b) трехчастичной системы abc. Такой базис в пределе бесконечно тяжелых масс ядер a и b соответствует стандартному адиабатическому базису молекулярных орбиталей (SMO) с вращательной связью. § 2.2В. Дана классификация состояний и примеры корреляционных диаграмм адиабатического базиса с неразделяющимися переменными. Установлено соответствие этой классификации при нулевом полном орбитальном моменте с корреляционной диаграммой SMO базиса, а при ненулевом полном орбитальном моменте с корреляционной диаграммой SMO базиса с вращательной связью. Показано, что число точек квазипересечений сохраняется с изменением масс частиц. Это обстоятельство выявляет динамическую симметрию кулоновской задачи с неразделяющимися переменными, причем ее адиабатический базис топологически соответствует стандартному адиабатическому базису. § 2.3А. Определено эффективное приближение на открытых каналах задачи рассеяния в локально полном адиабатическом представлении. С его помощью проведен анализ асимптотик решений в АО базисе. В § 2.3Б

получена асимптотика радиальных решений $O(X^{-1})$ и трехчастичных волновых функций $O(X^{-2})$ в АО базисе. В § 2.3В выполнен анализ асимптотических состояний МО базиса с помощью операторной теории возмущений с вырождением в слое n главного квантового числа разьединенного атома. Показано, что молекулярная ось в асимптотических областях приобретает направление соответствующего якобиевского вектора сталкивающихся фрагментов, что и устанавливает соответствие МО и АО базисов.

В § 2.4А рассмотрены основные уравнения и асимптотическое поведение радиальных решений трехчастичной волновой функции в МО базисе без вращательной связи. В § 2.4Б построены асимптотические состояния рассеяния в стандартном SMO базисе, согласованные с физическими граничными условиями для процессов рассеяния типа $(ac)_A + b \rightarrow a + (bc)_B$. В § 2.4В рассмотрены асимптотики стандартного SMO базиса в пределе разьединенных атомов с помощью алгебраической $O(4,2)$ вырожденной теории возмущений. Построен простой REDUCE алгоритм для получения коэффициентов разложения волновых функций и термов SMO базиса через параболические квантовые числа $[n_1, n_2, m] \in n$ и заряды Z_A и Z_B . Получены явные и простые выражения для асимптотик эффективных потенциалов $U_{n'n}(R) = U_{n'n}^{(0)} + U_{n'n}^{(1)} R^{-1} + U_{n'n}^{(2)} R^{-2}$ при $n' = I$ и $n' = n$, необходимые для практических расчетов реакций $(ac)_{n'=1} + b \rightarrow a + (bc)_{n'=1}$.

В главе 3 рассмотрены эффективные приближения и методы решения краевых задач, возникающие в адиабатическом подходе и представлениях уравнений Фаддеева и Шредингера.

В § 3.1 выяснен геометрический смысл адиабатических уравнений с эффективной массой $\mu(X)$, полученных при проецировании исходной системы уравнений на открытые каналы задачи рассеяния. Показано, что $\mu^{-1}(X)$ имеет смысл метрики на базе B , согласованной с симметричной формой связности, заменяющую исходную кроссимметричную форму $A(X)$ связности в локально полном адиабатическом базисе. Возникающая таким образом метрика, соответствует переходу к обобщенной задаче на пучка операторов, к которой обычно приводит использование неортогональных базисов в методе сильной связи каналов. В качестве иллюстраций работоспособности различных эффективных приближений приведены известные расчеты с разными адиабатическими базисами, демонстрирующие возможность учета их локальной неполноты.

В § 3.2 реализована многопараметрическая ньютоновская итерационная схема решения задачи рассеяния с учетом вариационных принципов и вириальных соотношений. Даны примеры расчетов с аналитическими потенциалами и упругого рассеяния мезоатомов с учетом закрытого канала.

В § 3.3 дана новая итерационная схема прямого решения уравнений

Фаддеева для системы трех заряженных частиц в координатном пространстве. Для этого выбрана матричная структура краевых задач, которая с самого начала согласована с адиабатическим пределом уравнений Фаддеева. При решении задачи на собственные значения в качестве начального приближения используется простое адиабатическое приближение.

В § 3.4 даны итерационные схемы решения задач на собственные значения, возникающие в многоканальных адиабатических расчетах гелиеподобных систем (с учетом изотопических эффектов).

В § 3.5 разработаны новые ньютоновские схемы с плавным включением возмущения для решения краевых задач в адиабатическом представлении уравнения Шредингера.

Глава 4 посвящена расчету основных и возбужденных состояний двухэлектронных атомов в многоуровневом адиабатическом подходе. В § 4.1 достигнута сходимость адиабатического базиса, достаточная для учета изотопических эффектов в барисентрических координатах.

В § 4.2 дана адиабатическая классификация дважды возбужденных состояний двухэлектронных систем на основе введенных корреляционных диаграмм. Установлено соответствие с используемыми феноменологическими классификациями.

В § 4.3 проведено исследование дважды возбужденных состояний иона водорода и атома гелия в многоканальном адиабатическом подходе. Исследована сходимость адиабатического базиса, получены двухсторонние оценки положений уровней в адиабатическом приближении.

В главе 5 проведен расчет полного набора связанных состояний мезомолекул изотопов водорода.

В § 5.1 дана процедура учета вкладов высших состояний дискретного и непрерывного спектров задачи двух центров, обеспечивающая сходимость стандартного адиабатического разложения при расчете связанных состояний мезомолекул.

В § 5.2 найдены все возможные связанные состояния мезомолекул изотопов водорода с аномальной четностью $\zeta = -(-1)^J$ и установлено, что полный орбитальный момент для таких состояний не превосходит значение $J = 3$. Показано, что все мезомолекулы находятся в основном колебательном состоянии $v = 0$, а максимальный полный орбитальный момент $J = 3$ достигается лишь для мезомолекулы ttu .

В § 5.3 приводятся результаты расчета полного набора 32 связанных состояний мезомолекул изотопов водорода вариационным методом.

(22 состояния с нормальной четностью $\gamma = +(-1)^J$ и 10 состояний с аномальной четностью $\gamma = -(-1)^J$). Установлено, что и в состояниях с нормальной четностью максимальный полный орбитальный момент $J = 3$ достигается лишь для мезомолекулы $tt\mu$.

В главе 6 рассмотрен практически важный пример трехчастичной задачи рассеяния выше порога развала в выходном канале реакции мюонного катализа.

В § 6.1 дано обобщение приближения внезапных возмущений и получено выражение для коэффициента прилипания $\tilde{\omega}_S$ на основе уравнений Фаддеева с резонансным каналом.

В § 6.2 обсуждаются разные проявления свойства локальной полноты в SMO и MO базисов в расчетах коэффициента прилипания $\tilde{\omega}_S$ в приближении внезапных возмущений.

Основные результаты

1. Дана формулировка задач на связанные состояния и рассеяния ниже трехчастичного порога на основе адиабатического представления уравнений Фаддеева и Шредингера.

2. Исследованы адиабатические базисы различных типов для трехчастичных атомных и мезомолекулярных систем.

3. Построены в адиабатическом подходе асимптотические состояния задачи рассеяния, согласованные с физическими граничными условиями.

4. Дана адиабатическая классификация состояний и выявлена динамическая симметрия в трехчастичной кулоновской задаче с неразделяющимися переменными.

5. Развита эффективные приближения и разработаны методы решения краевых задач, возникающих в адиабатическом представлении уравнений Фаддеева и Шредингера.

6. Проведены расчеты основных и возбужденных состояний двухэлектронных атомных систем в многоканальном адиабатическом подходе.

7. Выполнены расчеты полного набора связанных состояний мезомолекул изотопов водорода.

8. Дано обобщение приближения внезапных возмущений на основе уравнений Фаддеева с резонансным каналом.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Виноцкий С.И., Пономарев Л.И. Адиабатическое представление в задаче трех тел с кулоновским взаимодействием. ЭЧАЯ, 1982, т.13, вып.6, с.1336-1419.
2. Виноцкий С.И., Пономарев Л.И., Пузынин И.В., Пузынина Т.П., Соменов Д.Н., Файнман М.П. Резонансное образование M -мезомолекул изотопов водорода. ЖЭТФ, 1978, т.74, вып.3, 849-861.
3. Dubovik V.M., Markovski B.L., Vinitzky S.I. Multistep Adiabatic Representation. Preprint JINR E4-87-743, Dubna, 1987, 10 p.
4. Виноцкий С.И., Дубовик В.М., Куперин Ю.А., Макаров К.А., Марковски Б.Л., Павлов Б.С. Локальное адиабатическое представление задачи рассеяния в квантовой системе нескольких частиц. Препринт ОИЯИ, P4-87-929, Дубна, 1987, 16 с.
5. Виноцкий С.И., Кадомцев М.Б., Сузько А.А. Адиабатическое представление задачи трех тел в гиперсферических координатах. Амплитуда рассеяния. ЯФ 1990, т.51, вып. 4, с.952-972.
6. Kadomtsev M.B., Vinitzky S.I. Adiabatic representation for the three-body problem in the hyperspherical coordinates. I. Statement of the problem. J.Phys. B20, 1987, 5723-5736.
7. Абрашкевич А.Г., Виноцкий С.И., Касчиев М.С., Пузынин И.В. Двухмерный базис для задачи трех тел в гиперсферических координатах. ЯФ 1988, т.48, вып.4(10), с.945-955.
8. Kadomtsev M.B. and Vinitzky S.I. Asymptotic of effective potentials and wave functions of the three-body problem in suitable coordinates. J.Phys.B, 1986, v.19, L765-L771.
9. Kadomtsev M.B., Vinitzky S.I., Vukajlovich F.R. Adiabatic representation for the three-body problem in the limit of separated atoms in appropriate coordinates. Phys.Rev.A, 1987, v.36, p.4652-4661.
10. L.I.Ponomarev, S.I.Vinitzky. Adiabatic representation in the three-body problem with the Coulomb interaction. I. The choice of the effective Hamiltonian. J.Phys.B, 1979, v.12, p.567-584.
- II. Ponomarev L.I., Vinitzky S.I., Vukajlovich F.R. Adiabatic representation in the three-body problem with Coulomb interaction. II. The effective two-level approximation. J.Phys.B, 1980, v.13, p.847-867.

12. Kadoomtsev M.B., Vinitzky S.I. Perturbation theory with the $O(4,2)$ group for hydrogen-like atom in the field of distant charge. *J.Phys.A* 1985, v.18, I689-I695.
13. Витницкий С.И., Ростовцев В.А. Использование языка РЕДЬОС в реализации схемы теории возмущений для атома водорода на основе группы $O(4,2)$. Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. ДПИ-85-791, Дубна, 1985, 366-375.
14. Витницкий С.И., Пузынин И.В., Смирнов Ю.С. Решение задачи рассеяния на основе многопараметрических ньютоновских схем. Одноканальное рассеяние. *ЯФ*, т.52, 1990, вып.4(10), с.1176-1189.
15. Витницкий С.И., Меркурьев С.П., Пузынин И.В., Суслов В.М. Матричная структура уравнений Фаддеева. *ЯФ*, 1990, т.51, вып.4, с.952-972.
16. Абрашкевич А.Г., Витницкий С.И., Грига Ю.Л., Касчиев М.С., Пузынин И.В. H-SATOM-пакет прикладных программ для расчета спектральных характеристик гелиеподобных систем в гиперсферических координатах. Сообщение ОИЯИ, РП-88-745, Дубна, 1988, 24 с.
17. Абрашкевич А.Г., Абрашкевич Д.Г., Витницкий С.И., Пузынин И.В. VSATOM-пакет программ для вычисления уровней энергии и волновых функций гелиеподобных систем с учетом изотопических эффектов. Сообщение ОИЯИ, РП-89-427, Дубна, 1989, 21 с.
18. Puzynin I.V., Vinitzky S.I. Energy levels of mesic molecules. *Muon Catalyzed Fusion*, 1988, v.3, p.307-320.
19. Витницкий С.И., Гочева А.Д., Пузынин И.В. Итерационная схема решения интегродифференциального уравнения на основе метода вариации параметра и метода Ньютона. Сообщение ОИЯИ РП-81-837, Дубна, 1981, II с.
20. Витницкий С.И., Гочева А.Д., Пузынин И.В. О построении начальных приближений методом вариации параметра для ньютоновской схемы решения одной задачи на собственные значения. Сообщение ОИЯИ, РП-82-314, Дубна, 1982, 8 с.
21. Витницкий С.И., Гочева А.Д., Пузынин И.В. Повышение точности разностного решения интегродифференциального уравнения методом вариации параметра и паде-экстраполяции. Сообщение ОИЯИ, РП-82-315, 1982, II с.
22. Витницкий С.И., Пузынин И.В., Пузынина Т.П. Аппроксимация сплайнами таблично заданных потенциалов уравнения Шредингера для уточнения разностных решений. Сообщение ОИЯИ РП-82-428, 1982, I8 с.
23. Витницкий С.И., Гочева А.Д., Пузынин И.В., Пузынина Т.П. Ньюто-

- новская итерационная схема с возмущением операторов в задаче о вычислении уровней энергии мезомолекул. В сб. 5 Международное совещание по проблемам моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач, 20-23 сентября, Дубна, 1983, ДПО, II-84-818, с.178-180.
24. Abrashkevich A.G., Abrashkevich D.G., Kaschiev M.S., Poida V.Yu., Puzynin I.V., Vinitzky S.I. Convergence of the hyperspherical adiabatic expansion for helium-like system. *J.Phys.B*, 1989, v.22, p.3957-3963.
25. Abrashkevich A.G., Abrashkevich D.G., Puzynin I.V., Vinitzky S.I. Adiabatic representation in barycentric coordinates for helium-like system. *J.Phys.B*, 1991, v.24, p.1615-1638.
26. Абрашкевич А.Г., Абрашкевич Д.Г., Витницкий С.И., Касчиев М.С., Пузынин И.В. Исследование дважды возбужденных состояний H^- и He в многоканальном гиперсферическом адиабатическом подходе. Препринт ОИЯИ, Р4-89-425, Дубна, 1989, 20 с.
27. Абрашкевич А.Г., Абрашкевич Д.Г., Витницкий С.И., Химич И.В., Пузынин И.В. Адиабатическое описание резонансных состояний двухэлектронных систем методом экстраполяции по константе связи. Препринт ОИЯИ Р4-88-746, Дубна, 1988, 20 с.
28. Abrashkevich A.G., Abrashkevich D.G., Gaysak M.I., Lendyel V.I., Puzynin I.V., Vinitzky S.I. Multichannel calculation of the electric-dipole oscillator strength for the discrete $1s^0-1p^0$ transitions in helium with the hyperspherical adiabatic approach. *Phys.Lett.A*, 1991, v.152, N 9, 467-471.
29. Витницкий 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, т.79, вып.3(9), с.698-712.
30. Витницкий С.И., Мележик В.С., Пономарев Л.И. Сходимость адиабатического разложения в задаче трех тел с кулоновским взаимодействием. *ЖЭТФ*, 1982, т.82, вып.3, с.670-677.
31. Gocheva A.D., Gusev V.V., Melezhik V.S., Ponomarev L.I., Puzynin I.V., Puzynina T.P., Somov L.N., Vinitzky S.I. High accuracy energy-level calculations of rotational vibrational weakly bound states of $d\mu$ and $dt\mu$ mesic molecules. *Phys. Lett.B*, 1985, v.153, N 6, p.349-352.
32. Витницкий С.И., Пузынин И.В., Смирнов Ю.С. Вычисление энергии связанных состояний мезомолекул с аномальной пространственной четностью в адиабатическом представлении. *ЯФ*, 1990, т.51, вып.4, с.1063-1067.
33. Korobov V.I., Vinitzky S.I. Variational calculations of energy

- levels of mesic molecules with anomalous spatial parity. Phys. Lett.B 1989, v.228, N 1, p.21-24.
34. Korobov V.I., Puzynin I.V., Vinitsky S.I. Abnormal parity states of mesic molecules of hydrogen isotopes with total orbital momentum $J \geq 2$. Phys.Lett.B, 1991, v.255, N 1, p.7-10.
 35. Виницкий С.И., Коробов В.И., Пузынин И.В. Вариационный расчет уровней энергии мезомолекул. ЖЭТФ, 1986, т.91, вып.9, с.705-714.
 36. Korobov V.I., Puzynin I.V., Vinitsky S.I. A variational calculations of weakly bound rotational-vibrational states of the mesic molecules $dd\mu$ and $dt\mu$. Phys.Lett.B, 1987, v.196,p.272-276.
 37. Korobov V.I., Puzynin I.V., Vinitsky S.I. Bound states of hydrogen mesic molecular ions: variational approach. Preprint JINR E4-91-288, Dubna, 1991, 20 p.
 38. Motovilov A.K., Kuperin Yu.A., Suzko A.A., Vinitsky S.I. Faddeev equations with an extra resonance channel in muon catalysis. Preprint JINR E4-88-291, Dubna, 1988, 28 p.
 39. Dubovik V.M., Kuperin Yu.A., Markovski B.L., Melnikov Yu.B. Vinitsky S.I. Microscopic treatment of the nuclear reaction $d(t,n)\alpha$ within the adiabatic representation. Bulgarian-Journal of Physics, 1990, v.17, N 1, p.1-11.
 40. Абрашкевич А.Г., Виницкий С.И., Касчиев М.С., Пузынин И.В. Коэффициент прилипания в реакции $dt\mu \rightarrow \mu^4\text{He} + n$ в адиабатическом гиперсферическом подходе. Препринт ОИЯИ, P4-88-747, Дубна, 1988, 15 с.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 июля 1991 года.